

*О.С. Щукин, Г.В. Мальгин*

# **ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН**

*Учебное пособие*



Издательство  
Нижевартовского  
государственного  
университета  
2013

УДК 621.311(075)  
ББК 31.261  
Щ 95

Печатается по постановлению Редакционно-издательского совета  
Нижевартовского государственного университета

Рецензенты:

кандидат технических наук, доцент, начальник учебно-производственного  
центра МПЭП г.Омска «Омскэлектро» *Б.Н.Коврижин*;

кандидат технических наук, профессор кафедры  
«Электроснабжение промышленных предприятий», ОмГТУ *К.И.Никитин*

**Щукин О.С., Мальгин Г.В.**

**Щ 95**      **Испытания электрических машин:** Учебное пособие. — Нижневартовск: Изд-во Нижневарт. гос. ун-та, 2013. — 132 с.

**ISBN 978-5-00047-033-6**

Изложены теоретические и физические принципы работы и методы испытания всех основных типов электрических машин. Даются основные понятия и определения электротехники и электромеханики, краткие сведения о нормативных и промышленных испытаниях электрических машин. Описание лабораторных работ состоит из описания опытов в классической постановке и описания опытов на специализированном современном стенде разработки ООО «ИПЦ “Учебная техника”» (Ю.П.Галишников, П.Н.Сенигов, М.А.Карпеш). Каждый раздел пособия сопровождается циклом контрольных вопросов и задач.

Материалы пособия могут быть использованы при выполнении учебных лабораторных работ и проведения исследовательской работы студентов.

Предназначено для студентов старших курсов (бакалавриат, магистратура) направления 140400 — Электроэнергетика и электротехника.

УДК 621.311(075)  
ББК 31.261

Изд. лиц. ЛР № 020742. Подписано в печать 16.09.2013  
Формат 60×84/8. Бумага для множительных аппаратов  
Гарнитура Times. Усл. печ. листов 16,5  
Тираж 300 экз. Заказ 1431

*Отпечатано в Издательстве  
Нижевартовского государственного университета  
628615, Тюменская область, г.Нижневартовск, ул.Дзержинского, 11  
Тел./факс: (3466) 43-75-73, E-mail: izdatelstvo@ngg*

**ISBN 978-5-00047-033-6**

© Издательство НВГУ, 2013

# СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
О структуре пособия.....	6

## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

1. Магнитное поле, его характеристики .....	7
2. Закон электромагнитной индукции .....	10
3. Законы взаимодействия токов и магнитного поля.....	11
4. Понятие электрических сопротивлений .....	12
5. Измерения в трехфазных сетях .....	14

## Раздел 1. ТРАНСФОРМАТОРЫ

<i>Лабораторная работа 1.1</i>	
<b>Определение коэффициента трансформации однофазного трансформатора.....</b>	<b>16</b>
<i>Лабораторная работа 1.2</i>	
<b>Определение параметров трансформатора и его характеристик холостого хода и короткого замыкания.....</b>	<b>19</b>
<i>Лабораторная работа 1.3</i>	
<b>Определение группы соединений обмоток трансформатора.....</b>	<b>27</b>
<i>Лабораторная работа 1.4</i>	
<b>Параллельная работа трансформаторов .....</b>	<b>32</b>
<i>Лабораторная работа 1.5</i>	
<b>Включение трансформатора в сеть (анализ броска тока намагничивания) .....</b>	<b>38</b>
<i>Контрольные вопросы и задачи по разделу «Трансформаторы».....</i>	<i>41</i>

## Раздел 2. АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

<i>Лабораторная работа 2.1</i>	
<b>Механическая характеристика асинхронного двигателя.....</b>	<b>46</b>
<i>Лабораторная работа 2.2</i>	
<b>Пуск трехфазного асинхронного двигателя (с короткозамкнутым и фазным ротором) .....</b>	<b>52</b>
<i>Лабораторная работа 2.3</i>	
<b>Опытное определение рабочих характеристик и параметров асинхронного двигателя.....</b>	<b>57</b>
<i>Контрольные вопросы и задачи по разделу «Асинхронные машины» .....</i>	<i>66</i>

## Раздел 3. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Элементы теории и физики синхронной машины .....	70
<i>Лабораторная работа 3.1</i>	
<b>Опытное определение индуктивного сопротивления .....</b>	<b>76</b>

<i>Лабораторная работа 3.2</i>	
<b>Методы синхронизации синхронных генераторов с сетью .....</b>	<b>82</b>
<i>Лабораторная работа 3.3</i>	
<b>Угловые характеристики синхронной машины .....</b>	<b>93</b>
<i>Лабораторная работа 3.4</i>	
<b>U-образная характеристика синхронного генератора.....</b>	<b>97</b>
<i>Лабораторная работа 3.5</i>	
<b>Пуск трехфазного синхронного двигателя .....</b>	<b>102</b>
<i>Контрольные вопросы и задачи по разделу «Синхронные машины».....</i>	<i>107</i>

#### **Раздел 4. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Основные электромагнитные соотношения для машины постоянного тока .....	110
<i>Лабораторная работа 4.1</i>	
<b>Определение механической характеристики ДПТ независимого возбуждения.....</b>	<b>115</b>
<i>Лабораторная работа 4.2</i>	
<b>Определение механической характеристики ДПТ последовательного возбуждения .....</b>	<b>118</b>
<i>Лабораторная работа 4.3</i>	
<b>Определение рабочих характеристик ДПТ независимого возбуждения.....</b>	<b>121</b>
<i>Контрольные вопросы и задачи по разделу «Машины постоянного тока».....</i>	<i>125</i>
Приложения .....	127
П.1. Электрическая схема соединений тепловой защиты машины переменного тока.....	127
П. 2. Технические характеристики стенда и его оборудования.....	127
П.3. Стандартизация методов испытаний электрических машин.....	131
Список литературы.....	132

## ВВЕДЕНИЕ

Глубокое понимание технического устройства, будь то электрическая, тепловая, гидравлическая или любая иная машина, состоит из нескольких уровней знания. Чтобы рассчитать саму машину, подобрать ее характеристики, режимы работы, условия эксплуатации необходимо хорошо владеть расчетно-теоретическим набором знаний. С другой стороны, чтобы правильно реагировать на экстремальные ситуации при ее эксплуатации необходимо хорошо представлять физические принципы и процессы, на которых основана работа машины. Полное проникновение в существо процессов в машине возможно только при объединении обоих аспектов знаний.

Как показывает история развития науки и техники, исследование нового в природе происходит в два этапа — строится гипотеза и затем эта гипотеза проверяется экспериментально. Поэтому исследователь, выходя на эксперимент, всегда предполагает получить определенный результат.

В учебном процессе познание предмета также идет в два этапа, только место гипотезы здесь занимает готовая проверенная теория. Поэтому приступая к лабораторным экспериментам, читатель должен понять теорию предмета испытаний и знать какие результаты он должен получить при этом. Для повышения учебного эффекта от лабораторных испытаний каждый раздел настоящего пособия сопровождается краткими теоретическими комментариями.

## О СТРУКТУРЕ ПОСОБИЯ

Настоящее пособие адаптировано под лабораторные стенды [5], которые стали достаточно распространенными в учебных заведениях России. Поэтому материал пособия можно условно разделить на две части:

**1 часть** (авторская) — общие теоретические сведения об электротехнических законах, понятиях, определениях, принципы испытания электрических машин, схемы классических опытов, методы обработки результатов.

В конце каждого раздела дается цикл контрольных вопросов и задач.

**2 часть** (стилизованная редакция Руководства...[5]) — технические характеристики оборудования стенда, электрические схемы опытов, описание проведения опытов на стендах, обработка результатов.

# ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

## 1. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ, ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

В соответствии с современными представлениями о природе магнитного поля источником магнитного поля является электрический ток. Проводник с током создает магнитное поле, которое изображают замкнутыми силовыми линиями, густота линий условно показывает интенсивность поля. Направление силовых линий магнитного поля определяется по правилу «правого винта» (или «правило буравчика», (рис. 1 а).

При изображении магнитного поля считают, что силовые линии поля выходят из северного полюса  $N$  и входят в южный полюс  $S$  (рис. 1 б).

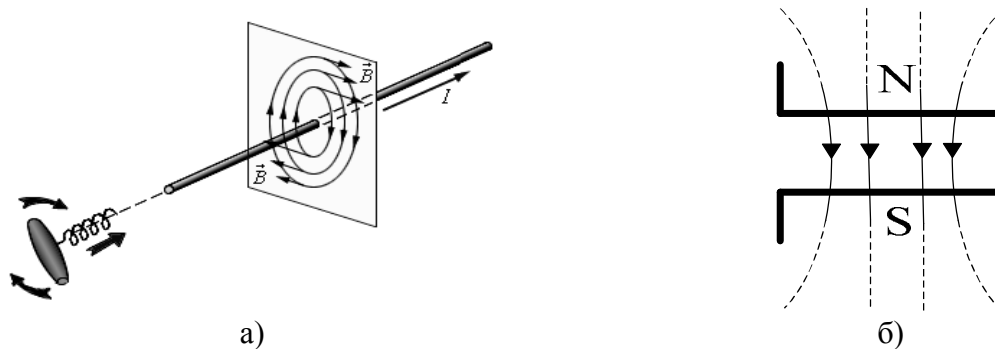


Рис. 1. К определению магнитного поля

### Количественные характеристики магнитного поля

**Магнитная индукция  $B$**  (векторная величина) — численно равна силе действующей со стороны магнитного поля на проводник единичной длины, по которому течет ток  $1A$  и проводник расположен перпендикулярно силовым линиям магнитного поля.

Единицей измерения магнитной индукции в СИ является *Тесла*  $[Тл]$ . Это значительная величина, например, в современных двигателях и генераторах индукция достигает значений  $(0,7—0,9)$  Тл, а в трансформаторах  $(1,4—1,7)$  Тл.

**Абсолютная магнитная проницаемость  $\mu_a$**   $= \mu_0 \cdot \mu$  — характеризует магнитные свойства среды, где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная проницаемость вакуума,  $\mu$  — относительная магнитная проницаемость среды, безразмерная величина (показывает во сколько раз изменится индукция в данной среде по отношению к вакууму). Для большинства материалов  $\mu \approx 1$ . Для ферромагнитных материалов  $\mu$  является функцией тока создающего поле и достигает больших значений до  $\mu = 10^5$ .

**Напряженность магнитного поля  $H$**  (векторная величина) не зависит от свойств среды и определяется только токами, которые создают это магнитное поле. Единица напряженности магнитного поля в СИ  $[A/м]$ . Напряженность связана с магнитной индукцией соотношением

$$B = \mu_a H. \quad (1)$$

**Магнитный поток  $\Phi$**  (скалярная величина) — это поток магнитной индукции через плоскую площадку  $S$ . В однородном магнитном поле магнитный поток равен произведению нормальной составляющей вектора индукции  $B_n$  на площадь  $S$  площадки

$$\Phi = BS \cos \alpha, \quad (2)$$

где  $B$  — магнитная индукция,  $\alpha$  — угол между вектором магнитной индукции  $\vec{B}$  и нормалью  $\vec{n}$  к площадке  $S$ . Единица измерения — *Вебер*  $[Вб]$ .

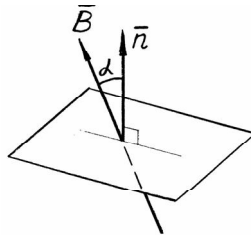


Рис. 2. К определению магнитного потока

**Магнитное напряжение**  $U_m$  — на участке  $av$  (рис. 3) в однородном магнитном поле равно  $U_m = H_l l$  (А), где  $H_l$  — проекция вектора  $H$  на отрезок  $av$  длиной  $l$ .

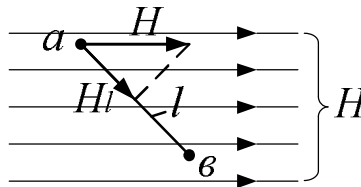


Рис. 3. К определению магнитного напряжения

**Магнитодвижущая сила (м.д.с.)**  $F$  — определяется вдоль выбранного контура и равна полному току, проходящему сквозь поверхность ограниченную этим контуром (в этом суть закона полного тока), и также равна магнитному напряжению, вычисленному вдоль замкнутого контура

$$F = \sum I = \sum H_l \cdot \Delta l. \quad (3)$$

Способность катушки числом витков  $w$  и током  $I$  создавать магнитное поле характеризуется магнитодвижущей силой

$$F = Iw, \quad (4)$$

**Потокосцепление.** Это одно из базовых понятий в электромеханике, так как именно посредством потокосцепления в электрических устройствах происходит передача энергии из одного контура в другой.

Пусть в некоторой области существует магнитное поле, которое на рисунке 4 изображено силовыми линиями  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$ ,  $\Phi_3$  и электрический контур с числом витков  $w$ .

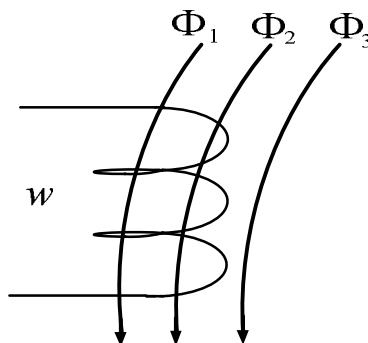


Рис. 4. К понятию о потокосцеплении

Из рисунка видно, что силовые линии  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  сцеплены с контуром (подобно сцеплению звеньев цепи), а линия  $\Phi_3$  такого сцепления не имеет. Способность магнитного поля обмениваться с контуром энергией обеспечивается только теми силовыми линиями, которые сцеплены с контуром.



Хорошим примером сцепления являются звенья цепи, если потянуть за одно звено, то на другое будет передаваться усилие. Это пример передачи энергии через взаимодействие. Электрические системы не являются исключением, в них также энергетические взаимодействия осуществляются за счет взаимного сцепления.

Для количественной оценки связи между магнитным полем и контуром введено понятие *потокосцепление* и определяют его как произведение магнитного потока  $\Phi$  на число витков  $w$ , с которым этот поток сцеплен

$$\Psi = \Phi \cdot w. \quad (5)$$

Например, для контура, изображенного на рис. 4 потокосцепление контура равно

$$\Psi = (\Phi_1 + \Phi_2) \cdot w.$$

Потокосцепление характеризует способность контура запастись энергией магнитного поля.

**Понятие об индуктивности.** Пусть некоторым током  $I$  создан магнитный поток  $\Phi$  и создано потокосцепление с контуром  $\Psi = \Phi \cdot w$ . Три физических параметра ток —  $I$ , магнитный поток —  $\Phi$  и потокосцепление —  $\Psi$  формально объединяются следующими соотношениями

$$\Psi = \Phi \cdot w = L \cdot I. \quad (6)$$

Здесь  $L$  — коэффициент пропорциональности, который называют «индуктивностью» и считают параметром контура. Таким образом, индуктивность контура определяется формулами

$$L = \frac{\Psi}{I} = \frac{\Phi \cdot w}{I}. \quad (7)$$

Из этих выражений следует, что индуктивность, введенная через потокосцепление, также характеризует способность контура запастись энергией магнитного поля.

В процессе работы электрических машин и аппаратов происходит обмен энергией между несколькими контурами, что приводит к необходимости расширить понятие индуктивности.

**Собственная и взаимная индуктивности.** Рассмотрим систему двух магнитно связанных контуров (рис. 5). Ток первого контура  $I_1$  создает магнитное поле  $\Phi_1$  изображенное двумя линиями  $\Phi_{11}$ ,  $\Phi_{12}$

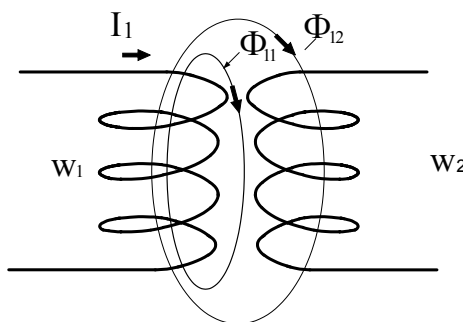


Рис. 5. К понятию о собственной и взаимной индуктивности

Все силовые линии этого поля сцепляются со своим контуром и поэтому создают потокосцепление

$$\Psi_1 = (\Phi_{11} + \Phi_{12}) \cdot w_1.$$

Этому потокосцеплению соответствует индуктивность контура

$$L_1 = \frac{\Psi_1}{I_1}.$$

Поскольку данная индуктивность создана всеми силовыми линиями собственного магнитного поля, ее называют «полной, собственной индуктивностью контура».

Но из рисунка 5 видно, что часть магнитного поля  $I$ -го контура сцепляется также с контуром 2, и поэтому создается потокоцепление

$$\Psi_{12} = \Phi_{12} \cdot w_2.$$

Согласно введенному понятию об индуктивности можно записать

$$M_{12} = \frac{\Psi_{12}}{I_1}.$$

Это индуктивность и ее называют «*взаимной индуктивностью между контурами 1 и 2*». (Взаимные индуктивности принято обозначать буквой  $M$ ).

Очевидно, что только силовая линия поля  $\Phi_{12}$  обеспечивает передачу энергии из одного контура в другой, а взаимная индуктивность  $M_{12}$  созданная этим полем определяет способность контуров обмениваться энергией. Например, с удалением контуров друг от друга обмен энергией между контурами будет уменьшаться за счет уменьшения потока  $\Phi_{12}$ , что естественно проявится в уменьшении  $M_{12}$ .

Магнитный поток  $\Phi_{11}$  в обмене энергии между контурами не участвует, и в теории электрических машин его называют *потокосцеплением*.

Рассматривая аналогичную картину со стороны контура 2 получим следующее: ток контура  $I_2$  создает магнитное поле  $\Phi_2 = \Phi_{22} + \Phi_{21}$ , которое в свою очередь создает потокоцепления и индуктивности

$$\Psi_2 = (\Phi_{22} + \Phi_{21}) \cdot w_2 \quad \Rightarrow \quad L_2 = \frac{\Psi_2}{I_2},$$

$$\Psi_{21} = \Phi_{21} \cdot w_1 \quad \Rightarrow \quad M_{21} = \frac{\Psi_{21}}{I_2}.$$

Поскольку магнитные потоки  $\Phi_{12}$  и  $\Phi_{21}$  проходят по одному и тому же пути с магнитным сопротивлением  $R_\mu$  взаимные индуктивности равны  $M_{12} = M_{21} = M$ .

## 2. ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

В 1831 г. английский физик М.Фарадей экспериментально обнаружил явление электромагнитной индукции, суть которого поясняется на рис. 6. Если в магнитном поле с индукцией  $B$  движется проводник со скоростью  $v$ , то в нем возникает электродвижущая сила  $E$

$$E = B \cdot l \cdot v. \quad (8)$$

Электродвижущая сила  $E$  измеряется в *Вольтах*  $[V]$  если  $B, [Тл]$ , длина проводника  $l, [м]$ , скорость  $v, [м/с]$ . Направление ЭДС определяется правилом правой руки рис. 7.

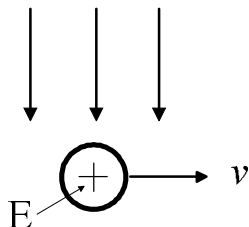


Рис. 6. К закону об электромагнитной индукции

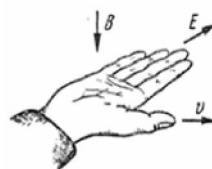


Рис. 7. Правило правой руки

Позже английский математик и физик Дж.Максвелл, создавая современную электродинамику, записал этот закон в общем виде в дифференциальной форме

$$e = -k \frac{d\Psi}{dt}, \quad (9)$$

где  $k$  — определяется используемой системой единиц (в системе СИ, принятой в инженерной практике  $k = 1$ ).

Согласно этому уравнению *причиной появления в электрическом контуре ЭДС является любое изменение потокоцепления этого контура.*

Если магнитный поток создает с контуром потокоцепление, изменяющееся во времени по синусоидальному закону  $\Psi = w\Phi_m \sin \omega t$ , то согласно уравнению 9 в контуре появится синусоидальная ЭДС

$$e = -\frac{d(w \cdot \Phi_m \sin \omega t)}{dt} = -\omega \cdot w \cdot \Phi_m \cos \omega t = -E_m \cos \omega t. \quad (10)$$

Последнее выражение открывает важную физическую связь между магнитным потоком и ЭДС: *при синусоидальном изменении магнитного потока ЭДС отстает по фазе (во времени) от магнитного потока на  $90^\circ$*  (рис. 8).

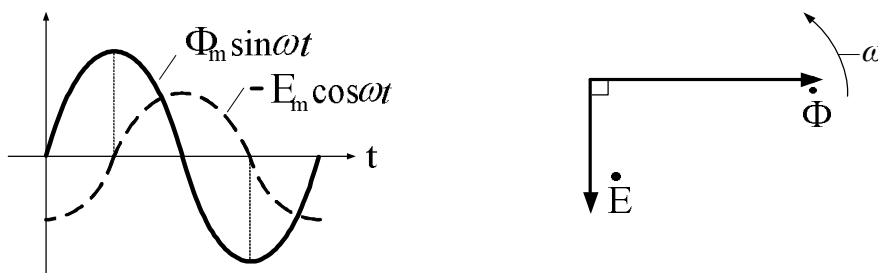


Рис. 8. Иллюстрация фазового сдвига между ЭДС и магнитным потоком

Электрические машины проектируют так, чтобы все физические процессы во времени и в пространстве были максимально приближены к синусоидальным законам, что обеспечивает машинам наилучшие характеристики. При этом в электрических машинах переменное потокоцепление создается различными способами: в трансформаторах магнитный поток неподвижен относительно катушки, но изменяется во времени, а в двигателях и генераторах магнитный поток постоянный по величине, но движется относительно обмоток. В обоих случаях для ЭДС справедлива формула (10).

### 3. ЗАКОНЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТОКОВ И МАГНИТНОГО ПОЛЯ

**Взаимодействие тока с магнитным полем.** Если проводник с током  $I$  находится в магнитном поле с индукцией  $B$ , то на него действует сила  $F$ . Направление этой силы определяется правилом левой руки (рис. 9).

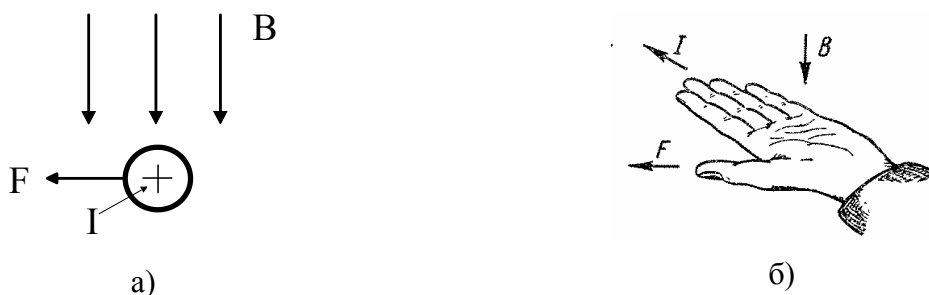


Рис. 9. К закону о взаимодействии тока с магнитным полем

Величина силы в ньютонах  $[H]$ , для случая прямолинейного проводника и однородного поля определяется по формуле (закон Ампера)

$$F = I \cdot B \cdot l \cdot \sin \alpha, \quad [A \cdot Tл \cdot м], \quad (11)$$

где  $l$  — длина проводника,  $\alpha$  — угол между направлением тока и вектором магнитной индукции.

Именно это силовое взаимодействие лежит в основе действия всех основных типов электрических машин.

**Взаимодействие токов.** Два параллельных проводника длиной  $l$  с токами  $I_1$  и  $I_2$  взаимодействуют друг с другом с силой

$$F_{12} = F_{21} = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{2I_1 I_2}{R} l, \quad (12)$$

На рис. 10 два параллельных проводника с токами  $I_1$  и  $I_2$  одного направления, находятся на расстоянии  $R$  друг от друга. Проводник с током  $I_2$  находится в поле  $B_1$  тока  $I_1$  и на него действует сила  $F_{12}$ . В соответствии с правилом левой руки она направлена в сторону тока  $I_1$ . Аналогично, ток  $I_1$  и магнитное поле  $B_2$  тока  $I_2$  создают силу  $F_{21}$ , направленную в сторону тока  $I_2$ .

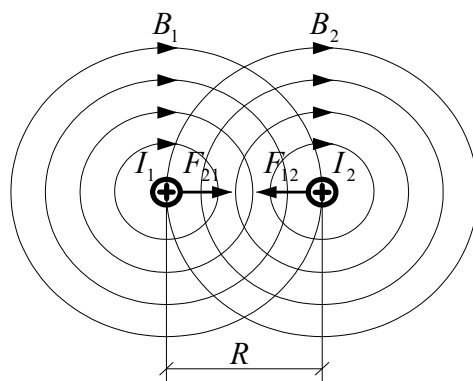


Рис. 10. Взаимодействие проводников с токами

Отсюда видно, что токи одного направления притягиваются. Легко показать, что токи противоположного направления будут отталкиваться.

В электрических аппаратах и машинах эти силы могут быть настолько велики, что ошибки при выборе или монтаже могут приводить к значительным разрушениям.

#### 4. ПОНЯТИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Сопротивления — это идеализированные элементы электрической цепи, с помощью которых учитываются те или иные физические процессы в электрических устройствах. В электротехнике используются следующие понятия электрических сопротивлений:

- $r$  — активное сопротивление,
- $x_L$  — индуктивное (реактивное) сопротивление,
- $x_C$  — емкостное (реактивное) сопротивление,
- $z$  — полное комплексное сопротивление.

**Активное сопротивление** — учитывает тепловые потери в электрическом устройстве в соответствии с формулой Джоуля-Ленца

$$P_{эл} = r \cdot I^2. \quad (13)$$

В частных случаях, когда в электрическом устройстве отсутствуют вихревые токи, активное сопротивление учитывает тепловые потери только в проводе, по которому протекает ток  $I$ . В этом случае сопротивление можно непосредственно измерить прибором, например, омметром. Но при наличии вихревых токов измерить активное сопротивление непосредственно прибором невозможно, так как тепловые потери возникают не только в проводе, по которому протекает ток, но и в металлических элементах конструкции, где магнитное поле создает вихревые токи.

В общем случае определение активного сопротивления основано на измерении тока  $I$  и потерь активной мощности  $P_{эл}$  в электрическом устройстве

$$r = \frac{P_{эл}}{I^2}. \quad (14)$$

**Индуктивное сопротивление** — учитывает ЭДС в электрических контурах. Понятие индуктивного сопротивления возникает в силу следующих физических процессов: ток  $I$  создает магнитное поле  $\Phi$ , которое индуцирует в контуре электродвижущую силу  $E$ . Запишем это так

$$I \Rightarrow \Phi \Rightarrow E.$$

Индуктивное сопротивление определяется как отношение ЭДС в контуре к току, который создал эту ЭДС

$$x_L = \frac{E}{I}. \quad (15)$$

**Индуктивные сопротивления самоиндукции и взаимной индукции.** Вернемся к рис. 5 с двумя индуктивно связанными контурами. Ток  $I$ -го контура создает магнитное поле  $\Phi_I$  и это поле в своем контуре создает электродвижущую силу  $E_I$

$$I_1 \Rightarrow \Phi_1 = (\Phi_{11} + \Phi_{12}) \Rightarrow E_1.$$

Тогда, согласно определению (15), можно говорить об индуктивном сопротивлении

$$x_1 = \frac{E_1}{I_1}.$$

Это сопротивление называют *собственным индуктивным сопротивлением контура 1*, так как оно создано собственным магнитным полем контура.

Но часть силовых линий  $I$ -го контура сцеплены с контуром 2 и они создают в этом контуре ЭДС

$$I_1 \Rightarrow \Phi_{12} \Rightarrow E_{12}.$$

Это дает основание ввести индуктивное сопротивление

$$x_{12} = \frac{E_{12}}{I_1}.$$

Это сопротивление называют *сопротивлением взаимной индукции между контурами 1 и 2*. Аналогичные построения можно провести и по отношению тока 2-го контура.

**Расчетное и комплексное значение индуктивного сопротивления.** Синусоидальный ток  $i = I_m \sin \omega t$ , в катушке с индуктивностью  $L$  создает в ней ЭДС

$$e = -\frac{L di}{dt} = -\omega L I_m \cos \omega t = -E_m \cos \omega t. \quad (16)$$

Отсюда расчетное значение индуктивного сопротивления

$$x_L = \frac{E_m}{I_m} = \omega L. \quad (17)$$

Пользуясь понятием комплексного тока  $i = \sqrt{2} \dot{I} e^{j\omega t}$  легко получить комплексное значение индуктивного сопротивления, оно равно

$$x_L = j\omega L. \quad (18)$$

**Емкостное сопротивление.** Емкость — это идеализированный элемент, способный накапливать энергию электрического поля. Из теории электричества известна интегральная связь между напряжением на обкладках конденсатора  $u$ , его емкостью  $C$  и током  $i$

$$u = \frac{1}{C} \int \frac{di}{dt}. \quad (19)$$

При синусоидальном токе  $i = I_m \sin \omega t$  получают расчетное значение емкостного сопротивления

$$x_C = \frac{U_m}{I_m} = \frac{1}{\omega C} \quad (20)$$

и его комплексное выражение

$$x_C = \frac{1}{j\omega C} = -j \frac{1}{\omega C}. \quad (21)$$

**Полное комплексное сопротивление** представляет собой сумму всех сопротивлений в комплексной форме

$$z = r + x_L + x_C = r + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}). \quad (22)$$

Это выражение позволяет представить весь набор электрических сопротивлений в виде треугольника сопротивлений (рис. 11).

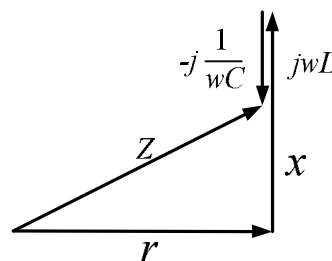


Рис. 11. Треугольник электрических сопротивлений

## 5. ИЗМЕРЕНИЯ В ТРЕХФАЗНЫХ СЕТЯХ

*Измерение полной, активной и реактивной мощности.* В трехфазных устройствах, будь это машина или аппарат, полная мощность равна сумме мощностей всех фаз и рассчитывается по результатам измерений фазных напряжений  $U_\phi$  и токов  $I_\phi$  по формуле

$$S = S_{\phi.A} + S_{\phi.B} + S_{\phi.C}, \quad (23)$$

где  $S_\phi = U_\phi I_\phi$  — полная мощность фазы.

Если трехфазное устройство работает в симметричном режиме, мощность всех фаз одинакова, тогда расчет упрощается и не зависит от схемы соединения обмоток  $Y$  или  $\Delta$ .

Действительно для схемы —  $Y$   $U_\phi = U_\Delta / \sqrt{3}$ ;  $I_\phi = I_\Delta$ , для схемы —  $\Delta$   $U_\phi = U_\Delta$ ;  $I_\phi = I_\Delta / \sqrt{3}$  и независимо от схемы соединения обмоток.

$$S = 3 \cdot S_\phi = 3 \cdot U_\phi I_\phi = \sqrt{3} \cdot U_\Delta I_\Delta. \quad (24)$$

На рис. 12. показана схема включения измерительных приборов, позволяющая определять, полную, активную и реактивную мощность трехфазного устройства. Полная мощность  $S$  определяется по показаниям амперметра и вольтметра по формуле (24), активная мощность измеряется ваттметрами  $P = P_1 + P_2$ , реактивная мощность определяется по формуле  $Q = \sqrt{S^2 - P^2}$ .

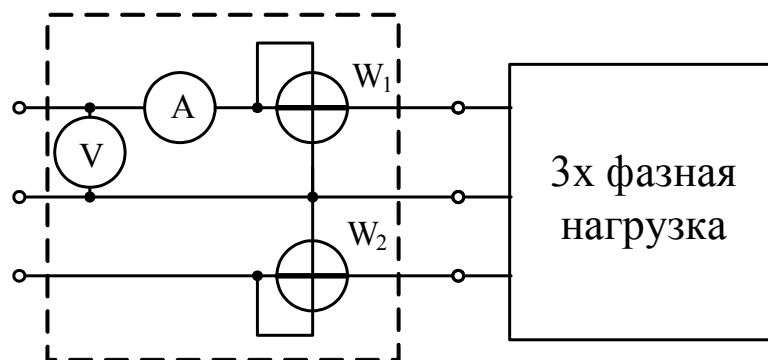


Рис. 12. Схема измерения мощностей в трехфазном потребителе

*Измерение сопротивлений электрических машин и аппаратов.* В многофазных устройствах понятие сопротивления имеет смысл применительно к одной фазе, поэтому для определения сопротивлений необходимо знать фазные значения напряжения и тока

$$z_{\phi} = U_{\phi} / I_{\phi}, \quad r_{\phi} = P_{\phi} / I_{\phi}^2, \quad x_{\phi} = \sqrt{z_{\phi}^2 - r_{\phi}^2} \quad (25)$$

где для схемы  $Y$   $U_{\phi} = U_{\text{л}} / \sqrt{3}$ ;  $I_{\phi} = I_{\text{л}}$ ;  $P_{\phi} = P/3$ ;

для схемы  $\Delta$   $U_{\phi} = U_{\text{л}}$ ;  $I_{\phi} = I_{\text{л}} / \sqrt{3}$ ;  $P_{\phi} = P/3$ .

## Раздел 1

### ТРАНСФОРМАТОРЫ

---

#### Лабораторная работа 1.1

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРАНСФОРМАЦИИ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

**Прочти это.** Преобразование уровней напряжения является основной функцией трансформатора. Если на первичную обмотку трансформатора с числом витков  $w_1$  подается переменное напряжение  $U_1$ , то на вторичной обмотке с числом витков  $w_2$  будет напряжение  $U_2 \neq U_1$ . Подавляющее большинство трансформаторов в энергосистеме и на промышленных предприятиях установлены для выполнения именно этой функции.

Для количественной оценки преобразования напряжения вводят понятие коэффициента трансформации

$$k_{TP} = \frac{U_2}{U_1} \approx \frac{w_2}{w_1}. \quad (1.1)$$

Для обоснования соотношения (1.1) для каждой из обмоток трансформатора запишем уравнения напряжений (2-е уравнение Кирхгофа):

— для обмотки, которая принимает энергию из сети

$$u_1 + e_1 = i_1 r_1,$$

— для обмотки, которая отдает энергию в сеть

$$e_2 = i_2 r_2 + u_2.$$

Определение коэффициента трансформации ведут в режиме холостого хода трансформатора, то есть вторичная обмотка разомкнута  $i_2 = 0$ , а ток холостого хода в первичной обмотке принимают  $i_1 \approx 0$ , так как он пренебрежимо мал. Тогда уравнения напряжений для обмоток примут вид

$$u_1 \approx e_1, \quad u_2 = e_2.$$

При синусоидальном изменении магнитного потока  $\Phi_m \sin \omega t$  электродвижущие силы обмоток равны

$$e_1 = -\frac{d\Psi_1}{dt} = -w_1 \frac{d}{dt}(\Phi_m \sin \omega t) = -w_1 \omega \Phi_m \cos \omega t = -E_{m1} \cos \omega t,$$
$$e_2 = -\frac{d\Psi_2}{dt} = -w_2 \frac{d}{dt}(\Phi_m \sin \omega t) = -w_2 \omega \Phi_m \cos \omega t = -E_{m2} \cos \omega t,$$

а действующие значения этих ЭДС будут

$$E_1 = \frac{E_{m1}}{\sqrt{2}} = \frac{w_1 \omega \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f w_1 \Phi_m,$$
$$E_2 = \frac{E_{m2}}{\sqrt{2}} = \frac{w_2 \omega \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f w_2 \Phi_m.$$

На основании последних выражений легко получить доказательство (1.1).

**Примечание.** Для трехфазных трансформаторов коэффициент трансформации определяется по фазным напряжениям обмоток.



## Программа эксперимента

Эксперимент проводится на специализированном стенде с использованием следующего оборудования.

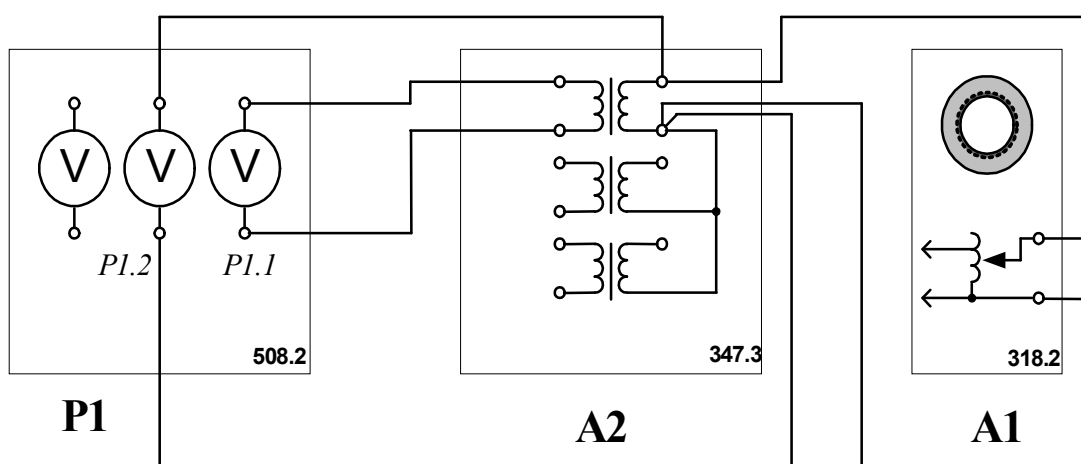
## Перечень аппаратуры

**A1** — автотрансформатор: используется в качестве регулируемого источника синусоидального напряжения промышленной частоты.

**A2** — испытуемый трансформатор: выбирается один из однофазных трансформаторов трехфазной трансформаторной группы.


**Р1** — блок мультиметров: используется для измерения напряжений первичной и вторичной обмоток испытуемого трансформатора.

<b>Обозначение</b> (на эл. схеме)	<b>Наименование</b>	<b>Код</b> (см. на стенде)
<b>A1</b>	Регулируемый автотрансформатор	318.2
<b>A2</b>	Трехфазная трансформаторная группа	347.3
<b>P1</b>	Блок мультиметров	508.2



**Рис. 1.1. Электрическая схема соединений для измерения коэффициента трансформации однофазного трансформатора**

## Указания по проведению эксперимента

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соедините гнезда защитного заземления «» устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» автотрансформатора А1.
3. Соедините электрическим шнуром приборную вилку электропитания «220 В» автотрансформатора А1 с розеткой однофазной трехпроводной электрической сети питания напряжением 220 В.
4. Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
5. Поверните регулировочную рукоятку автотрансформатора А1 в крайнее против часовой стрелки положение.

6. В трансформаторной группе А2 переключателем установите желаемое номинальное вторичное напряжение трансформатора, например, 133 В.
7. Включите выключатели «СЕТЬ» блока мультиметров Р1 и автотрансформатора А1.
8. Активизируйте мультиметры блока Р1, задействованные в эксперименте.
9. Вращая регулировочную рукоятку автотрансформатора А1, выставьте напряжение  $U_1$  на его выходе (выводах первичной обмотки испытуемого однофазного трансформатора) равным, например 220 В.
10. Измерьте с помощью мультиметра блока Р1 напряжение  $U_2$  на выводах вторичной обмотки испытуемого однофазного трансформатора.
11. Отключите выключатели «СЕТЬ» всех использованных блоков.
12. Вычислите искомый коэффициент трансформации однофазного трансформатора по формуле

$$k_{TP} = U_2 / U_1.$$

## Лабораторная работа 1.2

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСФОРМАТОРА И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИК ХОЛОСТОГО ХОДА И КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

**Прочти это.** Трансформатор является одним из самых распространенных элементов систем электроснабжения, и его параметры во многом определяют условия эксплуатации энергосистем и систем электроснабжения промышленных предприятий.

**Основные параметры трансформатора.** Трансформаторы имеют очень широкий спектр функций: силовые, измерительные, печные, сварочные, преобразователи частоты и фазы и т.д. В каждом конкретном случае полный набор параметров у трансформаторов различный, но для всех трансформаторов есть базовый набор параметров, которые определяются на основе *T*-образной схемы замещения (рис. 1.2).

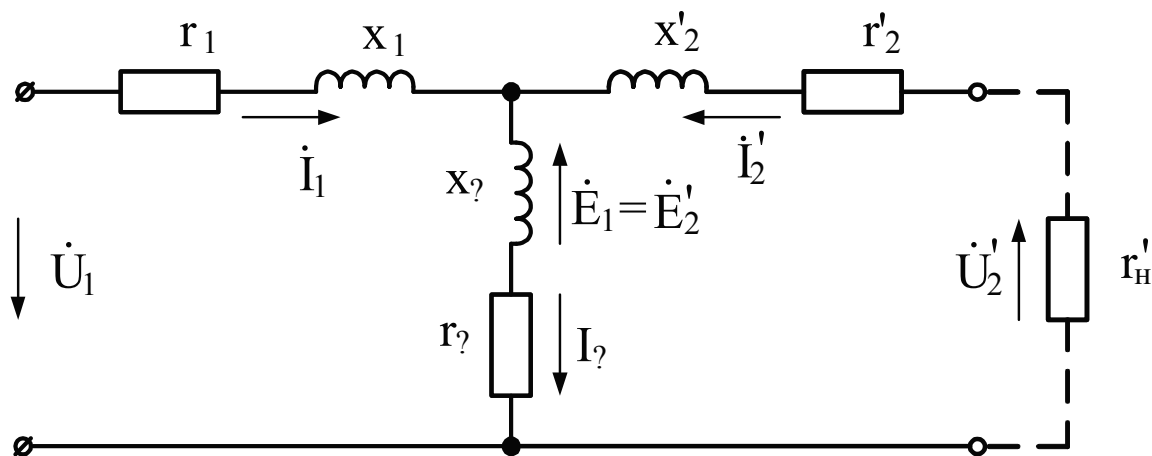


Рис. 1.2. *T*-образная схема замещения трансформатора

Из теории трансформатора следует, что схема замещения дает точный учет энергетических соотношений трансформатора, поэтому параметры схемы замещения трансформатора используются не только при расчете его характеристик, но и при анализе режимов работы энергосистем.

Из теории электрических цепей известно, что каждое электрическое сопротивление учитывает определенные физические эффекты, например, активное сопротивление учитывает тепловые потери, индуктивное сопротивление учитывает ЭДС и т.д. Ниже в таблице 1.1 дана физическая трактовка параметров *T*-образной схемы замещения трансформатора.

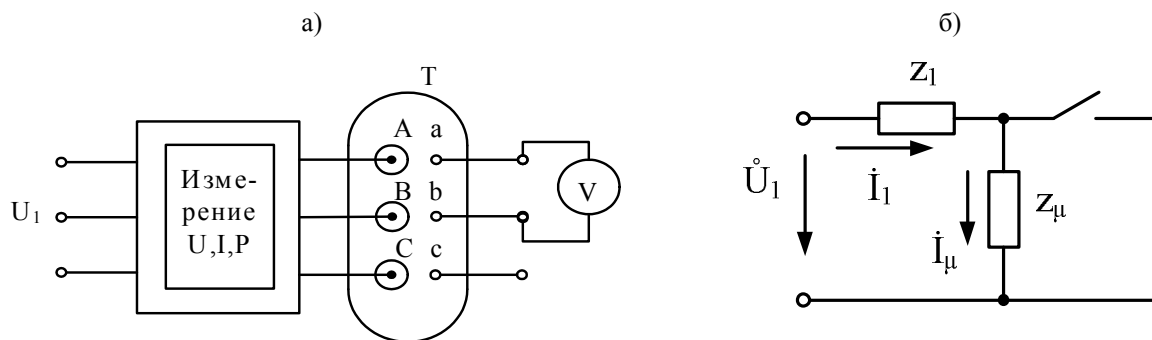
Таблица 1.1

Обозначение параметра	Наименование параметра	Физический смысл
$r_1$	активное сопротивление первичной цепи	Учитывает тепловые потери в первичной обмотке от тока $I_1$ и в металлических элементах конструкции трансформатора от магнитного поля рассеяния этой обмотки.
$r'_2$	приведенное активное сопротивление обмотки ротора	Учитывает тепловые потери во вторичной обмотке от тока $I_2$ и в металлических элементах конструкции трансформатора от магнитного поля рассеяния этой обмотки.

$r_\mu, x_\mu$	активное и реактивное сопротивление ветви намагничивания	Учитывают потери активной мощности в магнитопроводе трансформатора вызванного вихревым током от главного магнитного потока в сердечнике и учитывают ЭДС в первичной и вторичной обмотках от главного магнитного потока.
$x_1$	индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки	Учитывает ЭДС в первичной обмотке, которая создается полем рассеяния этой обмотки.
$x'_2$	приведенное индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора	Учитывает ЭДС во вторичной обмотке, которая создается полем рассеяния этой обмотки.

Для определения сопротивлений схемы замещения проводятся два базовых опыта: опыт холостого хода (ХХ) и опыт короткого замыкания (КЗ).

**Опыт холостого хода.** Холостой ход трансформатора это режим, при котором к одной из обмоток приложено напряжение сети, а остальные обмотки разомкнуты. На рис. 1.3 показана схема базового опыта ХХ трехфазного трансформатора. Все физические величины и параметры в режиме ХХ принято обозначать индексом «0», например  $U_0, I_0, Z_0$  и т.д. Следует напомнить, что все сопротивления схемы замещения определяются *только на фазу трансформатора*, что требуется учитывать при обработке результатов эксперимента.



**Рис. 1.3. Опыт ХХ трехфазного трансформатора:**  
а) схема включения трехфазного трансформатора в опыте ХХ;  
б) схема замещения трансформатора в режиме ХХ

Согласно рис. 1.3 б сопротивление трансформатора в режиме холостого хода представляет собой сумму двух сопротивлений

$$z_0 = z_1 + z_\mu, \quad r_0 = r_1 + r_\mu, \quad x_0 = x_1 + x_\mu.$$

Так как в силу физических процессов, протекающих в силовых трансформаторах, справедливы соотношения  $z_\mu \gg z_1$  то значением  $z_1$  пренебрегают и принимают  $z_0 \approx z_\mu$ . Это означает, что опытом ХХ определяются сопротивления поперечной цепи схемы замещения трансформатора.

По данным опыта ХХ также строится характеристика холостого хода

$$U_0 = f(I_0) \text{ при } f = \text{const}$$

и определяется коэффициент трансформации  $k_{TP} = U_2 / U_1$ .

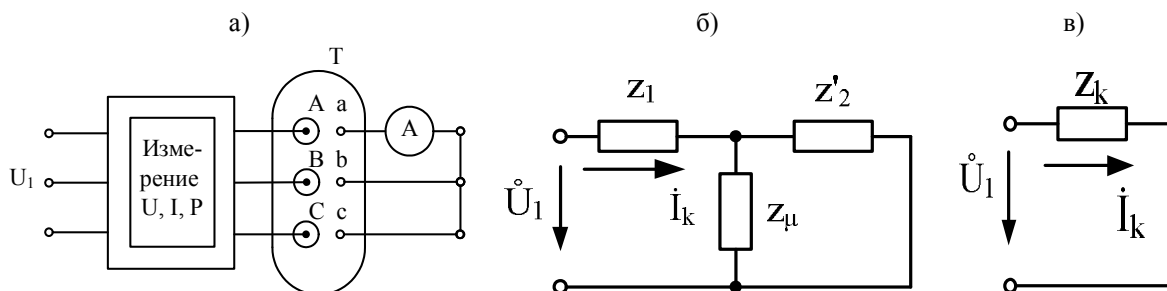
При промышленной эксплуатации трансформатора опыт ХХ проводят:

- 1) при испытании магнитопровода;
- 2) при испытании трансформатора с запаянными отводами без бака;
- 3) при приемо-сдаточных испытаниях.

**Примечание.** При подготовке к данной лабораторной работе читателю следует дать физическое толкование неравенства  $z_\mu \gg z_1$ . Это поможет глубже понять физику работы трансформатора.

**Опыт короткого замыкания.** Опыт короткого замыкания называют испытание, при котором одну из обмоток трансформатора замыкают накоротко, а другую питают от источника переменного тока при номинальной частоте и пониженном напряжении при токах в обмотках, не превышающих их номинальные значения. Обычно замыкают накоротко обмотку низшего напряжения.

На рис. 1.4 показана схема базового опыта КЗ трехфазного трансформатора. Это достаточно опасный опыт и должен проводиться аккуратно. Все физические величины и параметры в режиме КЗ обозначаются индексом «к», например,  $U_k, I_k, Z_k$ .



**Рис. 1.4. Опыт КЗ трехфазного трансформатора:**

а) схема включения трехфазного трансформатора в опыте КЗ;  
б) полная схема замещения в опыте КЗ; в) упрощенная схема замещения в опыте КЗ

Так как в этом опыте напряжение на первичной обмотке значительно ниже номинального, то магнитная система трансформатора ненасыщена (объясните почему) и  $z_\mu \gg z_1 + z'_2$ . Это дает возможность с высокой точностью считать  $z_\mu \approx \infty$  и принять упрощенную схему замещения, по которой определяется сопротивление короткого замыкания

$$z_k \approx z_1 + z'_2;$$

$$r_k \approx r_1 + r'_2;$$

$$x_k \approx x_1 + x'_2.$$

Таким образом, опыт КЗ позволяет определить сопротивление продольной цепи схемы замещения трансформатора.

Разделить  $z_k$  на составляющие  $z_1$  и  $z'_2$  довольно трудно. Обычно принимают схему замещения симметричной, полагая, что  $z_1 = z'_2$ . Это допущение близко к действительности и не вносит ощутимых погрешностей в расчеты.

Напряжение, которое нужно подвести при опыте КЗ к одной из обмоток, чтобы в ней установился номинальный ток, называют напряжением КЗ и оно равно

$$U_k = I_n z_k.$$

Напряжение КЗ показывает, какая часть напряжения поступающего на трансформатор падает на самом трансформаторе при номинальном токе.

Напряжение КЗ один из важнейших параметров трансформатора существенно влияющий на режимы работы энергосистем.

Напряжение КЗ в паспорте трансформатора указывается в процентах от номинального напряжения питаемой обмотки или в относительных единицах

$$U_{k*} = \frac{U_k}{U_n} = \frac{I_n z_k}{U_n} = \frac{z_k}{z_n} = z_{k*}.$$

*Предлагаем читателю с помощью мысленных экспериментов ответить на вопрос: зависят ли параметры КЗ трансформатора от схем включения обмоток Y или Δ?*

В промышленных условиях данные опыта короткого замыкания используются:

- 1) при определении превышения температур масла и обмоток при испытании на нагрев;
- 2) при определении КПД трансформатора;
- 3) при определении возможности параллельной работы данного трансформатора с другими;
- 4) при расчете изменения вторичного напряжения трансформатора при нагрузке.

### **Программа опытов холостого хода (XX) и короткого замыкания (КЗ)**

Опыты проводятся на специализированном стенде с использованием следующего оборудования.

#### **Перечень аппаратуры**

**A1** — автотрансформатор: используется в качестве регулируемого источника синусоидального напряжения промышленной частоты;

**A2** — испытуемый трансформатор: выбирается один из однофазных трансформаторов трехфазной трансформаторной группы;

**A13** — реостат: используется для ограничения тока в обмотках испытуемого трансформатора (используется только в опыте КЗ).

**P1** — блок мультиметров: используется для измерения тока и напряжений обмоток испытуемого трансформатора;

**P2** — блок мультиметров: используется для измерения активной и реактивной мощностей.

<b>Обозначение на эл. схеме</b>	<b>Наименование</b>	<b>Код (см. на стенде)</b>
<b>A1</b>	Регулируемый автотрансформатор	318.2
<b>A2</b>	Трехфазная трансформаторная группа	347.3
<b>A13</b>	Реостат	323.4
<b>P1</b>	Блок мультиметров	508.2
<b>P2</b>	Измеритель мощностей	507.3

## Эксперимент 1

### Построение характеристик холостого хода однофазного трансформатора: $I_0 = f(U_0)$ , $P_0 = f(U_0)$ , $\cos\varphi_0 = f(U_0)$

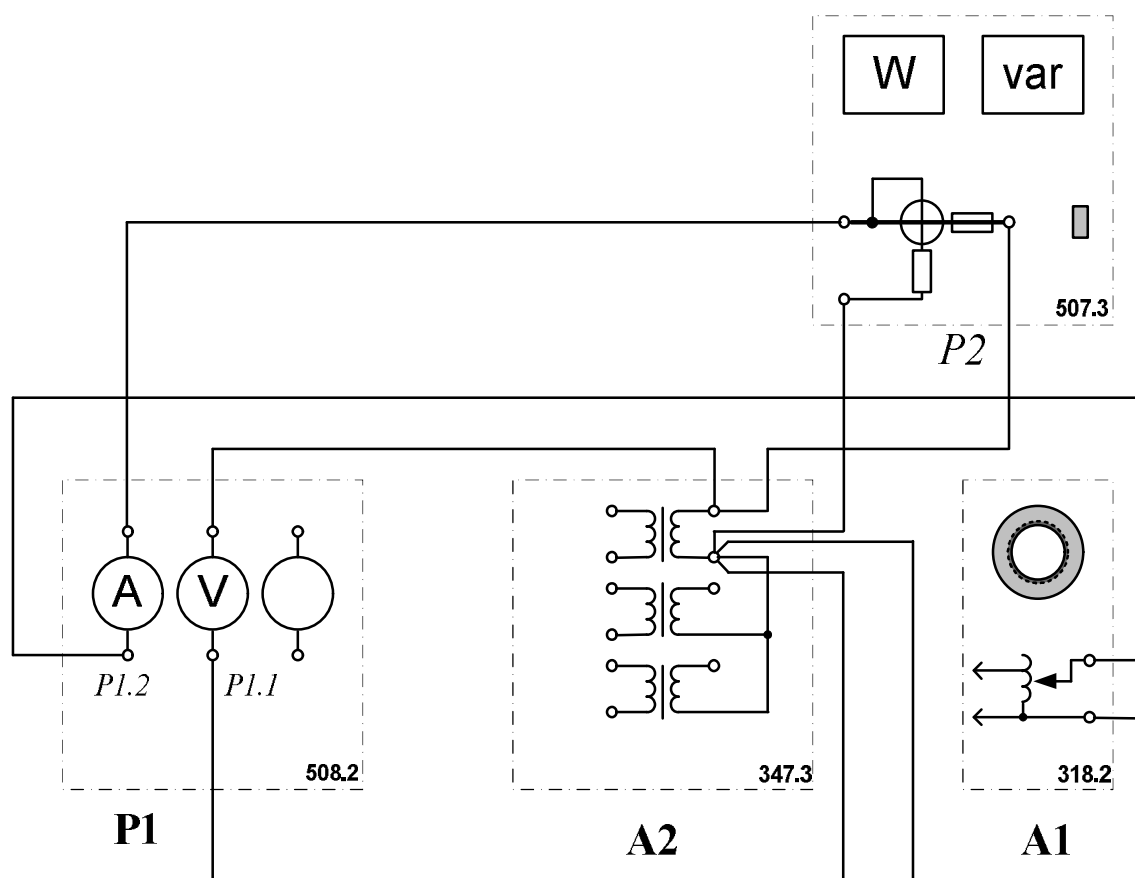


Рис. 1.5. Электрическая схема снятия характеристик XX однофазного трансформатора

### Указания по снятию характеристик XX трансформатора

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соедините гнезда защитного заземления « $\oplus$ » устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» автотрансформатора A1.
3. Соедините электрическим шнуром приборную вилку электропитания «220 В» автотрансформатора A1 с розеткой однофазной трехпроводной электрической сети питания напряжением 220 В.
4. Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
5. Поверните регулировочную рукоятку автотрансформатора A1 в крайнее против часовой стрелки положение.
6. Включите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.
7. Активизируйте мультиметры блока P1, задействованные в эксперименте.
8. Автотрансформатором A1, изменяйте напряжение  $U_0$  на выводах первичной обмотки испытуемого однофазного трансформатора в диапазоне 0...240 В и заносите показания вольтметра P1.1, амперметра P1.2, ваттметра и варметра измерителя P2 в таблицу 1.2.

9. Отключите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

10. По опытным данным рассчитайте значения коэффициента мощности

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{P_0^2 + Q_0^2}}.$$

11. По данным эксперимента постройте характеристики холостого хода однофазного трансформатора  $I_0 = f(U_0)$ ,  $P_0 = f(U_0)$ ,  $\cos \varphi_0 = f(U_0)$ .

Таблица 1.2

U <sub>0</sub> , В								
I <sub>0</sub> , А								
P <sub>0</sub> , Вт								
Q <sub>0</sub> , вар								
cosφ <sub>0</sub>								

*Дополнительное расчетное задание:*

1. Рассчитайте  $\cos \varphi_0 = f(U_0)$  без использования показаний варметра  $Q_0$ .
2. Определите коэффициент трансформации испытуемого трансформатора при номинальном напряжении.



## Эксперимент 2

### Построение характеристик короткого замыкания однофазного трансформатора: $I_K = f(U_K)$ , $P_K = f(U_K)$ , $\cos\varphi_K = f(U_K)$

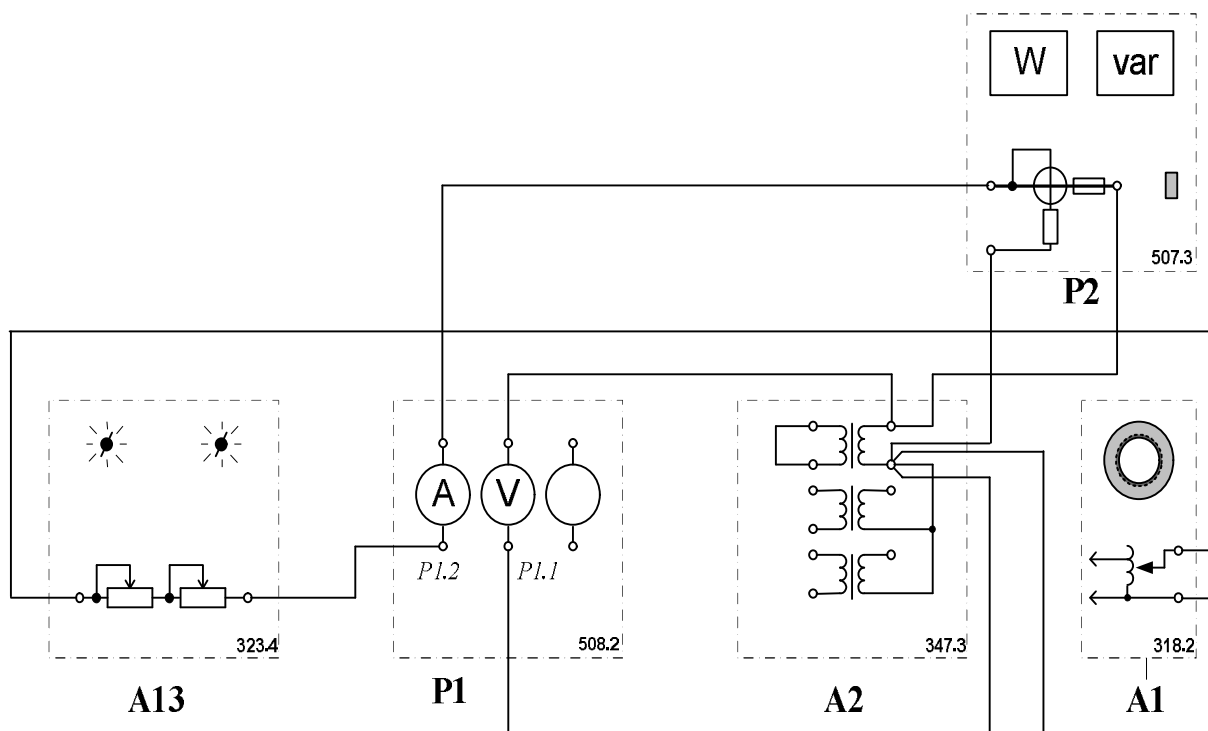


Рис. 1.6. Электрическая схема снятия характеристик КЗ однофазного трансформатора

#### Указания по снятию характеристики КЗ трансформатора

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соедините гнезда защитного заземления « $\oplus$ » устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» автотрансформатора А1.
3. Соедините электрическим шнуром приборную вилку электропитания «220 В» автотрансформатора А1 с розеткой однофазной трехпроводной электрической сети питания напряжением 220 В.
4. Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
5. Поверните регулировочную рукоятку автотрансформатора А1 в крайнее против часовой стрелки положение.
6. В трансформаторной группе А2 переключателем установите желаемое номинальное вторичное напряжение трансформатора, например, 133 В.
7. Установите суммарное сопротивление реостата А13 равным, например, 100 Ом.
8. Включите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте и активизируйте мультиметры блока Р1, задействованные в эксперименте.
9. Медленно вращая регулировочную рукоятку автотрансформатора А1 по часовой стрелке, увеличивайте ток  $I_K$  первичной обмотки испытуемого однофазного трансформатора до тех пор пока показания амперметра Р1.2 не достигнут 0,5 А (не более!) и заносите показания амперметра Р1.2 вольтметра Р1.1, ваттметра и варметра измерителя Р2 в таблицу 1.3.

10. Отключите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

По опытным данным рассчитайте

$$\cos \varphi_K = \frac{P_K}{\sqrt{P_K^2 + Q_K^2}}.$$

12. По данным эксперимента постройте характеристики короткого замыкания однофазного трансформатора  $I_K = f(U_K)$ ,  $P_K = f(U_K)$ ,  $\cos \varphi_K = f(U_K)$ .

Таблица 1.3

U <sub>K</sub> , В										
I <sub>K</sub> , А										
P <sub>K</sub> , Вт										
Q <sub>K</sub> , вар										
cosφ <sub>K</sub>										

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРУППЫ СОЕДИНЕНИЙ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА

**Прочти это.** В общем случае между ЭДС первичной и вторичной обмоток трансформатора может существовать сдвиг по фазе. Для характеристики этого фазового сдвига вводится понятие «группы соединений обмоток».

Рассмотрим сначала однофазный трансформатор. В однофазном трансформаторе ЭДС первичной и вторичной обмоток могут либо совпадать по фазе, либо быть сдвинутыми на  $180^\circ$ . Поясним это.

На рис. 1.8 изображен трансформатор, в обмотках которого магнитный поток создает ЭДС, и зажимы обмоток с одинаковым знаком ЭДС обозначены на рисунке «н — начало» и «к — конец». Хотя ЭДС изменяется во времени по синусоидальному закону, в любой момент времени на одинаково обозначенных зажимах знак всегда будет одинаковый. Если по одному зажиму первичной и вторичной обмоток соединить электрически, то на свободных зажимах ЭДС будет, либо совпадать по фазе (рис. 1.8 а), либо находиться в противофазе (рис. 1.8 б).

Для определения группы соединений принято вектор ЭДС обмотки высшего напряжения представлять минутной стрелкой часов и направлять его на циферблате на 12, а вектор ЭДС обмотки низшего напряжения представлять часовой стрелкой. Тогда часы на рис. 1.8 а покажут 0 часов, а на рис. 1.8 б соответственно 6 часов. О таком трансформаторе говорят, что он имеет номер группы 0 либо 6.

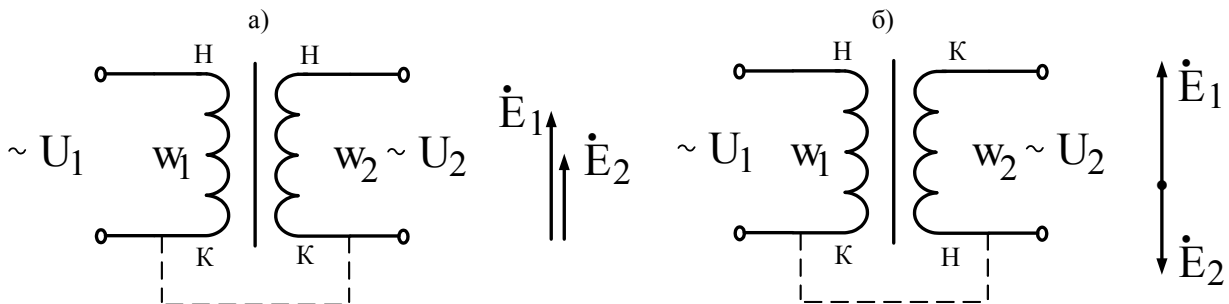


Рис. 1.8. Номера групп однофазного трансформатора

В трехфазных трансформаторах используются три основные схемы соединения обмоток: звезда «Y», треугольник «Δ», зигзаг «Z», но при этом, каждая из этих схем может быть собрана различными способами. Поэтому номеров групп соединения у трехфазных трансформаторов значительно больше.

**Маркировка обмоток** — это экспериментальная процедура по определению начал и концов обмоток. Понятие «начала» и «концы» обмоток имеет смысл только для индуктивно связанных обмоток (то есть для обмоток пронизанных единым магнитным потоком). Общий магнитный поток индуцирует в обмотках ЭДС, и вводы обмоток приобретают потенциалы «+» или «-».

*Маркировка обмоток сводится к определению вводов обмоток, имеющих в любой момент времени одинаковые знаки потенциалов*

Если направление намотки известно, то маркировка обмоток не вызывает труда, в противном случае маркировку производят с помощью специальных опытов. Суть опытов в следующем.

Начало и конец любой одной обмотки обозначают произвольно, а у всех остальных индуктивно связанных обмоток начала и концы определяют экспериментально, используя электрические схемы.

В учебной практике для иллюстрации физического содержания понятий «начала» и «концы» удобно использовать схему, изображенную на рис. 1.9 а.

Например, вводы обмотки 1 назначаем, как показано на рис. 1.9 а. Вводы обмотки 2 подлежат маркировке, для чего произвольно обозначаем их «н» и «к» и затем проверяем с помощью указанной схемы.

Если в результате измерений окажется, что  $U_2 > U_1$  маркировка обмотки 2 выбрана правильно (это поясняется на рис. 1.9 б).

При  $U_2 < U_1$  — катушки оказались включенными встречно (рис. 1.9 в), это значит, что маркировка катушки 2 выбрана неверно, ее надо поменять местами.

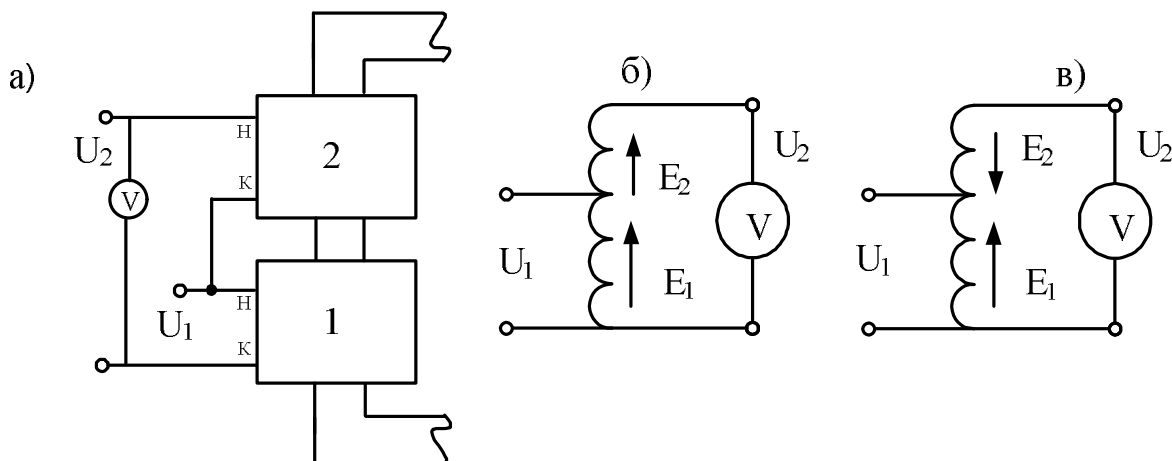


Рис. 1.9. Пример схемы для маркировки обмоток

**Определение номера группы.** Номер группы трехфазного трансформатора определяется величиной угла, между одноименными линейными векторами ЭДС обмоток высшего (ВН) и низшего (НН) напряжений.

Всю работу по определению номера группы можно разделить на 3 этапа.

*1 этап — построение векторов фазных ЭДС.* Все катушки, расположенные на одном стержне, сцеплены с единым магнитным потоком стержня и в них индуцируется ЭДС одного направления. Для того чтобы начать построения векторов следует мысленно выбрать любой момент времени, например, предположим, что в данный момент времени ЭДС в одной катушке направлена от конца к началу. Тогда во всех остальных индуктивно связанных катушках ЭДС также будут направлены — от конца к началу. После этого на схеме (рис. 1.10 а), можно поставить направление ЭДС, а на временной диаграмме (рис. 1.10 б) построить вектора фазных ЭДС (они имеют временной сдвиг относительно друг друга 120 эл).

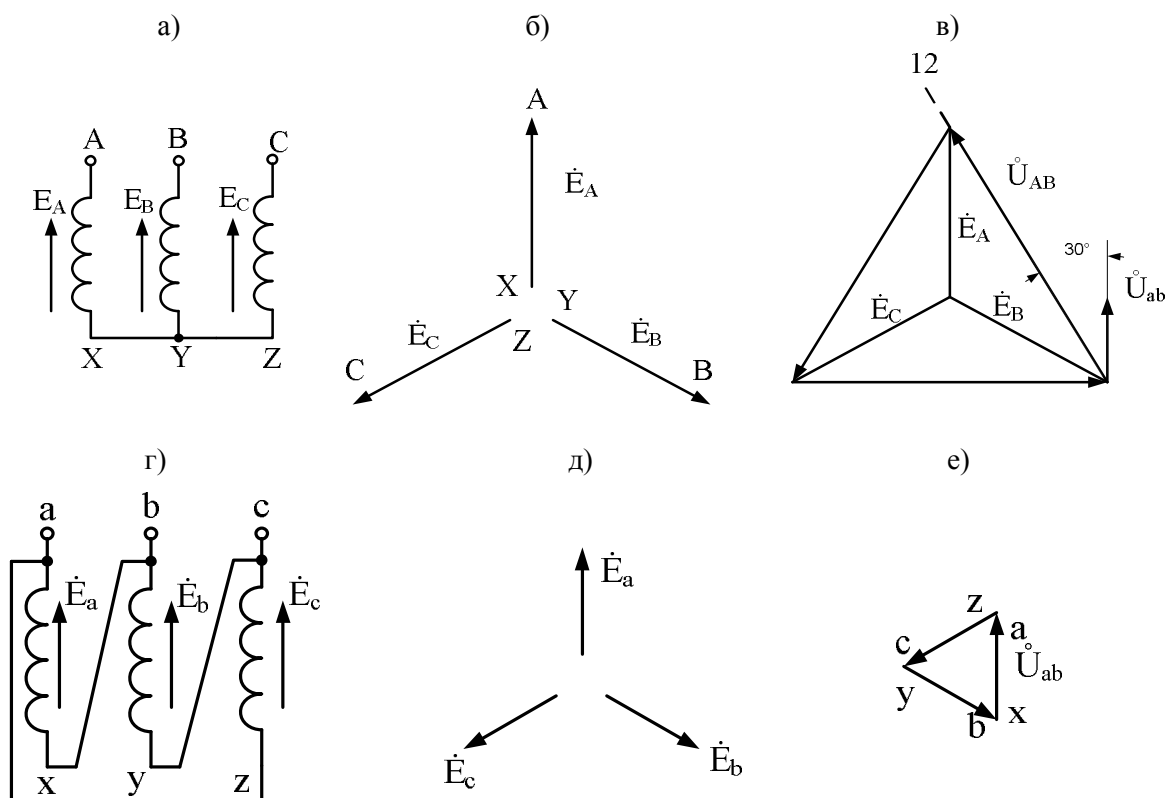


Рис. 1.10

Обратите внимание, до сих пор все построения не были связаны с конкретной схемой соединения обмоток трансформатора.

*2 этап — составление векторных диаграмм ЭДС для обмоток ВН и НН.* На этом этапе уже используется схема соединения обмоток. Если зажимы нескольких обмоток электрически соединены, то потенциалы этих зажимов равны, и значит, соответствующие концы векторов ЭДС данных обмоток должны быть сведены в одну точку. В данном примере в обмотке ВН электрически соединены концы X, Y, Z и поэтому вектора фазных ЭДС образуют звезду (рис. 1.10 в).

Для обмотки НН, включенной в «Δ», строим треугольник ЭДС согласно схеме электрических соединений. При построении треугольника ЭДС учтено, что потенциалы точек b-x, c-y, a-z равны. При этих построениях следует иметь в виду то, что вектора на рис. 1.10 б и рис. 1.10 в изображены на временной диаграмме, и поэтому из одного рисунка в другой разрешается только параллельный перенос векторов.

*3 этап — определение номера группы.* По направлению любого линейного вектора высшего напряжения, например  $\dot{U}_{AB}$ , ставится цифра 12 (минутная стрелка циферблата), параллельно переносится одноименный вектор низшего напряжения  $\dot{U}_{ab}$  (часовая стрелка), что дает номер группы (часы показывают 1 час).

## Программа эксперимента

Для проведения эксперимента на стенде собирается электрическая схема, изображенная на рис. 1.11. На стенде установлены 3 однофазных трансформатора с указанием начал и концов их фазных обмоток.

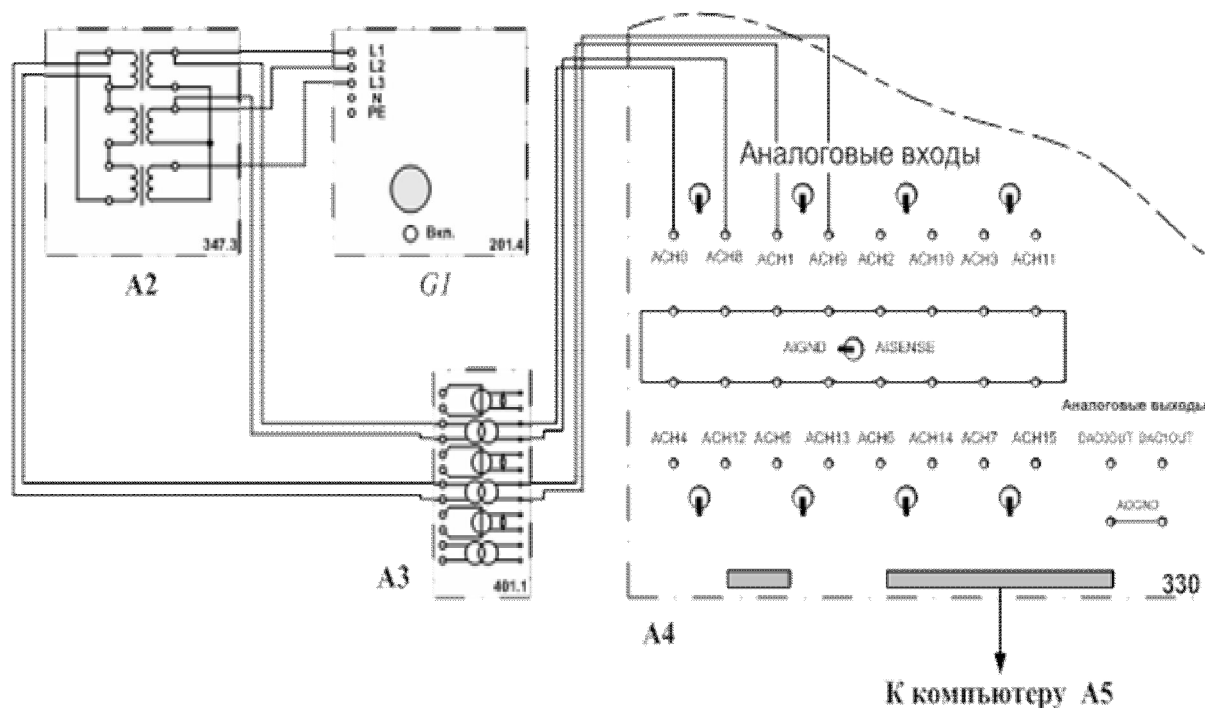


Рис. 1.11. Электрическая схема для определения группы соединения обмоток трехфазного трансформатора


В схеме использовано следующее оборудование.

### Перечень аппаратуры

- G1** — источник синусоидального напряжения промышленной частоты;  
**A2** — испытуемая трехфазная трансформаторная группа  
**A3** — блок измерительных трансформаторов напряжения  
**A4** — коннектор, через аналоговые входы ACH0-ACH8 и ACH1-ACH9 которого измеряемые напряжения вводятся в компьютер A5.

Обозначение на эл. схеме	Наименование	Код (см. на стенде)
<b>G1</b>	Трехфазный источник питания	201.4
<b>A2</b>	Трехфазная трансформаторная группа	347.3
<b>A3</b>	Блок измерительных трансформаторов тока и напряжения	401.1
<b>A4</b>	Коннектор	330
<b>A5</b>	Персональный компьютер	550

### Указания по определению группы соединений

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соедините гнезда защитного заземления «» устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» трехфазного источника питания G1.
3. Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
4. В трехфазной трансформаторной группе A2 переключателем установите желаемое номинальное вторичное напряжение трансформатора, например, 220 В.
5. Приведите в рабочее состояние персональный компьютер A5 и запустите прикладную программу «Многоканальный осциллограф».
6. Включите источник G1.
7. Нажмите кнопки «ВКЛ» включения сканирования первого и второго каналов виртуального осциллографа.
8. Используя возможности программы «Многоканальный осциллограф», определяйте взаимный фазовый сдвиг между кривыми регистрируемых напряжений и по нему определяйте группу соединений обмоток трехфазного трансформатора.
9. По завершении эксперимента отключите источник G1.
10. В отчете постройте векторную диаграмму и подтвердите на ней номер группы определенный экспериментально.

## ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРОВ

**Прочти это.** Под параллельной работой трансформаторов понимается работа двух или более трансформаторов при параллельном соединении как первичных, так и вторичных обмоток (рис. 1.12). Параллельная работа трансформаторов дает существенный технический и экономический эффект:

а) повышается надежность снабжения потребителей, так как выход из строя одного трансформатора не лишает потребителей энергии;

б) уменьшается резервная мощность трансформаторов при их параллельном включении;

в) в период снижения нагрузок часть трансформаторов может быть отключена, что обеспечивает более экономный режим работы подстанции за счет уменьшения потерь холостого хода;

г) упрощается организация ремонтов.

В связи с этим в подавляющем большинстве случаев на подстанциях устанавливают два трансформатора. Кроме того, многие энергосистемы страны содержат кольцевые соединения сетей связанные через трансформаторные узлы, что фактически тоже является параллельным режимом трансформаторов.

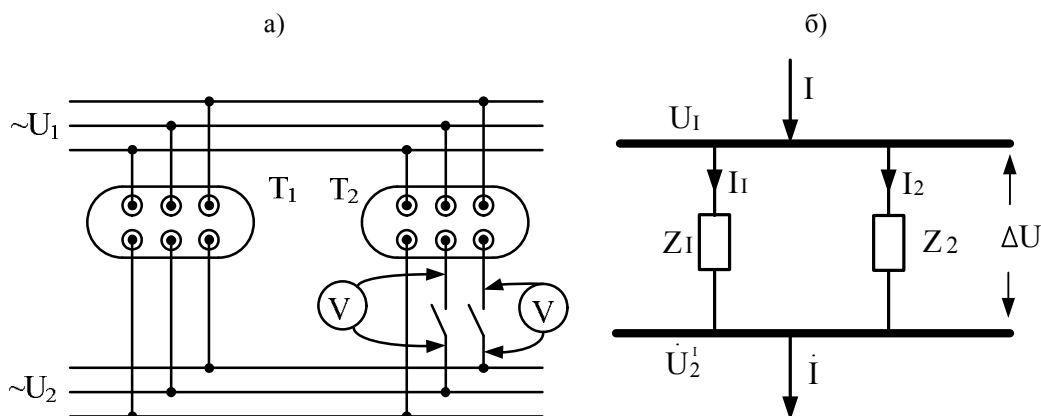


Рис. 1.12. Параллельное включение трехфазных трансформаторов (а), схема замещения (б)

**Условия параллельной работы.** При параллельном включении трансформаторов должно быть обеспечено: 1) отсутствие уравнительного тока, 2) распределение нагрузки между трансформаторами пропорционально их номинальным мощностям. Эти требования могут быть выполнены только при правильном включении трансформаторов на параллельную работу и при соблюдении следующих условий:

- 1) равенство коэффициентов трансформации;
- 2) одинаковые группы соединения;
- 3) равные напряжения короткого замыкания.

Удобной и простой моделью для объяснения необходимости этих условий является параллельная работа двух источников постоянного напряжения.

**Нарушение условия 1.** Два источника с различными ЭДС, например, ( $E_1 > E_2$ ) включаются параллельно на общую нагрузку (рис. 1.13 а). В этом случае на контактах выключателя будет разность потенциалов  $\Delta E = E_1 - E_2$ , и при его замыкании под действием  $\Delta E$  в контуре этих источников будет циркулировать уравнительный ток

$$I_y = \frac{\Delta E}{r_1 + r_2}.$$



В нагрузку уравнивающий ток не попадает (объясните почему).

**Нарушение условия 2.** Два источника предназначенные для параллельной работы ошибочно оказались включенными, так как показано на рис. 1.13 б (это соответствует параллельному включению источников с группами 0 и 6). В этом случае в контуре источников будет циркулировать уравнивающий ток равный короткому замыканию источников

$$I_y = \frac{\Delta E}{r_1 + r_2} = \frac{E_1 + E_2}{r_1 + r_2}.$$

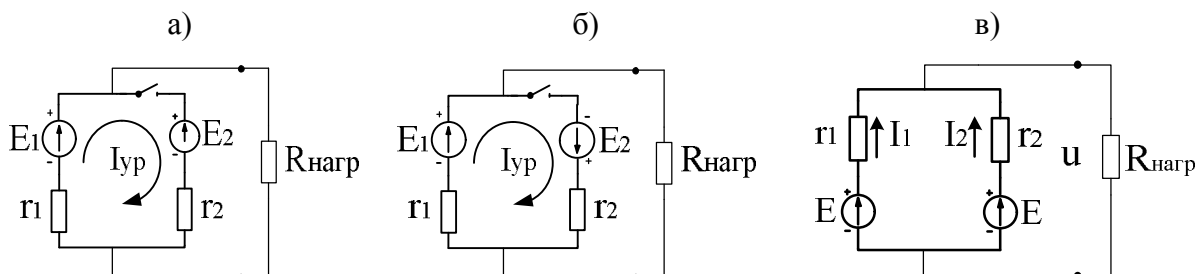


Рис. 1.13. Иллюстрация нарушений параллельной работы двух источников

**Нарушение условия 3.** При соблюдении условий 1 и 2 нарушено условие 3, например  $r_1 < r_2$ . Из рис. 1.13 в видно, что ток нагрузки будет распределяться между источниками неравномерно

$$I_1 = \frac{E}{r_1} > I_2 = \frac{E}{r_2}$$

источник с меньшим сопротивлением нагружается сильнее, в результате чего при его полной нагрузке другой источник будет недогружен. Поэтому полная мощность, которую можно снять с этих источников будет занижена.

**Выводы:** Нарушение условий 1 и 2 вызывает появление уравнивающего тока, который циркулирует внутри параллельно включенных источников (трансформаторов); величина этого тока определяется только внутренними сопротивлениями используемых источников (для трансформаторов это сопротивления короткого замыкания)

$$\dot{I}_y = \frac{\Delta \dot{E}}{z_{k1} + z_{k2}},$$

уравнивающий ток не выходит в цепь нагрузки, но приводит к неравномерному распределению нагрузки между источниками.

Нарушение условия 3 приводит к неравномерному распределению нагрузки между источниками.

**Примечание 1.** При объяснении условий параллельной работы источников использована простейшая схема с источниками постоянного напряжения. При подготовке к данной лабораторной работе читателю рекомендуем эти вопросы разобрать на примере трехфазных трансформаторов, поскольку здесь расширяется спектр физических явлений и для объяснений требуется использование векторных диаграмм.

**Примечание 2.** При первом включении трансформаторов на параллельную работу проверяется их соответствие по соблюдению условий 1 и 2. Для этого один из трансформаторов присоединяют первичными и вторичными обмотками к соответствующим сетям, а второй трансформатор присоединяют к сети только одним из вводов (рис. 1.12). При одинаковых группах обмоток трансформаторов и равных коэффициентах трансформации напряжения на одноименных вводах и шинах будут равны. При этом вольтметры покажут ноль. Так могут быть проверены трансформаторы со схемами соединения вторичных

обмоток  $Y$  и  $\Delta$ . При соединении вторичных обмоток по схеме  $Y_0$  требуется несколько иная схема проверки безопасного включения трансформаторов на параллельную работу. Предлагаем читателю разобраться самостоятельно, почему появление нейтрали изменяет схему проверки включения трансформаторов.

### Программа экспериментов по измерению уравнивающих токов

В экспериментах используется оборудование стенда указанное ниже

Обозначение на эл. схеме	Наименование	Код (см.на стенде)
<b>G1</b>	Трехфазный источник питания	201.4
<b>A2, A7</b>	Две трехфазные трансформаторные группы	347.3
<b>A10</b>	Активная нагрузка	306.1
<b>P1</b>	Блок мультиметров	508.2

## Эксперимент 1

### Определение уравнивающего тока, вызванного неравенством коэффициентов трансформации параллельно включенных трансформаторов

В эксперименте используются два однофазных трансформатора с разными коэффициентами трансформации. Для проведения эксперимента на стенде собирается электрическая схема, изображенная на рис. 1.14.

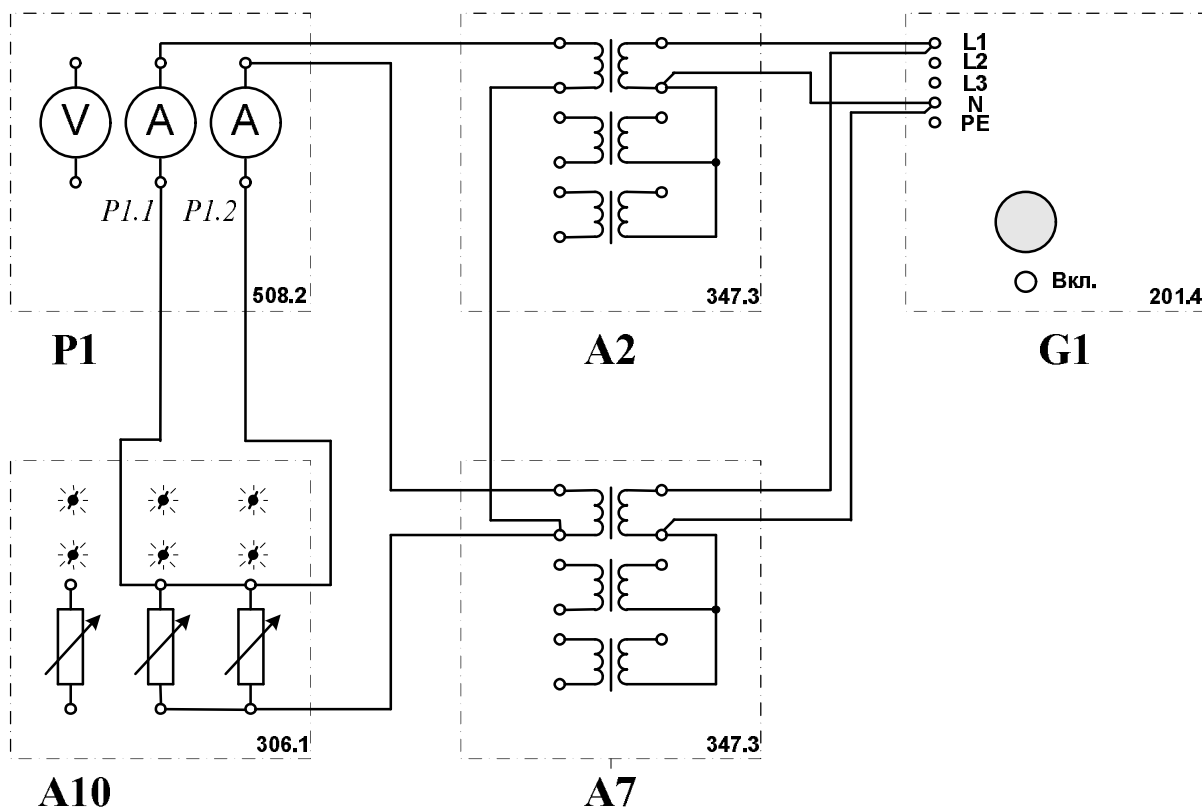


Рис. 1.14. Электрическая схема для определения уравнивающего тока при разных коэффициентах трансформации

#### Указания по проведению эксперимента

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соедините гнезда защитного заземления « $\oplus$ » устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «PE» трехфазного источника питания G1.
3. Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
4. Переключателями номинальных напряжений блоков A2 и A7 установите коэффициенты трансформации трансформаторов, например, равными соответственно 230/230 В и 230/220 В.
5. Установите переключателями активную нагрузку в фазах блока A10, например, равной 30%.
6. Включите выключатель «СЕТЬ» блока мультиметров P1.
7. Активизируйте мультиметры блока P1, задействованные в эксперименте.

8. Включите источник G1.

9. С помощью амперметров P1.1 и P1.2 измерьте токи  $I_1$  и  $I_2$  нагрузки параллельно включенных однофазных трансформаторов.

10. Отключите источник G1.

11. Уравнительный ток, вызванный неравенством коэффициентов трансформации параллельно включенных однофазных трансформаторов, определяйте по формуле

$$I_y = \frac{I_1 - I_2}{2}.$$

## Эксперимент 2

### Параллельная работа трехфазных трансформаторов с различными группами соединения обмоток

В эксперименте используются два трехфазных трансформатора с различными группами соединения обмоток. Для проведения эксперимента на стенде собирается электрическая схема, изображенная на рис. 1.15.

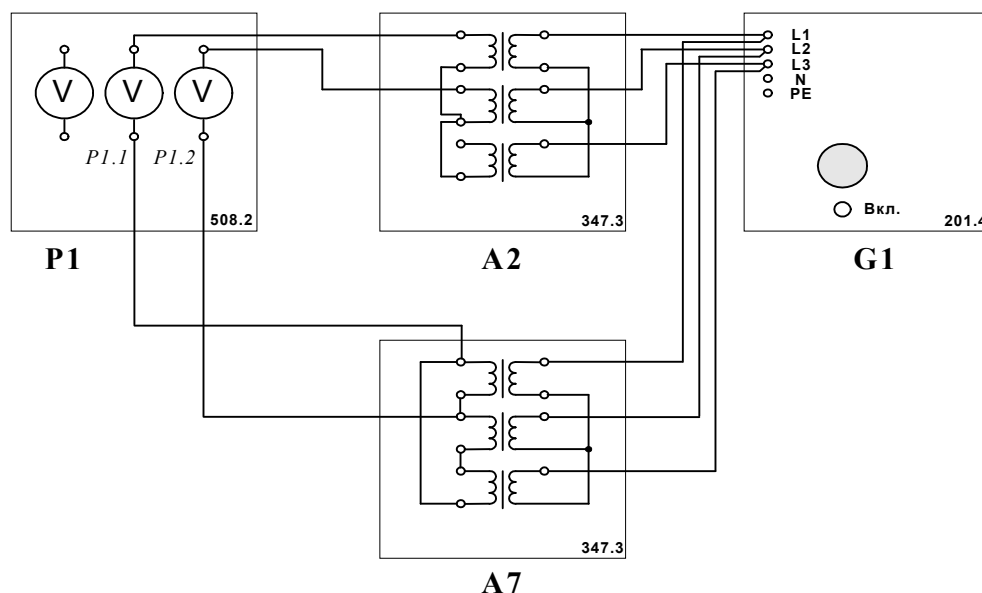


Рис. 1.15. Электрическая схема для определения уравнивающего тока при разных группах соединения обмоток: A2 и A7 — трехфазные трансформаторы обмотки которых соединены соответственно по схемам Y/Y и Y/Δ.

#### Указания по проведению эксперимента

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соедините гнезда защитного заземления « $\oplus$ » устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «PE» трехфазного источника питания G1.
3. Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
4. В трехфазных трансформаторных группах A2 и A7 переключателями установите желаемые номинальные вторичные напряжения трансформаторов, например, 133 и 230 В.
5. Включите источник G1.
6. Включите выключатель «СЕТЬ» блока мультиметров P1.
7. Активизируйте мультиметры блока P1, задействованные в эксперименте.
8. С помощью вольтметров P1.1 и P1.2 измерьте напряжения  $U_1$   $U_2$ .
9. Отключите источник G1.
10. Рассчитайте ожидаемую кратность уравнивающего тока  $I_Y$  (по отношению к номинальному току трансформаторов  $I_H$ ) при включении на параллельную работу испытуемых трехфазных трансформаторов с данными группами соединения обмоток по формуле

$$I_Y / I_H = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot 100 / (2 \cdot 230 \cdot U_K),$$

где  $U_K$  — напряжение короткого замыкания трансформаторов, %.

11. По ожидаемой величине кратности уравнивающего тока сделайте вывод о возможности или недопустимости параллельной работы трансформаторов с различными группами соединения обмоток.

## Лабораторная работа 1.5

### ВКЛЮЧЕНИЕ ТРАНСФОРМАТОРА В СЕТЬ (анализ броска тока намагничивания)

**Прочти это.** Из теории и практики эксплуатации трансформаторов известно, что при включении трансформаторов в сеть часто наблюдается значительный бросок тока, иногда значительно превышающий номинальное значение. И хотя этот бросок тока неопасен для трансформатора (он непродолжительный и не вызывает разрушающих усилий), он может вызвать ложное срабатывание защиты. Разберемся в причинах этого явления.

Рассмотрим процесс включения насыщенного трансформатора с разомкнутой вторичной обмоткой на синусоидальное напряжение сети  $u_1 = U_{1m} \sin(\omega t + \psi)$ . Здесь угол  $\psi$  определяет значение напряжения в момент включения трансформатора, при  $\psi = 0$  напряжение равно нулю, при  $\psi = \pi/2$  максимально.

Переходный процесс при включении трансформатора определяется уравнение баланса напряжений для первичной обмотки

$$U_{1m} \sin(\omega t + \psi) = i_1 r_1 + \frac{d\Psi_1}{dt} = i_1 r_1 + \frac{d(L_1 i_1)}{dt}. \quad (1.2)$$

Так как сердечник трансформатора насыщен, индуктивность его обмотки величина непостоянная  $L_1 = f(i_1)$ . Для аналитического решения уравнения (1.2) произведем замену переменной, вместо переменной  $i_1$  введем переменную  $\Phi$  через известные соотношения  $\Psi_1 = L_1 i_1 = \Phi w_1$ . Тогда исходное уравнение примет вид

$$\frac{U_{1m}}{w_1} \sin(\omega t + \psi) = \frac{r_1}{L_1} \Phi + \frac{d\Phi}{dt}. \quad (1.3)$$

Так как в трансформаторах  $r_1 \ll L_1$  можно принять  $L_1 = \text{const}$  и тогда уравнение (1.3) становится обыкновенным дифференциальным уравнением первого порядка решение которого хорошо известно, оно состоит из периодической  $\Phi_n$  и аperiodической  $\Phi_a$  составляющих

$$\Phi = \Phi_n + \Phi_a = -\Phi_m \cos(\omega t + \varphi) + \Phi_m \cos \psi \cdot e^{-r_1 t / L_1}, \quad (1.4)$$

где  $\varphi \cong \pi/2$ .

Последнее уравнение позволяет сделать вывод, что наиболее тяжелый случай включения трансформатора, когда напряжение сети проходит через ноль ( $\psi = 0$ ). Причина этого в том, что в трансформаторе возникает максимальный аperiodический поток, а через полпериода после включения магнитный поток в сердечнике возрастет до величины  $\Phi \approx 2\Phi_m$  (рис. 1.16 а). Практически 2х-кратное увеличение магнитного потока приводит к сильному насыщению стали и значительному броску намагничивающего тока (рис. 1.16 б). Во многих случаях бросок намагничивающего тока достигает значений (1,5—1,8) номинального тока трансформатора.

Если трансформатор включается в тот момент, когда напряжение сети проходит через максимум ( $\psi = \pi/2$ ), аperiodический поток не возникает и включение происходит без броска тока, то есть без переходного процесса.

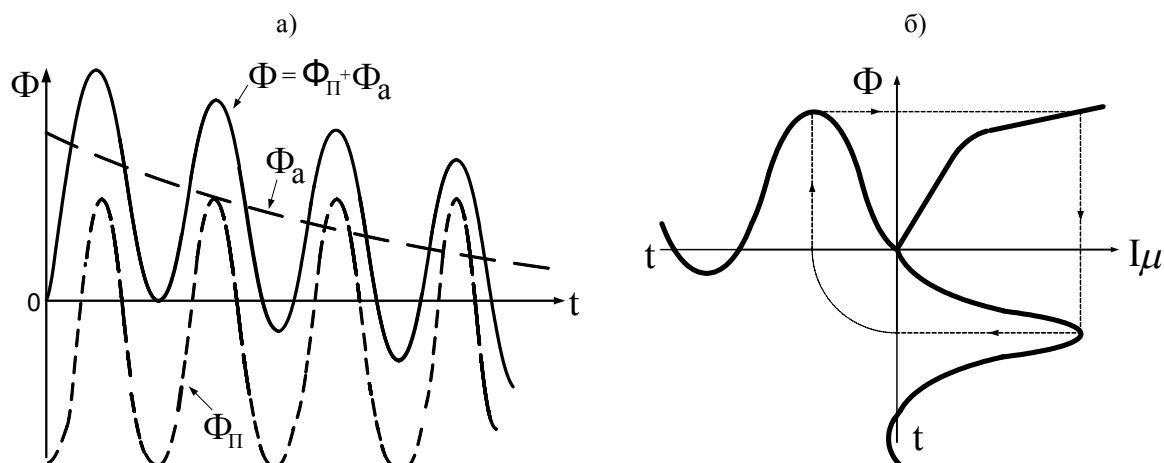


Рис. 1.16. Объяснение причины броска тока намагничивания при включении трансформатора:

- а) осциллограмма изменения магнитного потока при  $\Psi = 0$ ;  
 б) иллюстрация причины появления броска тока намагничивания

### Программа эксперимента

Эксперимент проводится на специализированном стенде с использованием следующего оборудования.

### Перечень аппаратуры

**G1** — источник синусоидального напряжения промышленной частоты;

**A2** — испытуемый трансформатор: выбирается один из трансформаторов трехфазной трансформаторной группы;

**A3** — блок измерительных трансформаторов;

**АСН0 — АСН8** — алоговый вход, через который измеряемое напряжение вводится в компьютер А5.

Обозначение на схеме	Наименование	Код (см. на стенде)
<b>G1</b>	Трехфазный источник питания	201.4
<b>A2</b>	Трехфазная трансформаторная группа	347.3
<b>A3</b>	Блок измерительных трансформаторов тока и напряжения	401.1
<b>A4</b>	Коннектор	330
<b>A5</b>	Персональный компьютер	550

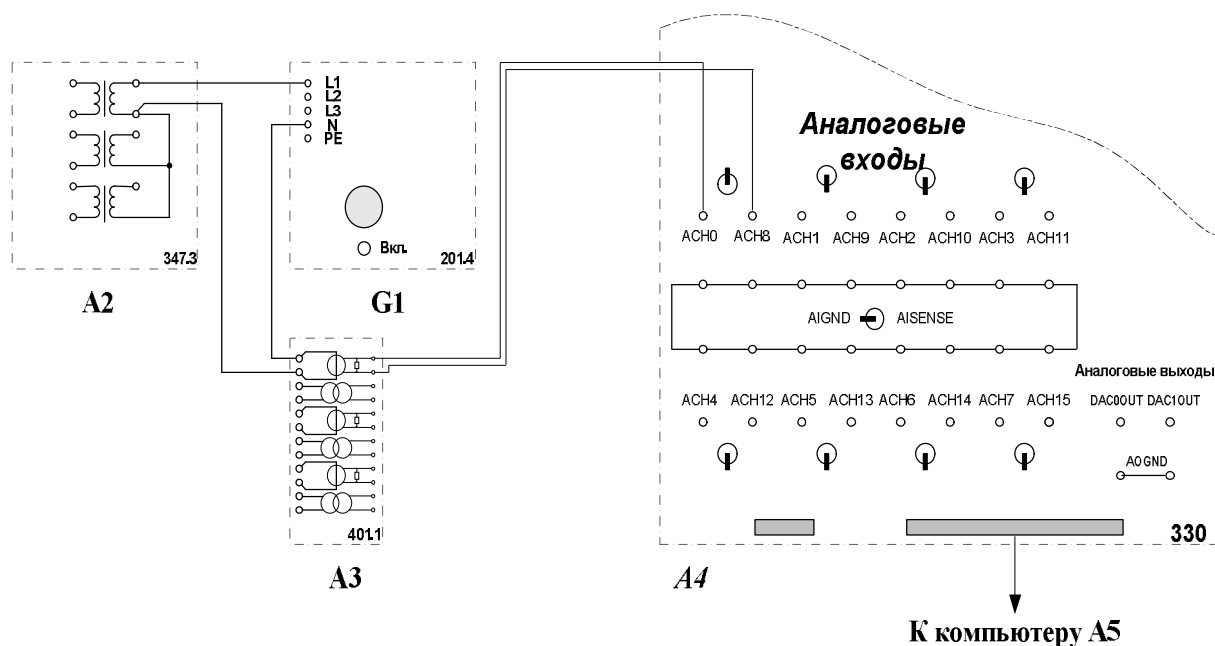


Рис. 1.17. Электрическая схема для регистрации намагничивающего тока при включении трансформатора

### Указания по проведению эксперимента

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соедините гнезда защитного заземления « $\oplus$ » устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «PE» трехфазного источника питания G1.
3. Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
4. Приведите в рабочее состояние персональный компьютер A5 и запустите программу «Многоканальный осциллограф». Настройте программу для запоминания, например, последних 5 секунд процесса.
5. Включите автоматические выключатели и устройство защитного отключения источника G1.
6. Включите ключ-выключатель источника G1.
7. Нажмите кнопку «ВКЛ» включения сканирования первого канала виртуального осциллографа.
8. Нажмите кнопку «ВКЛ» источника G1 и через 1—2 секунды после этого остановите сканирование данных программой «Многоканальный осциллограф» нажатием на виртуальную кнопку «Остановить».
9. Нажмите на кнопку-гриб источника G1.
10. Проанализируйте полученную временную зависимость тока включения однофазного трансформатора без нагрузки.



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ ПО РАЗДЕЛУ «ТРАНСФОРМАТОРЫ»

(\* отмечены задачи повышенной сложности)

### *Принцип действия и конструкция трансформатора*

- 1.1. Объясните принцип действия однофазного трансформатора, дайте определение «коэффициента трансформации».
- 1.2. Коэффициент трансформации определили при нескольких значениях напряжения  $U_1 = (0,1; 0,4; 1,0; 1,3; 1,4) U_{ном}$ , при этом магнитная система трансформатора в опыте насыщалась. Будет ли коэффициент трансформации постоянным?
- 1.3. Какую функцию выполняет магнитная система трансформатора, объясните необходимость шихтовки магнитопровода и принцип ее выполнения.
- 1.4. Какие материалы используются для изготовления магнитопроводов трансформаторов?
- 1.5. Нарисуйте схемы соединения обмоток трехфазного трансформатора — «Y — звезда», «Δ — треугольник», «Z — зигзаг».
- 1.6. Нарисуйте магнитопроводы трехфазных трансформаторов: трехстержневой, бронестержневой (пятистержневой), групповой, определите в них стержень и ярмо.
- 1.7. Коэффициент трансформации трехфазного трансформатора определили при схемах обмоток Y/Y и Y/Δ. Коэффициент трансформации будет одинаковый?
- 1.8. По конструктивно-технологическим признакам обмотки трансформаторов подразделяют на несколько типов? Дайте характеристику основных типов обмоток.
- 1.9. Какие материалы используются в трансформаторах в качестве проводниковых?
- 1.10. Какие изоляционные материалы используются в масляных трансформаторах? К какому классу нагревостойкости они относятся?
- 1.11. Дайте описание функций основных элементов конструкции силовых трансформаторов: бак, расширитель, газовое реле и т.д.
- 1.12. Какие виды охлаждения трансформаторов и их условные обозначения предусмотрены в настоящее время?

### *Группы соединений обмоток трансформаторов*

- 1.13. Дайте определение понятию «начала» и «концы» обмоток. В каком случае это понятие не применимо к обмоткам?
- 1.14. Что понимается под номером группы обмоток трехфазного трансформатора.
- 1.15. Укажите, какие из перечисленных групп соединений обмоток не могут существовать: Y/Δ — 5; Δ/Δ — 7; Y/Δ — 10; Δ/Δ — 0; Y/Δ — 0; Y/Y — 6.
- 1.16. Начертите схемы соединений обмоток трансформаторов, имеющих следующие группы: Δ/Δ — 4; Y/Y — 4; Y/Δ — 1; Δ/Y — 1; Y/Δ — 11.

### *Схема замещения и параметры трансформатора*

- 1.17. Нарисуйте T-образную схему замещения трансформатора и объясните физический смысл входящих в нее параметров.
- 1.18. Какие параметры схемы замещения трансформатора определяются в опыте холостого хода. Нарисуйте схему замещения для этого режима трансформатора.
- 1.19. Что называется током холостого хода и потерями холостого хода трансформатора?
- 1.20. Нарисуйте электрическую схему для проведения опыта ХХ на трехфазном трансформаторе Δ/Y. Напишите расчетные формулы для определения сопротивлений.

1.21. Какие параметры схемы замещения трансформатора определяются в опыте короткого замыкания. Нарисуйте схему замещения для этого режима трансформатора. Почему в этом режиме пренебрегают поперечным сопротивлением схемы замещения?

1.22. Нарисуйте электрическую схему для проведения опыта КЗ на трехфазном трансформаторе  $\Delta/Y$ . Напишите расчетные формулы для определения сопротивлений.

1.23. Опыты ХХ и КЗ провели для трансформатора находящегося в баке, затем эти же опыты повторили, вынув его из бака. Показания, каких опытов изменятся, если это возможно. Дайте физическую трактовку изменения результатов опытов.

1.24. Дайте определение параметру трансформатора «напряжение короткого замыкания —  $U_k$ ».

1.25. Какие конструктивные факторы трансформатора влияют на активную и реактивную составляющие  $U_k$ ?

1.26. В паспорте трансформатора указано  $U_k=5\%$ . Какую информацию о трансформаторе дает эта цифра?

1.27. Определение  $U_k$  провели со стороны высшего напряжения, а затем со стороны низшего напряжения. Будет ли  $U_k$  одинаково в именованных и в относительных единицах?

1.28. Зависят ли параметры схемы замещения трансформатора от схем соединения обмоток, например,  $Y/\Delta$  и  $\Delta/Y$ .

### ***Работа трансформатора под нагрузкой***

1.29. Нарисуйте векторную диаграмму трансформатора для активно-индуктивной нагрузки. Объясните взаимное положение векторов: магнитного потока в сердечнике —  $\Phi_c$  и электродвижущих сил  $E_1$  и  $E_2$  индуцируемых этим потоком в обмотках.

1.30. Нарисуйте внешние характеристики трансформатора при активной, индуктивной и емкостной нагрузках и объясните их отличие друг от друга.

1.31. Дайте определение эксплуатационной характеристике трансформатора «изменение напряжения».

1.32. Нарисуйте векторную диаграмму трансформатора для активно-емкостной нагрузки. Обратите внимание на изменение напряжения  $U_2$  и дайте анализ этому изменению.

1.33. Нарисуйте энергетические диаграммы активной и реактивной мощностей для активно-индуктивного режима трансформатора.

1.34. Почему трансформаторы оснащаются системами регулирования напряжения? Что такое регулирование типов ПБВ и РПН? В чем отличие между ними?

### ***Параллельная работа трансформаторов***

1.35. Перечислите условия включения трансформаторов на параллельную работу. Какие из них допускают отклонения, какие — нет и почему?

1.36. Нарушение каких условий вызывает уравнильный ток между трансформаторами.

1.37. \*Трансформаторы  $Y/\Delta-11$  и  $\Delta/Y-11$  имеют одинаковые коэффициенты трансформации, могут ли они работать в параллельном режиме?

1.38. Трансформаторы со схемами  $Y/Y-0$  и  $Y/Y-6$  с одинаковым напряжением короткого замыкания ( $U_k=5\%$ ) ошибочно собраны для параллельной работы. Определите уравнильный ток в этой схеме. Дайте оценку возможности эксплуатации этих трансформаторов.

1.39. На двухтрансформаторной подстанции устанавливают трансформаторы  $S_{ном1} = 250 \text{ MBt}$ ,  $U_k=5\%$  и  $S=160 \text{ MBt}$ ,  $U_k=11\%$ . Оцените этот проект по условиям параллельной работы.

## Раздел 2

### АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Начиная серию экспериментов с асинхронными машинами, читатель встретит много общего с теорией трансформаторов. И это действительно так, потому что теорию трансформатора можно получить из теории асинхронной машины (АМ) если последнюю рассматривать в режиме заторможенного ротора. И в практике этот режим находит широкое применение: асинхронные машины с заторможенным ротором изготавливаются на заводах и в роли такого своеобразного трансформатора широко используются в энергосистемах для регулирования величины напряжения и фазы в электрических сетях.

Но между трансформатором и асинхронной машиной существуют и значительные отличия. Физические процессы в асинхронной машине, конечно более сложные и многообразные, поскольку в ней имеется подвижный ротор и в магнитной цепи существует воздушный зазор. Кроме того магнитная цепь машины содержит сложные по форме зубцы и узкие магнитные перемычки. Поэтому в некоторых режимах работы происходит насыщение элементов магнитной цепи, что приводит к изменению параметров машины. Это усложняет расчет и анализ характеристик асинхронной машины и делает ее еще более отличной от трансформатора.

Наибольшее распространение в промышленности имеют асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором и с фазным ротором. На рис. 2.1 приведены схемы этих машины.

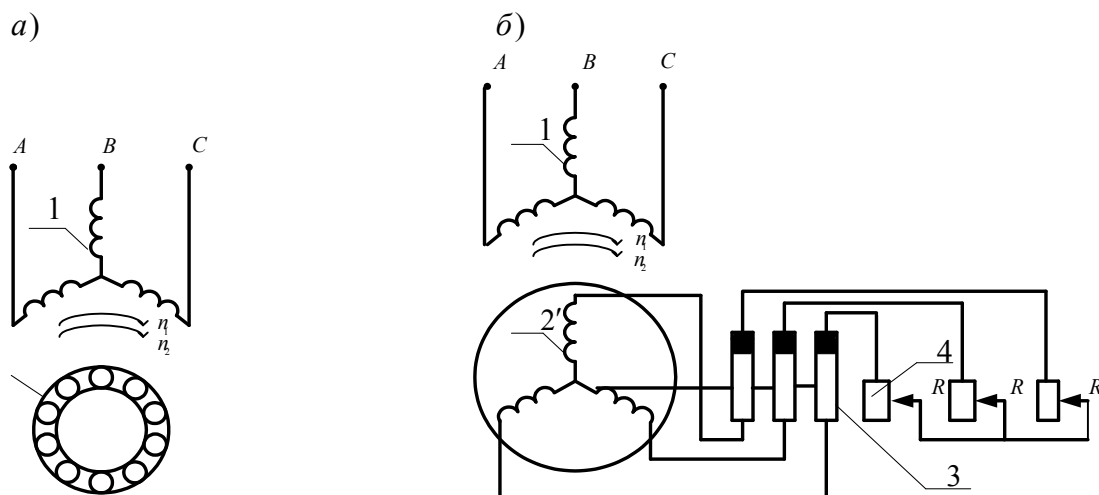


Рис. 2.1. Схемы асинхронной машины: а) с короткозамкнутым ротором; б) с фазным ротором: 1 — обмотки статора, 2 — ротор с короткозамкнутыми стержнями, 2' — обмотки фазного ротора, 3 — контактные кольца с щетками, 4 — активные сопротивления в цепи фазного ротора

#### Некоторые важные соотношения для асинхронного двигателя

**Скорость вращения и скольжение.** Из теории электрических машин известно, что многофазная обмотка с числом пар полюсов  $p$  создает магнитное поле, которое вращается со скоростью, *об/с*

$$n_1 = \frac{f_1}{p}, \quad (2.1)$$

где  $f_1$  — частота тока питающей сети, Гц. В асинхронной машине механизм передачи мощности со статора на ротор вызван скольжением поля статора относительно ротора. Когда поле статора движется относительно ротора (скользит), в роторе возникает ЭДС, ток и

электромагнитный момент, под действием которого ротор вращается со скоростью  $n$ . Относительная разность скоростей вращения поля  $n_1$  и ротора  $n$  называется скольжением

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}. \quad (2.2)$$

Машина получила свое название «асинхронная», потому, что поле статора и ротор вращаются с разными скоростями «асинхронно».

Но при этом отметим важный физический факт — в любом режиме машины поля статора и ротора вращаются синхронно, то есть неподвижны относительно друг друга. Иллюстрация этого дана на рис. 2.2. Действительно, поле статора движется относительно ротора со скоростью

$$\Delta n = n_1 - n,$$

и, применяя к скорости  $\Delta n$  формулу (2.1) получим частоту тока ротора

$$f_2 = (n_1 - n)p. \quad (2.3)$$

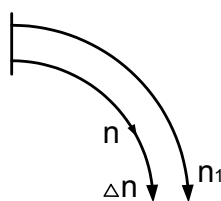


Рис. 2.2.

Но ток ротора частотой  $f_2$  создает собственное поле ротора, которое движется относительно него со скоростью  $n_1 - n$ , а так как сам ротор вращается со скоростью  $n$ , то получается, что поле ротора вращается со скоростью

$$n + \Delta n = n + n_1 - n = n_1.$$

Отсюда следует, что магнитные поля статора и ротора вращаются с одинаковой скоростью и создают в машине единое магнитное поле.

Из формул 2.1—2.3 также следует связь между частотами токов статора и ротора

$$f_2 = sf_1.$$

**Электрические потери в роторе.** Из теории асинхронных машин известно, что электрические потери в роторе пропорциональны скольжению

$$\Delta P_2 = sP_{эм} \approx sP_1. \quad (2.4)$$

где  $P_{эм}$  — электромагнитная мощность (это мощность поступающая на ротор посредством магнитного поля);  $P_1$  — потребляемая активная мощность двигателя. Из уравнения 2.4 следует, что для получения высокого КПД двигатель должен работать при малых скольжениях. Серийные машины нормального исполнения имеют рабочий диапазон скольжений  $s \leq 0,02—0,04$ .

**Схема замещения** — это математическая модель асинхронной машины, сопротивления которой моделируют мощности и потери в реальной машине. В расчетных и практических работах с асинхронными двигателями используется два вида схем замещения.  $\Gamma$ -образная схема используется для выполнения расчетных работ,  $T$ -образная схема замещения дает наглядное представление о физических процессах в машине.

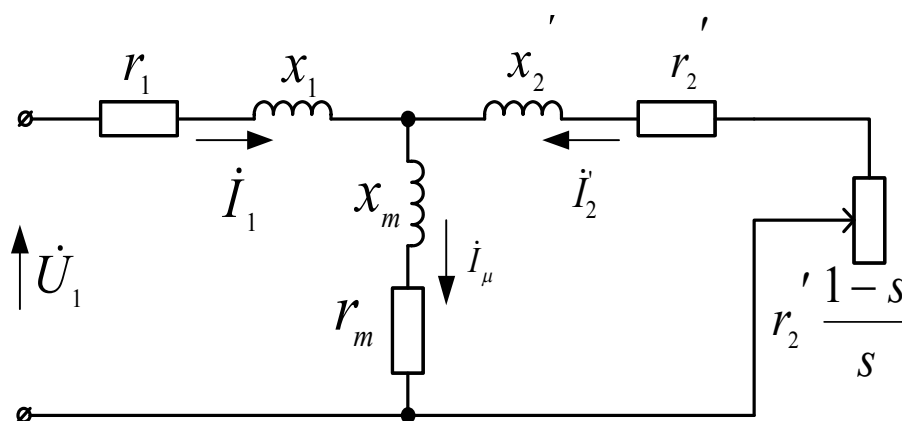


Рис. 2.3. Т-образная схема замещения асинхронной машины

Таблица 2.1

Сопротивление схемы	Наименование сопротивления	Физический смысл
$r_1$	активное сопротивление цепи статора	Учитывает тепловые потери в обмотке статора от тока статора и в магнитопроводе статора от потока рассеяния этой обмотки.
$r'_2$	приведенное активное сопротивление обмотки ротора	Учитывает тепловые потери в обмотке ротора от тока ротора и в магнитопроводе ротора от потока рассеяния этой обмотки.
$r'_2 \frac{1-s}{s}$	активное сопротивление	Учитывает механическую мощность на валу $P_2$ включая механические потери $\Delta P_{мех}$ .
$r_\mu, x_\mu$	активное и индуктивное сопротивления ветви на- магничивания	Учитывают тепловые потери в магнитопроводе статора и ротора и ЭДС в обмотках статора и ротора от главного магнитного потока.
$x_1$	индуктивное сопротивле- ние цепи статора	Учитывает ЭДС в обмотке статора, кото- рая создается полем рассеяния этой об- мотки.
$x'_2$	приведенное индуктивное сопротивление цепи ро- тора	Учитывает ЭДС в обмотке ротора, кото- рая создается полем рассеяния этой об- мотки.

## Лабораторная работа 2.1

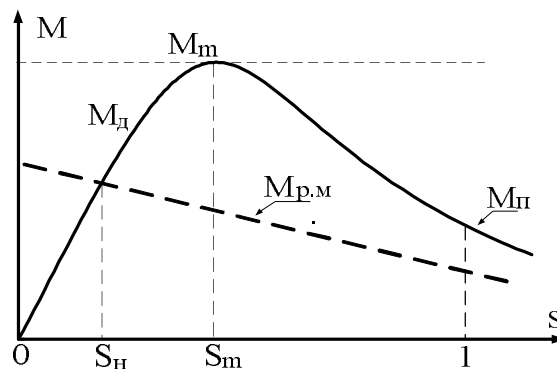
### МЕХАНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

**О свойствах механической характеристики асинхронных двигателей.** Асинхронный двигатель самый распространенный тип двигателя в промышленности и в быту. Этим он обязан простой и надежной конструкцией, неприхотливостью к условиям работы, значительным ресурсом работы. И, тем не менее, он имеет ряд недостатков определяемых в основном особенностями его механической характеристики. От ряда недостатков удастся избавиться с помощью фазной конструкции ротора, но это приводит к усложнению и удорожанию машины.

Уравнение механической характеристики асинхронного двигателя обычно получают из  $\Gamma$ -образной схемы замещения, и оно имеет вид

$$M = \frac{pmU^2 \frac{r_2'}{s}}{\omega_1 \left[ \left( r_1 + c \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + cx_2')^2 \right]}. \quad (2.5)$$

Здесь  $U$  — фазное напряжение обмотки статора;  $m$  — число фаз обмотки статора;  $\omega_1 = 2\pi f_1$  — угловая частота тока сети;  $c = 1 + Z_1 / Z_\mu$  — коэффициент преобразования  $T$ -образной схемы замещения в  $\Gamma$ -образную схему. В системе единиц СИ момент по формуле (2.5) выражается в ньютон-метрах.



**Рис. 2.4. Механическая характеристика асинхронного двигателя:**

$M_d$  — момент развиваемый двигателем;  $M_m$  — максимальный момент двигателя;  
 $M_{p.m}$  — момент сопротивления рабочего механизма;  $M_n$  — пусковой момент

Отметим основные эксплуатационные свойства механической характеристики двигателя:

1)  $0-M_m$  — рабочий участок характеристики: на этом участке двигатель работает с малыми скольжениями и поэтому имеет высокий КПД; обеспечивается устойчивая работа двигателя с рабочим механизмом;

2)  $s_{кр}$  — скольжение при котором достигается максимальный момент (в асинхронных двигателях нормального исполнения  $s_{кр} \approx 0,1-0,2$ )

$$s_{кр} = \frac{cr_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + cx_2')^2}}; \quad (2.6)$$

3)  $M_m$  — значение максимального момента двигателя

$$M_m = \frac{pmU^2}{2\omega_1 c \left[ r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + cx_2')^2} \right]}; \quad (2.7)$$

в асинхронных двигателях нормального исполнения кратность максимального момента  $k_m = M_m / M_n \approx 1,7 - 3,0$ .

4) Момент развиваемый двигателем пропорционален квадрату фазного напряжения на его зажимах — это серьезный недостаток асинхронных двигателей. Например, уменьшение напряжения сети до  $0,6U_n$  (уставка реле минимального напряжения) вызовет глубокое падение момента до величины  $0,36 M_n$ , что может привести к остановке рабочей установки.

5) Влияние активного сопротивления ротора —  $r_2$ . Изменение этого сопротивления значительно деформирует механическую характеристику двигателя, что иллюстрируется на рис. 2.5. Увеличение  $r_2$  приводит к следующим изменениям: увеличивается скольжение  $s_m$ , при котором достигается максимальный момент, что приводит к увеличению рабочего скольжения (точки пересечения характеристик двигателя  $M_d$  и рабочего механизма  $M_{p.m}$ ), к увеличению потерь в роторе и уменьшению КПД; увеличивается пусковой момент  $M_{n3} > M_{n2} > M_{n1}$  до тех пор пока  $s_m \leq 1$ , что улучшает эксплуатационные характеристики двигателя.

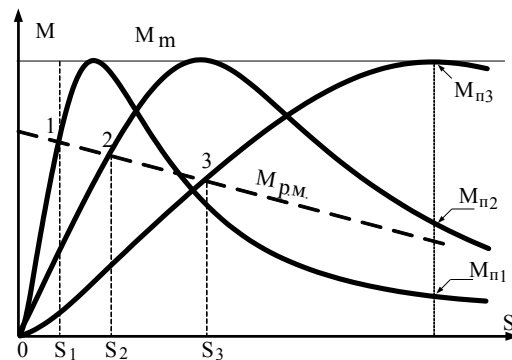


Рис. 2.5. Изменение механической характеристики асинхронного двигателя при изменении активного сопротивления ротора

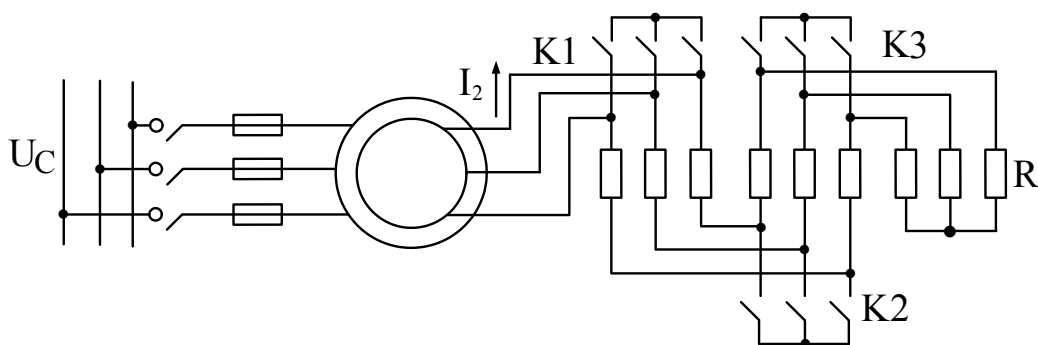
Таким образом, сопротивление ротора оказывает противоречивое влияние на эксплуатационные свойства двигателя, улучшение одних характеристик вызывает ухудшение других. Например, улучшение пусковой характеристики приводит к ухудшению рабочих характеристик и наоборот. В серийных машинах это противоречие разрешается двумя путями.

В двигателях с КЗ ротором используют эффект вытеснения тока в пазу ротора, для этого паз ротора делают глубоким, а в мощных двигателях двухклеточным. При пуске частота тока ротора высокая ( $f_2 = sf_1 = f_1$ ), ток вытесняется из паза в верхние слои, что обеспечивает большое активное сопротивление ротора, в рабочем режиме скольжение мало, ток практически полностью проникает в паз и сопротивление уменьшается до нормального значения.

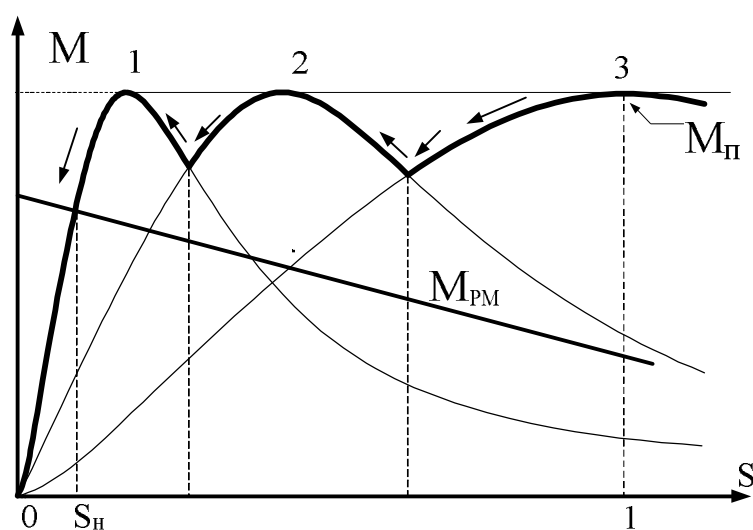
В двигателях с фазным ротором в цепь ротора вводится дополнительное внешнее сопротивление, значение которого может быть любым.

**Асинхронный двигатель с фазным ротором.** Эти двигатели используются относительно редко и только в тех случаях, когда двигатели с КЗ ротором неприемлемы по условиям пуска. Когда при пуске статический момент сопротивления на валу велик, пуск сопровождается недопустимо большим пусковым током и в короткозамкнутом роторе двигателя выделяется большое количества тепла. В двигателе с фазным ротором большая часть тепловых потерь выделяется во внешних сопротивлениях и при этом их величину можно подобрать так, что пуск будет произведен при токе лишь незначительно превышающий номинальный. На рис. 2.6 а показана схема двигателя с трехступенчатым пусковым сопротивлением ротора, а на рис. 2.6 б показан процесс мягкого пуска двигателя. При последовательном замыкании контакторов  $K1, K2, K3$  двигатель последовательно переходит на новые

механические характеристики 3, 2, 1 чем обеспечиваются благоприятные условия пуска. Моменты коммутации выключателей определяются посредством измерения частоты тока ротора  $I_2$ .



а)



б)

Рис. 2.6. Электрическая схема двигателя с фазным ротором (а) и механическая характеристика, иллюстрирующая его пуск (б):  
 $M_{р.м}$  — момент рабочего механизма

### Программа эксперимента

Эксперимент проводится на специализированном стенде с использованием следующего оборудования.

### Перечень аппаратуры

- G1** — источник синусоидального напряжения промышленной частоты.
- G4** — генератор постоянного тока с независимым возбуждением (является нагрузочной машиной);
- G2** — источник нерегулируемого напряжения для обмотки возбуждения генератора G4;
- (G5—P3)** — измеритель частоты вращения электромашинного агрегата (тахометр);
- M1** — испытуемый асинхронный двигатель (получает питание через выключатель A6 и трехфазную трансформаторную группу A2 от трехфазного источника питания G1);
- A9** — реостат (служит для вывода энергии скольжения при испытании двигателя M1 с фазным ротором);



**A10** — активное сопротивление (используется для нагрузки генератора G4);

**P1** — мультиметр блока (контролирует ток статорной обмотки испытуемого двигателя M1);

**P2** — измеритель активной мощности (используется для измерения активной мощности испытуемого двигателя M1).

Обозначение на схеме	Наименование	Код (см. на стенде)
<b>G1</b>	Трехфазный источник питания	201.4
<b>G2</b>	Источник питания двигателя постоянного тока	206.1
<b>G4</b>	Машина постоянного тока	101.2
<b>G5</b>	Преобразователь угловых перемещений	104
<b>M1</b>	Машина переменного тока	102.1
<b>A2</b>	Трехфазная трансформаторная группа	347.3
<b>A6</b>	Трехполюсный выключатель	301.1
<b>A9</b>	Реостат для цепи ротора машины переменного тока	307.2
<b>A10</b>	Активная нагрузка	306.1
<b>P1</b>	Блок мультиметров	508.2
<b>P2</b>	Измеритель мощностей	507.3
<b>P3</b>	Указатель частоты вращения	506.3

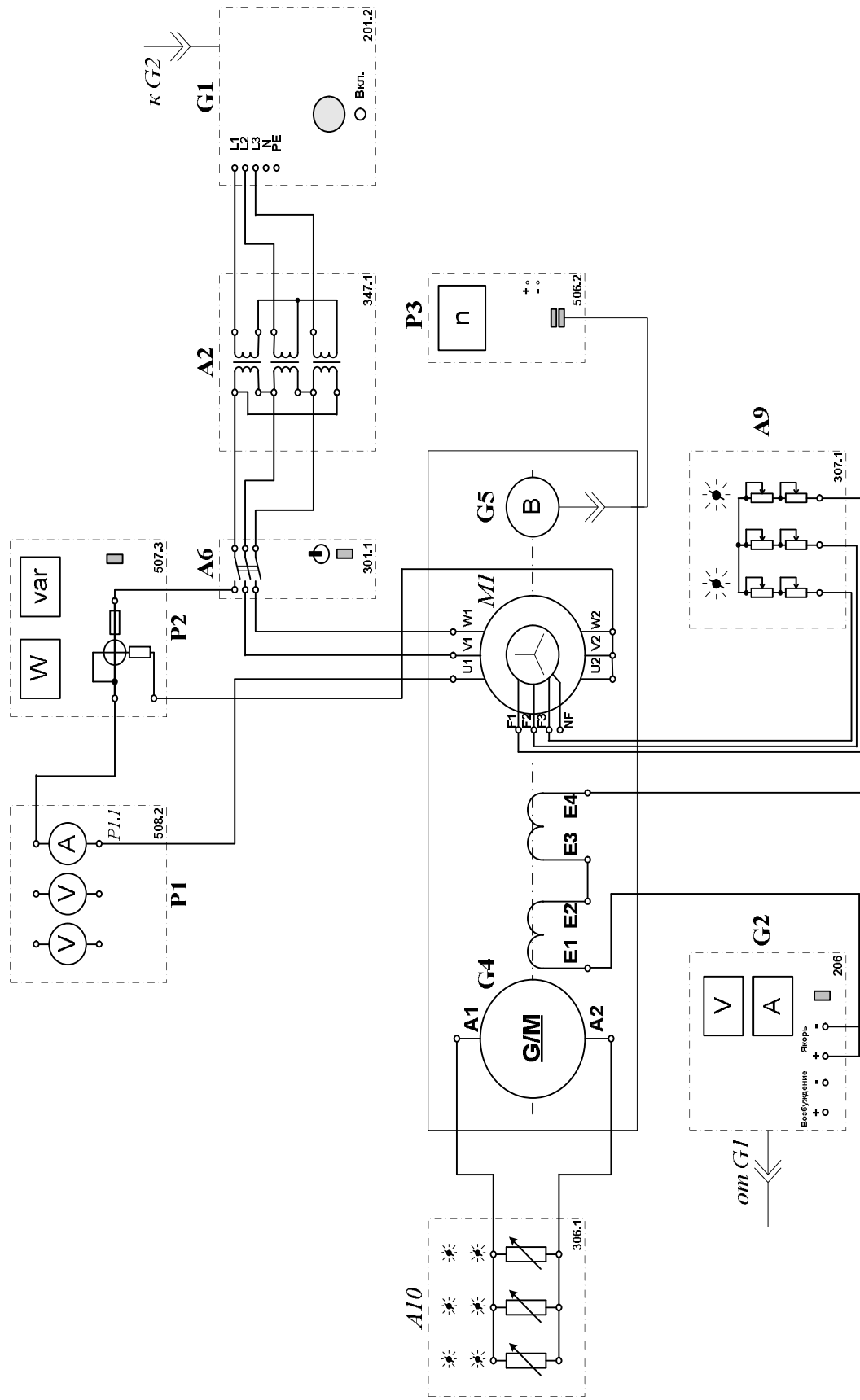


Рис. 2.7. Электрическая схема соединений для снятия механической характеристики асинхронного двигателя

### Указания по проведению эксперимента

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока (прилож. 1).
3. Соедините гнезда защитного заземления «⊕» устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» трехфазного источника питания G1.
4. Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
5. Переключатели режима работы источника G2 и выключателя А6 установите в положение «РУЧН.».
6. Регулировочные рукоятки реостата А9 поверните против часовой стрелки до упора (при снятии механической характеристики асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором).
7. Установите суммарное сопротивление каждой фазы реостата А9, например, 20 Ом (при снятии механической характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором).
8. Регулировочную рукоятку источника G2 поверните до упора против часовой стрелки, а регулировочные рукоятки активной нагрузки А10 — по часовой стрелке.
9. Установите переключателем в трехфазной трансформаторной группе А2 номинальные напряжения вторичных обмоток трансформаторов, например, 133 В.
10. Включите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.
11. Активизируйте мультиметры блока Р1, задействованные в эксперименте.
12. Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
13. Пустите двигатель М1 нажатием кнопки «ВКЛ» выключателя А6.
14. Нажмите кнопку «ВКЛ» источника G2.
15. Вращая регулировочную рукоятку источника G2, изменяйте ток  $I$  статорной обмотки двигателя М1 и заносите показания амперметра Р1.1 (ток  $I$ ), ваттметра измерителя мощностей Р2 (активная мощность  $P$  фазы двигателя М1) и указателя Р3 (частота вращения  $n$  двигателя М1) в таблицу 2.2.

Таблица 2.2

I, А									
P, Вт									
n, об/мин									

16. По завершении эксперимента отключите выключатель А6 и источник G1.
17. Выключите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.
18. Вычислите электромагнитный момент  $M$  двигателя М1 для каждого значения тока  $I$  из табл. 2.2 по формуле

$$M = \frac{3}{50\pi} (P - 21 \cdot I^2), \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (2.8)$$

и занесите его в таблицу 2.3

Таблица 2.3

M, Н·м									
n, мин <sup>-1</sup>									

19. Используя данные таблицы 2.3, постройте искомую механическую характеристику  $n = f(M)$  трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым / фазным ротором.

## Лабораторная работа 2.2

### ПУСК ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ (с короткозамкнутым и фазным ротором)

#### Программа эксперимента

Эксперимент проводится на специализированном стенде, в котором используется следующее оборудование:

**G1** — источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

**G4** — генератор постоянного тока с независимым возбуждением (является нагрузочной машиной);

**G2** — источник нерегулируемого напряжения для обмотки возбуждения генератора G4;

**(G5—P3)** — измеритель частоты вращения электромашиного агрегата;

**M1** — испытуемый асинхронный двигатель (получает питание через выключатель A6 и трехфазную трансформаторную группу A2 от трехфазного источника питания G1);

**A8** — выключатель (служит для закорачивания реактора A14 при реакторном пуске двигателя M1 с короткозамкнутым ротором либо — реостата A9 при двухступенчатом пуске двигателя M1 с фазным ротором);

**A9** — реостат (используется при испытании двигателя M1 с фазным ротором);

**A12** — датчики тока и напряжения преобразуют ток и напряжение статорной обмотки двигателя M1 в пропорциональные им нормированные напряжения (выполняют функции трансформатора тока и напряжения);

**АСН0-АСН8, АСН1-АСН9, АСН2-АСН10, АСН3-АСН11** — аналоговые входы коннектора A4 (через эти входы данные о токе, напряжении и частоте вращения испытуемого двигателя M1, вводятся в компьютер A5).

Обозначение на эл. схеме	Наименование	Код (см. на стенде)
G1	Трехфазный источник питания	201.4
G2	Источник питания двигателя постоянного тока	206.1
G4	Машина постоянного тока	101.2
G5	Преобразователь угловых перемещений	104
M1	Машина переменного тока	102.1
A2	Трехфазная трансформаторная группа	347.3
A4	Коннектор	330
A5	Персональный компьютер	550
A6, A8	Трехполюсный выключатель	301.1
A9	Реостат для цепи ротора машины M1	307.2
A10	Активная нагрузка	306.1
A12	Блок датчиков тока и напряжения	402.3
A14	Линейный реактор	314.2
P3	Указатель частоты вращения	506.2

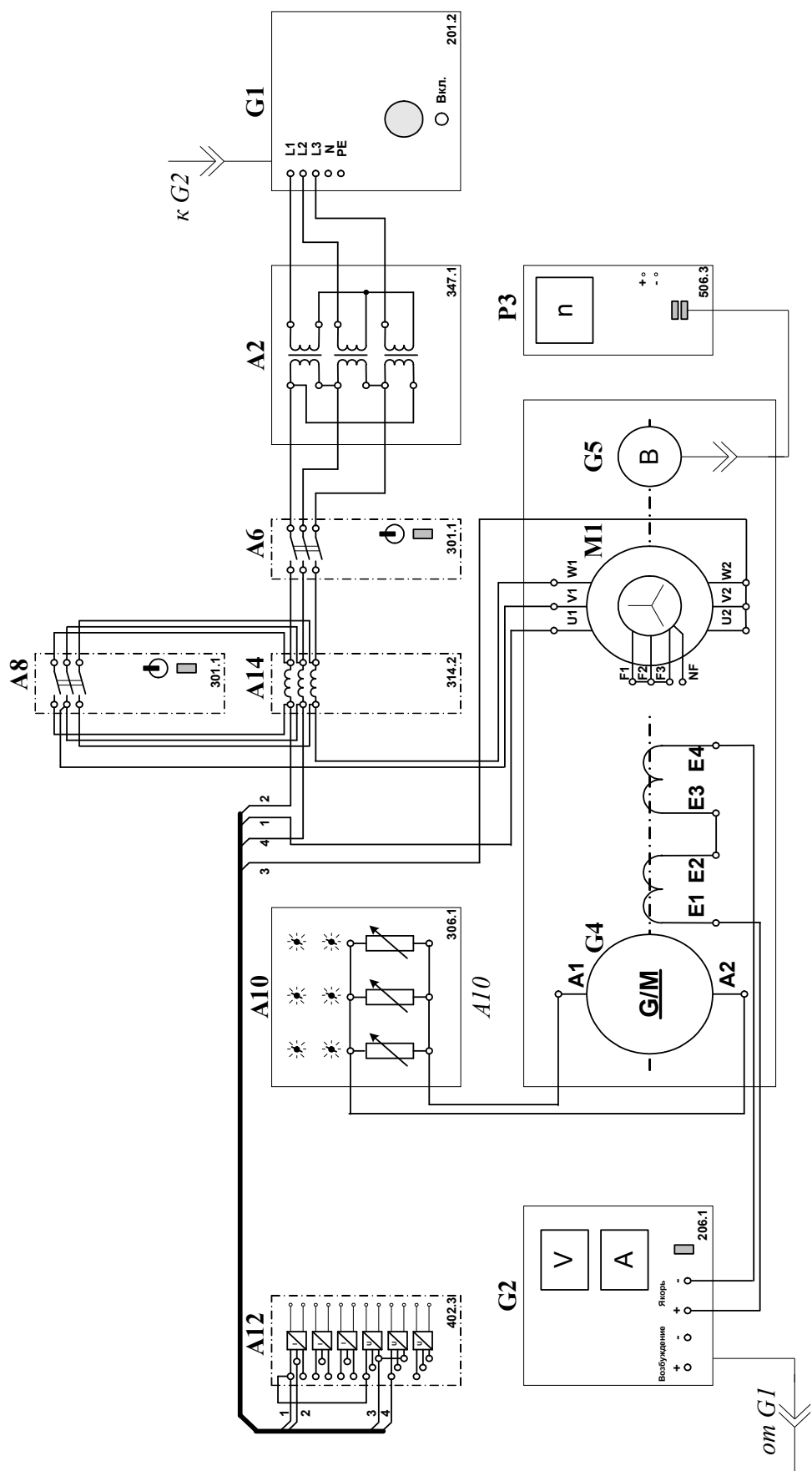


Рис. 2.9 а. Электрическая схема пуска двигателя с КЗ ротором



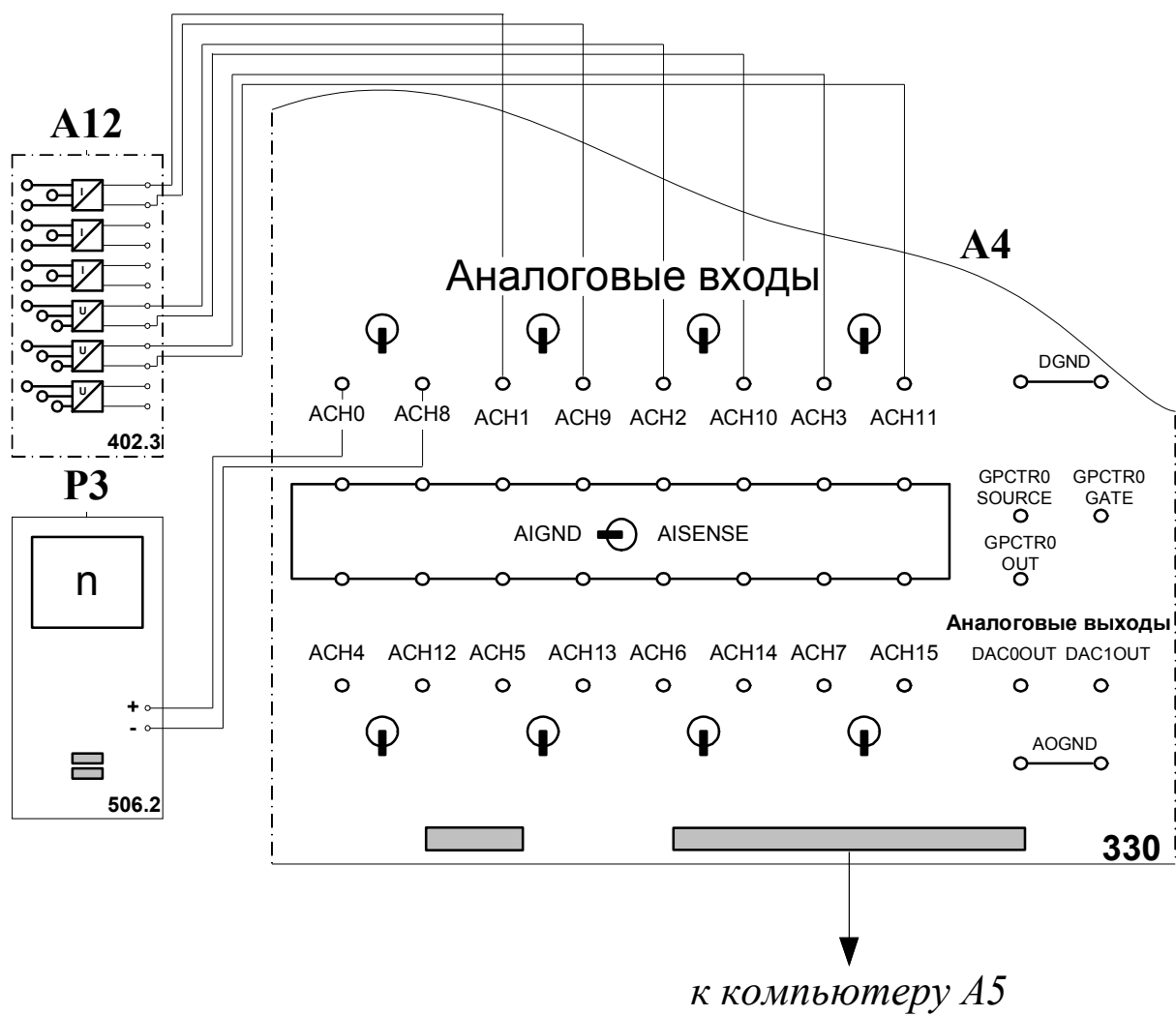



Рис. 2.9 в. Электрическая схема соединений (продолжение)

### Указания по проведению эксперимента

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока (прилож. 1).
3. Соедините гнезда защитного заземления «» устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» трехфазного источника питания G1.
4. Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений для пуска двигателя: 1) с *короткозамкнутым* ротором; 2) с *фазным* ротором.
5. Переключатели режима работы источника G2 и выключателей A6, A8 установите в положение «РУЧН.».
6. Установите в каждой фазе активной нагрузки A10 ее суммарную величину равную, например, 100%.
7. Установите в каждой фазе реостата A9 сопротивление, например, 18 Ом (*при пуске двигателя с фазным ротором*).
8. В трехфазной трансформаторной группе A2 переключателем установите желаемое номинальное вторичное напряжение трансформатора, например, 133 В.
9. Приведите в рабочее состояние персональный компьютер A5 и запустите прикладную программу «Регистратор режимных параметров машины переменного тока».
10. Включите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.
11. Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
12. Вращением рукоятки на передней панели источника G2 установите напряжение, например, 100 В на его регулируемом выходе «ЯКОРЬ».
13. Нажмите на виртуальную кнопку «Запустить» на экране компьютера.
14. Нажмите последовательно кнопки «ВКЛ» источника G2, выключателя A6 и спустя, например, 2 с выключателя A8 и затем не позднее, чем через 10 с, остановите сканирование данных регистратором нажатием на виртуальную кнопку «Остановить». В результате должен осуществиться двухступенчатый пуск асинхронного двигателя M1 и должны записаться в компьютер данные о режимных параметрах на интервале пуска.
15. Остановите запись процессов, нажав на виртуальную кнопку «Остановить».
16. Нажмите кнопку «ОТКЛ» источника G1.
17. Отключите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.
18. Используя возможности программы «Регистратор режимных параметров машины переменного тока», проанализируйте отображенные на мониторе компьютера механическую характеристику и временные зависимости тока статорной обмотки, электромагнитного момента, частоты вращения асинхронного двигателя при пуске его в ход.



## Лабораторная работа 2.3

### ОПЫТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

**Основные определения.** Асинхронные двигатели выпускаются унифицированными сериями, например, двигатели общепромышленного применения, с повышенным пусковым моментом, многоскоростные, малощумные, для текстильной промышленности, рудничные, тропического исполнения и т.д. Каждая серия предусматривает свой набор требований к эксплуатационным характеристикам двигателя. Наиболее массовым является двигатель общепромышленного (нормального) исполнения основные характеристики и номинальные параметры, представлены ниже.

1. *Рабочие характеристики* (рис. 2.11) — снимаются при номинальных значениях напряжения и частоте сети и представляют зависимости

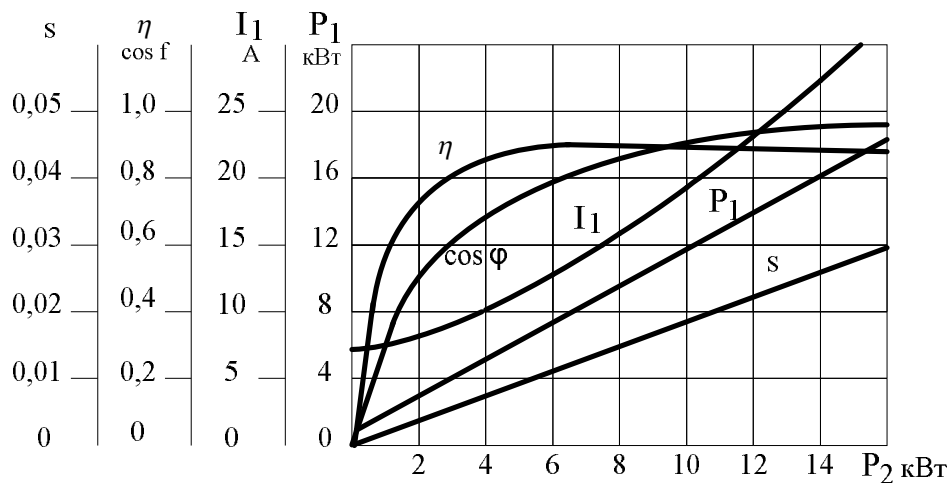
$$P_1, I_1, M_2, \cos \varphi_1, s, n = f(P_2), \quad (2.9)$$

где  $P_1$  — потребляемая активная мощность,  $I_1$  — потребляемый ток статора,  $M_2$  — момент на валу,  $\cos \varphi_1$  — коэффициент мощности,  $s$  — скольжение,  $n$  — коэффициент полезного действия.

2. *Кратность максимального момента*  $k_m = M_m/M_n$  определяет перегрузочную способность двигателя и должна быть не менее  $k_m > 1,7—2,2$ .

3. *Кратность пускового момента*  $k_n = M_n / M_n$  должна быть не менее  $k_n > 0,7—1,8$ . Меньшие значения относятся к двигателям большей мощности.

4. *Кратность пускового тока*  $k_i = I_n / I_n$  должна быть не менее  $k_i > 1,7—2,2$ .



**Рис. 2.11. Рабочие характеристики асинхронного двигателя  
с номинальной мощностью  $P_n=15$  кВт.**

Все эксплуатационные характеристики асинхронного двигателя можно получить тремя способами:

1) если известны параметры схемы замещения двигателя характеристики рассчитываются по формулам, приведенным в специальной литературе, например, [1, 2, 7];

2) характеристики получают экспериментально методом непосредственной нагрузки двигателя;

3) по данным круговой диаграммы, которая строится на основе опытов холостого хода и короткого замыкания.

Опыты холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ) — являются базовыми экспериментами при определении эксплуатационных характеристик асинхронного двигателя. Но в отличие от трансформатора по характеристикам ХХ и КЗ асинхронного двигателя непосредственно определить сопротивления схемы замещения невозможно. Причин для этого две: 1) наличие воздушного зазора в двигателе вызывает большой ток намагничивания  $(0,2—0,4)I_n$  в отличие от трансформатора  $(0,008—0,01)I_n$ ; 2) невозможность экспериментально получить идеальный режим холостого хода, так как при отсутствии нагрузки на валу двигателя в нем присутствуют собственные механические потери, в результате чего в опыте холостого хода существует небольшое скольжение  $s \neq 0$ .

Поэтому сопротивления схемы замещения рассчитываются при проектировании машины, а по опытам ХХ и КЗ строится круговая диаграмма, из которой определяются эксплуатационные характеристики и параметры асинхронной машины (токи, моменты, мощности, КПД, скольжение и т.д.).

Теоретическое обоснование круговой диаграммы и принципы ее построения описаны в учебной литературе, а точное построение диаграммы с учетом эффектов вытеснения тока в роторе и насыщения зубцовых зон изложены в нормативных документах. Круговые диаграммы используются при промышленных испытаниях и приемке машин.

**Опыт холостого хода** производится при работе двигателя без нагрузки на валу, при различных значениях напряжения на обмотке статора.

В опыте измеряются:  $P_0$  — активная мощность;  $U_0, I_0$  — фазные значения напряжения и тока. По этим данным рассчитывается

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{m U_0 I_0}$$

и строятся характеристики ХХ двигателя

$$I_0 = f(U_0), P_0 = f(U_0), \cos \varphi_0 = f(U_0).$$

Из-за потерь в двигателе при реальном холостом ходе  $s \neq 0$ . Поэтому при построении круговой диаграммы потери холостого хода разделяют по составляющим на магнитные ( $p_{mg}$ ) и механические ( $p_{mex}$ ):

1) определяется сумма потерь для нескольких значений напряжения  $U_0$

$$p_{mg} + p_{mex} = P_0 - m I_0^2 r_1; \quad (2.10)$$

2) строится график  $p_{mg} + p_{mex} = f(U_0^2)$ , это должна быть прямая линия (рис. 2.12) потому что величина  $p_{mg}$  пропорциональна  $U^2$ , а  $p_{mex} = const$  так как в опыте холостого хода  $n \approx const$ ;

3) продолжая прямую до пересечения с осью ординат, находят  $p_{mg}$  и  $p_{mex}$ .

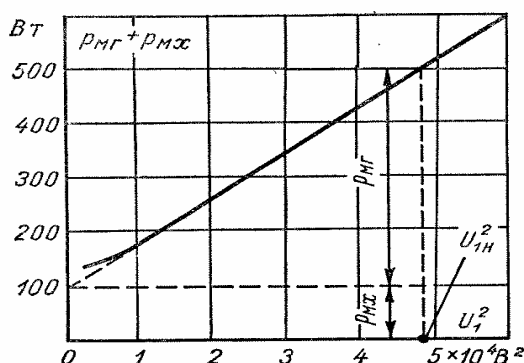


Рис. 2.12. Разделение потерь в асинхронном двигателе

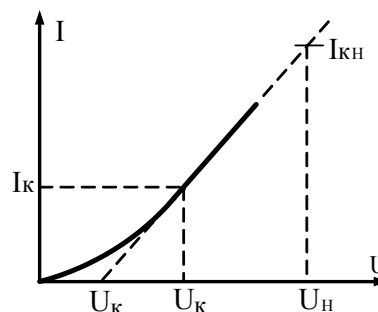


Рис. 2.13. Характеристика КЗ асинхронного двигателя

**Опыт короткого замыкания** производится при заторможенном роторе, для чего вал ротора надлежащим образом закрепляется. Опыт проводится при пониженном напряжении, таком, чтобы ток статора не превышал значение  $I_n$ . (1,0—1,2). В опыте измеряются:  $P_k$  — активная мощность короткого замыкания;  $U_k$ ,  $I_k$  — фазные значения напряжения и тока.

Для определения пускового момента и пускового тока строится характеристика  $I_k = f(U_k)$ . Если эта характеристика будет нелинейной, то проводится прямая, касательная к верхнему участку снятой характеристики (рис. 2.13). Из опыта КЗ рассчитываются ток и мощность двигателя в режиме короткого замыкания при номинальном напряжении на его вводах

$$I_{k,n} = I_k \frac{U_n}{U_k}, \quad P_{k,n} = P_k \left( \frac{U_n}{U_k} \right)^2.$$

Пусковые значения тока и момента определяются по формулам

$$I_n = \frac{U_n - U'_k}{U_k - U'_k} I_k, \quad M_n = \left( \frac{I_{k,n}}{I_k} \right)^2 M_k.$$

где  $M_k$  — измеренное или рассчитанное значение момента при токе  $I_k$ .

### Программа опытов XX и КЗ

Эксперименты проводятся на специализированном стенде с использованием следующего оборудования.

#### Перечень аппаратуры

**G1** — источник синусоидального напряжения промышленной частоты;

**G5** — преобразователь угловых перемещений;

**M1** — испытуемый асинхронный двигатель: получает питание через выключатель A6 и трехфазные трансформаторные группы A2, A7 от трехфазного источника питания G1;

**A14** — линейный реактор: служит для дополнительного понижения напряжения, подводимого к испытуемому двигателю M1;

**P1** — блок мультиметров: измеряет ток статорной обмотки и линейное напряжение испытуемого двигателя M1;

**P2** — измеритель активной и реактивной мощности, потребляемой одной фазой испытуемого двигателя M1.

Обозначение на эл. схеме	Наименование	Код (см. на стенде)
G1	Трехфазный источник питания	201.2
G5	Преобразователь угловых перемещений	104
M1	Машина переменного тока	102.1
M2	Машина постоянного тока	101.2
A2, A7	Трехфазная трансформаторная группа	347.1
A6	Трехполюсный выключатель	301.1
A14	Линейный реактор	314.2
P1	Блок мультиметров	508.2
P2	Измеритель мощностей	507.2
P3	Указатель частоты вращения	506.2

**Снятие и определение характеристик холостого хода  
трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором**  
 **$I_0 = f(U_0)$ ,  $P_0 = f(U_0)$ ,  $\cos\varphi_0 = f(U_0)$**



## Указания по проведению эксперимента


1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока (прилож.1).
3. Соедините гнезда защитного заземления «» устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» трехфазного источника питания G1.
4. Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
5. Переключатели режима работы выключателей А6 и А8 установите в положение «РУЧН.».
6. В трехфазных трансформаторных группах А2 и А7 установите номинальные вторичные напряжения трансформаторов 133 В.
7. Включите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.
8. Активизируйте мультиметры блока Р1, задействованные в эксперименте.
9. Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
10. Пустите двигатель М1 нажатием кнопки «ВКЛ» выключателя А6.
11. Меняя положение регулировочных рукояток трехфазных трансформаторных групп А2 и А7, варьируйте подводимое к двигателю М1 линейное напряжение  $U$  в диапазоне 100...250 В и заносите показания вольтметра Р1.1 (напряжение  $U$ ), амперметра Р1.2 (фазный ток  $I_0$  двигателя М1), а также ваттметра и варметра измерителя Р2 (активная  $P_{0\Phi}$  и реактивная  $Q_{0\Phi}$  мощности, потребляемые одной фазой двигателя М1) в таблицу 2.4.

Таблица 2.4

$U_0$ , В										
$I_0$ , А										
$P_{0\Phi}$ , Вт										
$Q_{0\Phi}$ , Вт										

12. Отключите источник G1.
13. Отключите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.
14. Используя данные таблицы 2.4, вычислите соответствующие напряжению  $U$  полные активную  $P_0$  и реактивную  $Q_0$  мощности, потребляемые двигателем М1, по формулам:

$$P_0 = 3 \cdot P_{0\Phi}, Q_0 = 3 \cdot Q_{0\Phi}$$

и занесите их в таблицу 2.5.

Таблица 2.5

$U$ , В										
$P_0$ , Вт										
$Q_0$ , Вт										

15. Используя данные таблицы 2.5, вычислите соответствующие напряжению  $U$  значения коэффициента мощности по формуле

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{P_0^2 + Q_0^2}},$$

и занесите полученные результаты в таблицу 2.6.

*Таблица 2.6*

U, В										
cosφ <sub>0</sub>										

16. При необходимости большей вариативности значений напряжения  $U$ , повторите эксперимент при закороченном линейном реакторе А14.

## Эксперимент 2

Снятие и определение характеристик короткого замыкания  
трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором  
 $I_K = f(U)$ ,  $P_K = f(U)$ ,  $Z_K = f(U)$

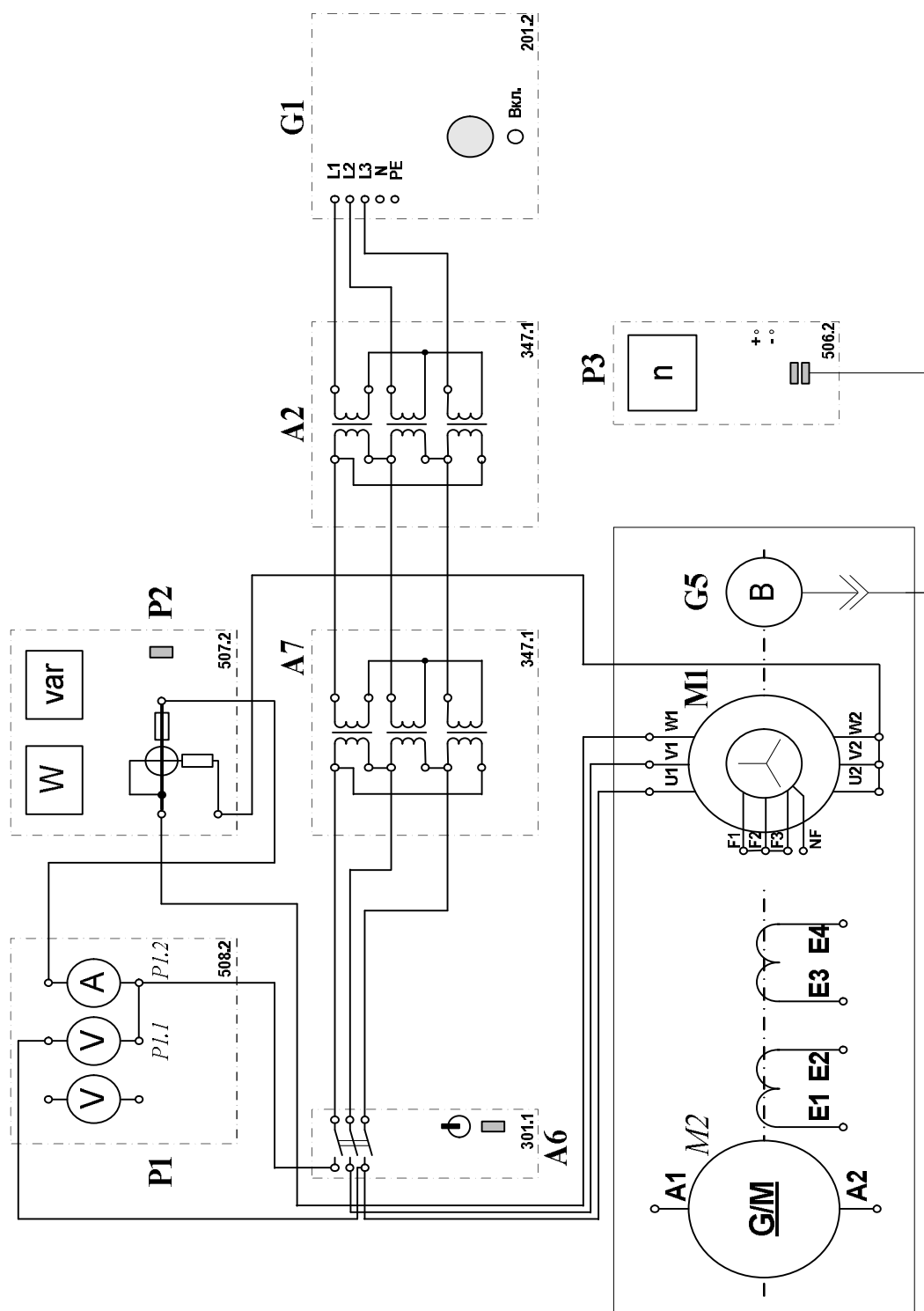


Рис. 2.15. Электрическая схема соединений для опыта К3 асинхронного двигателя

### Указания по проведению эксперимента КЗ


1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Снимите кожух, закрывающий муфту, соединяющую вал машины постоянного тока М2 с валом двигателя М1, и закрепите на ней стопорное устройство.
3. Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока (прилож.1).
4. Соедините гнезда защитного заземления «» устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» трехфазного источника питания G1.
5. Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
6. Переключатели режима работы источника G2 и выключателя А6 установите в положение «РУЧН.».
7. В трехфазных трансформаторных группах А2 и А7 переключателем установите номинальные вторичные напряжения трансформаторов 242 В.
8. Включите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.
9. Активизируйте мультиметры блока Р1, задействованные в эксперименте.
10. Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
11. Нажатием кнопки «ВКЛ» выключателя А6 подключите двигатель М1 к электрической сети.
12. Быстро (менее чем за 10 с) считайте и занесите в таблицу 2.7 показания вольтметра Р1.1 (линейное напряжение  $U$  двигателя М1), амперметра Р1.2 (ток  $I_K$  статорной обмотки двигателя М1), а также ваттметра измерителя Р2 (активная  $P_{K\phi}$  мощность, потребляемая одной фазой двигателя М1) и сразу после этого нажатием кнопки «ОТКЛ» выключателя А6 отключите двигатель М1 от электрической сети.
13. Повторите необходимое количество раз процедуру подключения двигателя М1 к электрической сети, считывания показаний измерительных приборов и отключения двигателя М1 от электрической сети при различных более низких номинальных вторичных напряжениях трансформаторов групп А2 и А7.

Таблица 2.7

$U_K, В$										
$I_K, А$										
$P_{K\phi}, Вт$										

14. Отключите источник G1.
15. Отключите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.
16. При необходимости большей вариативности значений линейного напряжения повторите эксперимент с соединением вторичных обмоток трансформаторов группы А7 по схеме «звезда».
17. Используя данные таблицы 2.7, вычислите соответствующие напряжению  $U$  значения полной активной мощности  $P_K$ , потребляемой двигателем М1, и полного его сопротивления короткого замыкания  $Z_K$  по формулам

$$P_K = 3P_{K\phi},$$

$$Z_K = U_K / I_K.$$



Полученные результаты занесите в таблицу 2.8.

Таблица 2.8

$U_K, В$									
$P_K, Вт$									
$Z_K, Ом$									

18. Используя данные таблиц 2.7 и 2.8 постройте искомые характеристики короткого замыкания  $I_K = f(U_K)$ ,  $P_K = f(U_K)$ ,  $Z_K = f(U_K)$  трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ ПО РАЗДЕЛУ «АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ»

(\* отмечены задачи повышенной сложности)

### *Вращающееся магнитное поле и его свойства*

- 2.1. Перечислите условия необходимые для создания вращающегося магнитного поля.
- 2.2. Чем определяется скорость вращения магнитного поля.
- 2.3. Покажите расположение фазных зон на статоре АД для трехфазной обмотки с числом пар полюсов  $p = 1$  и  $p = 2$ .
- 2.4. Докажите, что при переключении любых двух фаз трехфазной обмотки изменяется направление вращения магнитного поля.
- 2.5. Объясните, почему при обрыве одной фазы обмотки статора, включенной в звезду, вращающееся магнитное поле, не возникает, но существует при соединении обмотки в треугольник (схема открытого треугольника).
- 2.6. Определите число пар полюсов трехфазного и двухфазного асинхронного двигателя, если скорость вращения магнитного поля в обоих случаях одинакова — 750 об/мин.
- 2.7. Известно, что однофазная обмотка создает неподвижное пульсирующее магнитное поле с амплитудой  $\Phi_{\max}$ . Покажите, что это поле можно представить суммой двух полей с амплитудой  $\Phi_{\max}/2$  вращающихся в противоположных направлениях. Определите скорость вращения этих полей.

### *Конструкция и принцип действия асинхронного двигателя*

- 2.8. Объясните принцип действия асинхронного двигателя, почему эта машина называется «асинхронной».
- 2.9. Почему ротор асинхронного двигателя не может вращаться с частотой вращения магнитного поля?
- 2.10. Что такое скольжение асинхронной машины?
- 2.11. Как зависит частота тока ротора от скольжения?
- 2.12. Определите номинальное скольжение и число пар полюсов АД при  $n_{\text{ном}} = 1455$  об/мин.
- 2.13. Объясните устройство АД с короткозамкнутым ротором?
- 2.14. Нарисуйте контур главного магнитного поля в асинхронном двигателе с числом пар полюсов  $p = 1$ ;  $p = 2$ .
- 2.15. \*Ток ротора создает вращающееся магнитное поле? Если это так ответьте на следующие вопросы:
  - в каком направлении вращается поле ротора и зависит ли направление вращения от режима работы машины;
  - с какой скоростью поле ротора вращается относительно ротора и зависит ли она от скорости вращения ротора;
  - с какой скоростью поле ротора вращается относительно статора.
- 2.16. Объясните необходимость шихтовки магнитной системы АД и принцип ее выполнения.

### *Параметры АД и элементы теории*

- 2.17. Двигатель потребляет из сети активную мощность  $P_1$  и выдает с вала мощность  $P_2$ . Какая из этих мощностей указывается в паспорте в качестве номинальной мощности —  $P_n$ ?
- 2.18. Из теории АД известно, что при постоянном фазном напряжении магнитный поток в машине остается практически постоянным при всех режимах работы машины. Это называется «саморегулирование магнитного потока». Объясните это свойство.

2.19. В паспорте двигателя указано номинальное напряжение 220/380 В. Как понимать эту запись?

2.20. Асинхронный двигатель имеет следующие паспортные данные:  $P_H = 22$  кВт;  $U_H$  220/380 В;  $\eta_H = 0,88$ ;  $\cos\varphi_H = 0,91$ . Определить номинальный ток статора при  $U_H = 220$  В и при  $U_H = 380$  В.

2.21. \*Покажите:

а) что под действием вращающегося магнитного поля на ротор АД действует электромагнитная сила в направлении вращения поля;

б) определите какая из составляющих тока ротора (активная или индуктивная) участвует в создании этой силы.

**Примечание.** Для решения этой задачи достаточно использовать правила правой и левой руки.

2.22. Перечислите возможные режимы работы асинхронной машины. Определите диапазон изменения скольжения для каждого режима.

### **Схема замещения асинхронной машины (АМ)**

2.23. Дайте физическое толкование сопротивлениям  $T$ -образной схемы замещения АМ.

2.24. В схеме замещения в качестве эквивалента механической мощности выступает активное сопротивление? Может ли эту функцию выполнять индуктивное сопротивление?

2.25. У трансформатора и АМ много общего, например, оба устройства потребляют намагничивающий ток. Однако у АМ этот ток значительно больше, чем у трансформатора. Почему?

(У силовых трансформаторов намагничивающий ток  $(0,08—0,1) I_H$ , у асинхронных двигателей  $(0,3—0,5) I_H$ .)

2.26. Какие преимущества дает  $T$ -образная схема замещения перед  $T$ -образной схемой?

2.27. По каким экспериментальным данным строят круговую диаграмму асинхронного двигателя?

2.28. Нарисуйте электрическую схему для проведения опыта холостого хода трехфазного АД. Обоснуйте использование измерительных приборов в схеме.

2.29. Нарисуйте характеристики XX асинхронного двигателя  $P_0$ ,  $I_0$ ,  $\cos\varphi_0 = f(U_1)$ .

2.30. Нарисуйте электрическую схему для проведения опыта короткого замыкания трехфазного АД. Обоснуйте использование измерительных приборов в схеме.

2.31. Нарисуйте диаграммы для асинхронной машины, работающей в режиме двигателя:

- энергетические диаграммы активной и реактивной мощности;
- векторную диаграмму.

2.33. \*Нарисуйте диаграммы для асинхронной машины, работающей в режиме противовключения:

- энергетические диаграммы активной и реактивной мощности;
- векторную диаграмму.

### **Механическая характеристика АД и его пуск**

2.34. Какие параметры асинхронного двигателя определяют его максимальный момент и критическое скольжение?

2.35. Определите номинальный момент на валу АД со следующими данными:  $P_H = 250$  кВт;  $p = 1$ ;  $s_H = 2\%$ .

2.36. Асинхронный двигатель  $U_H = 380/660$  В;  $n_H = 2970$  об/мин несет номинальную нагрузку  $P_H = 160$  кВт и переключен с напряжения 380 В на сеть с напряжением 660 В. Покажите какие изменения в схеме двигателя необходимы при переходе на другое напряжение сети и определите возможные изменения режимных параметров:  $M$ ,  $I$ ,  $n$ .

2.37. Объясните причину уменьшения пускового тока асинхронного двигателя по мере разгона ротора?

2.38. Нарисуйте характеристики асинхронного двигателя  $M, I = f(s)$ . Укажите на механической характеристике характерные точки и участки.

2.39. Как известно из электротехники, электромагнитный момент пропорционален произведению магнитного потока и тока, ( $M \approx \Phi \cdot I$ ). Тогда объясните, почему в АД при скольжениях  $s_{кр} \leq s \leq 1$  с уменьшением тока момент все таки растет?

2.40. Назовите способы пуска асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. В чем заключается проблема пуска этих двигателей?

2.41. Основным средством улучшения пусковых характеристик АД с короткозамкнутым ротором является «эффект вытеснения тока в обмотке ротора». Объясните это явление в АД.

2.42. Как устроен и работает глубокопазный двигатель?

2.43. Как устроен двигатель с двойной беличьей клеткой и как он работает в начальный момент пуска и после его окончания?

2.44. Сравните пусковые характеристики глубокопазного и двухклеточного двигателей.

2.45. Объясните процесс пуска двигателей с фазным ротором.

### ***Регулирование скорости АД***

2.46. Назовите основные способы регулирования скорости вращения асинхронного двигателя. Дайте оценку достоинств и недостатков.

2.47. Почему при частотном регулировании требуется выдерживать определенные соотношения между изменением частоты и напряжения?

2.48. К каким последствиям приведет, например, такое регулирование скорости — увеличение частоты сети при неизменном напряжении?

2.49. Нарисуйте схемы обмоток статора двигателя с переключением числа пар полюсов.

### ***Неноминальные и несимметричные режимы АД***

2.50. В методе симметричных составляющих существуют понятия *прямой, обратной и нулевой* последовательностей. Дайте физическое определение этих понятий.

2.51. Нарисуйте механические характеристики АД, если на обмотке статора действуют напряжения прямой  $U_1$  и обратной  $U_2$  последовательностей. Примите  $U_2 = U_1/2$ .

2.52. При обрыве стержней ротора появляется одноосный эффект Гергеса. Нарисуйте механическую характеристику АД, когда в нем появился этот эффект. Какие внешние проявления укажут на наличие обрыва стержней ротора?

2.53. Известно, что при схеме обмотки статора «Y» при обрыве фазы во время работы двигателя он будет продолжать вращаться, хотя обмотка в таком состоянии создает только пульсирующее поле. Объясните этот факт.

### Раздел 3

## СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

---

Роль синхронных машин в работе электроэнергетики невозможно переоценить. Во-первых, потому что практически 100% электроэнергии мы получаем от этих машин. Как ни какая другая машина синхронная машина используется во всем спектре промышленных технологий от производства электроэнергии до ее потребления. Эта машина обладает уникальным свойством потреблять и выдавать реактивную мощность, независимо от того работает она в режиме генератора или двигателя. Этим решается одна из глобальных проблем большой энергетики — оптимальное регулирование потоков мощности по системным связям.

Своими параметрами синхронные машины обеспечивают успешное функционирование энергосистем, как в нормальных, так и в аварийных режимах.

Крупнейшие экземпляры синхронных генераторов имеют мощность 1200—1600 МВт и одна такая машина способна обеспечить электроэнергией крупный мегаполис (например, зимний максимум сибирского города-миллионника 1500—1700 МВт). Современные синхронные машины предельных мощностей — это образцы самой передовой технологии, не уступающей космическим технологиям.

Понимание физических процессов протекающих в синхронных машинах, это путь к глубокому пониманию физики всей электроэнергетики. Теоретические построения для синхронной машины не зависят от режима ее работы (генератор это или двигатель), но как принято в мировой и отечественной учебной практике, теорию этих машин обычно излагают для режима генератора.

Рассматривая ниже основные теоретические и физические аспекты работы синхронной машины, мы полагаем, что читатель знаком с конструкцией и принципом действия этой машины.

## ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ И ФИЗИКИ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

### Режим холостого хода синхронного генератора

Генератор возбужден и вращается с синхронной скоростью  $n$ . Магнитное поле возбуждения  $\Phi_{\text{в}}$  индуцирует в обмотке якоря симметричную трехфазную ЭДС. Направление этой ЭДС в фазах обмотки якоря определяется по правилу «правой руки» и показано на рис. 3.1: (+) от наблюдателя, (•) к наблюдателю. Следует помнить, что правило «правой руки» справедливо для неподвижного поля, поэтому при определении направления ЭДС индуктор был мысленно заторможен, а проводники якоря вращались в обратном направлении.

Поскольку цепь якоря разомкнута в ней тока нет, и поэтому никаких других электромагнитных процессов в генераторе не происходит.

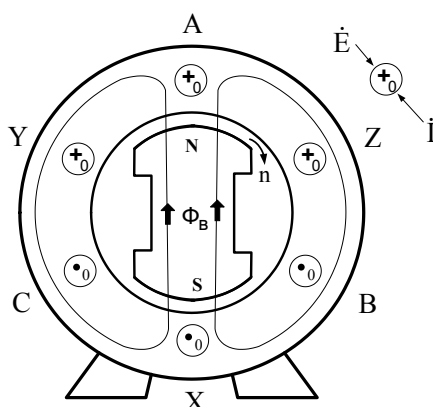


Рис. 3.1. Режим холостого хода возбужденного синхронного генератора  
(в проводниках якоря показаны направления ЭДС и тока)

### Режим нагрузки синхронного генератора

При подключении возбужденного генератора на симметричную трехфазную нагрузку, в обмотке якоря появится ток  $I$ , который создаст свое магнитное поле. Это поле называют *полем реакции якоря* и обозначают  $\Phi_a$ . В установившемся режиме работы поле реакции якоря постоянно по амплитуде, вращается относительно якоря с синхронной скоростью и поэтому неподвижно относительно ротора.

Когда была построена теория синхронных машин, выяснилась решающая роль магнитного поля реакции якоря на параметры машины и на работу всей энергосистемы. Поэтому рассмотрим физические процессы, связанные с реакцией якоря подробнее. Для построения теории вводится система координат  $d$ - $q$ , неподвижная относительно индуктора, и говорят о продольной —  $d$  и поперечной —  $q$  оси синхронной машины.

**Реакция якоря синхронной машины.** В установившемся режиме поле реакции якоря и индуктор неподвижны относительно друг друга. Однако взаимное расположение поля реакции якоря и индуктора зависит от характера нагрузки (активная, индуктивная, емкостная или смешанная), и этот факт имеет важнейшее значение для понимания энергетических процессов в синхронной машине. Покажем это.

**Чисто активная нагрузка** (рис. 3.2). При чисто активной нагрузке ток якоря совпадает по фазе с ЭДС. Это означает, что во всех проводниках якоря  $E$  и  $I$  будут иметь одинаковое направление. На рис. 3.2 это иллюстрируется на векторной диаграмме и на осциллограмме. По направлению ЭДС в проводниках определим направления токов. Токи в верхней

половине якоря направлены (+), в нижней половине направлены (·) и согласно «правилу буравчика» такая система токов создает поле реакции  $\Phi_a$  направленное перпендикулярно полю возбуждения  $\Phi_B$ . Таким образом чисто активный ток якоря создает поперечную реакцию  $\Phi_a = \Phi_q$ .

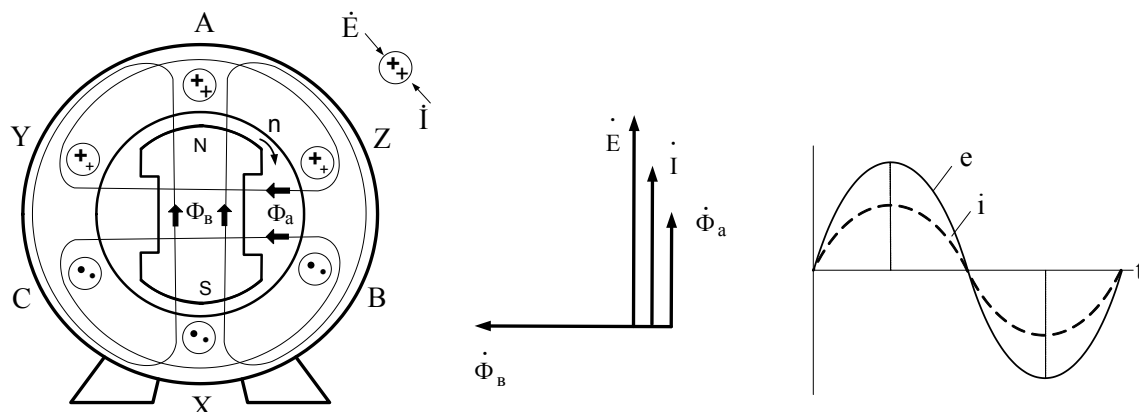


Рис. 3.2. Положение магнитных полей возбуждения и реакции якоря при чисто активной нагрузке

Рассматривая установившийся режим синхронной машины, следует помнить, что вся картина распределения ЭДС и токов, индуктор и магнитные поля вращается относительно статора с синхронной скоростью  $n$  и неподвижна относительно индуктора. Это означает, что электромагнитные процессы протекают только в яcore, а в индукторе их по-прежнему нет.

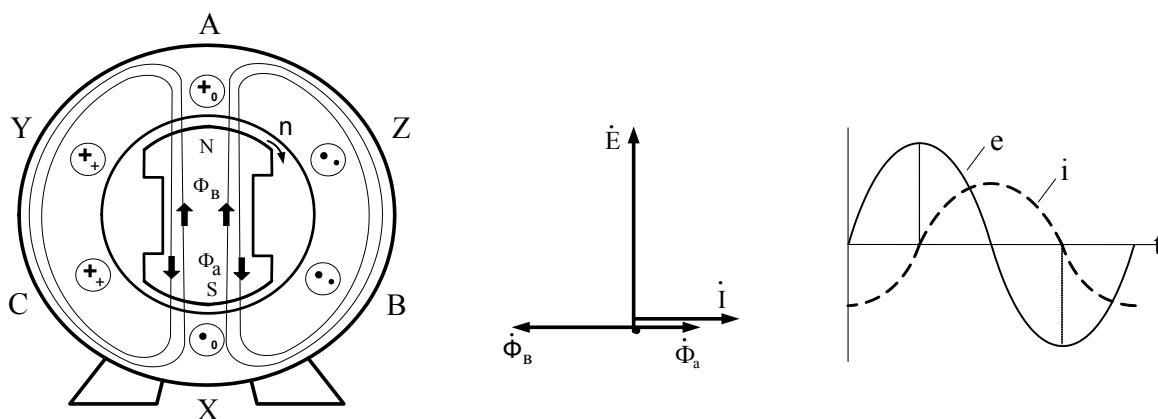


Рис. 3.3. Положение магнитных полей возбуждения и реакции якоря при индуктивной нагрузке

**Чисто индуктивная нагрузка.** При такой нагрузке ток  $I$  отстает от ЭДС на  $90$  эл. градусов. При положении индуктора показанном на рисунке 3.3 ЭДС в проводнике  $A$  максимальна и направлена (+), тогда максимальное значение тока  $I$  с направлением (+) будет в проводнике отстающем от  $A$  на  $90$  эл. градусов (на рисунке он не показан) а также в проводниках  $C$  и  $Y$ .

Направления токов в остальных проводниках также показаны на рис. 3.3. Полученная система токов в обмотке якоря создает магнитное поле  $\Phi_a$  направленное навстречу полю возбуждения и таким образом размагничивает генератор. Таким образом чисто индуктивный ток создает продольную размагничивающую реакцию якоря  $\Phi_a = -\Phi_d$ .

Вывод о размагничивании машины полностью соответствует физическим представлениям об индуктивной нагрузке. Как известно, индуктивная нагрузка, например, катушка индуктивности, потребляет реактивную мощность, которая идет на создание в ней магнитного поля. Ровно такую реактивную мощность генератор теряет за счет размагничивания.

**Чисто емкостная нагрузка.** При такой нагрузке ток  $I$  опережает ЭДС на  $90^\circ$  эл. градусов и поэтому распределение токов в витках обмотки якоря будет таким как показано на рис. 3.4. Полученная система токов в обмотке якоря создает магнитное поле  $\Phi_a$  направленное согласно с полем возбуждения, в результате чего генератор намагничивается. Чисто емкостный ток создает продольную намагничивающую реакцию якоря  $\Phi_a = +\Phi_q$ .

Полученная картина токов и полей также соответствует физическим представлениям о емкостной нагрузке. Емкость, как известно, является источником реактивной мощности, которую генератор и потребляет, при этом намагничиваясь.

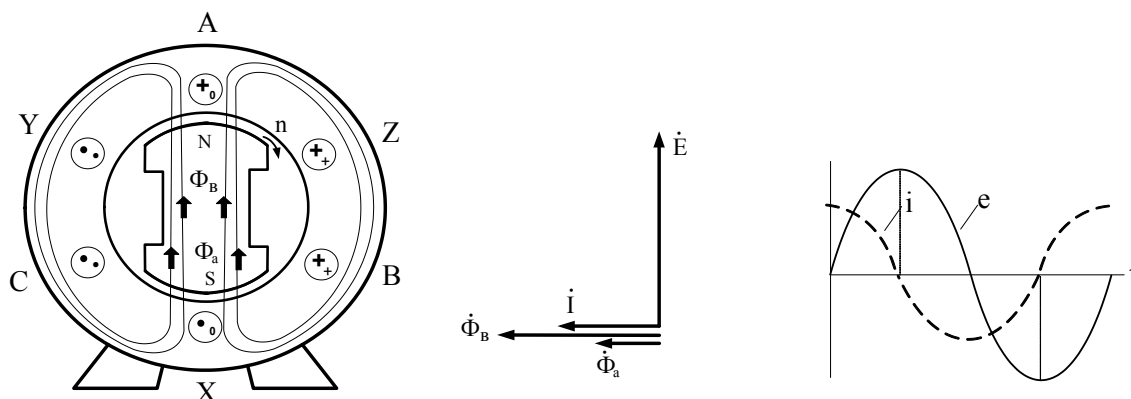


Рис. 3.4. Положение магнитных полей возбуждения и реакции якоря при емкостной нагрузке

**Смешанная нагрузка** (рис. 3.5). В качестве примера рассмотрим активно-индуктивную нагрузку, при которой ток якоря отстает от ЭДС на угол  $\psi$ . Ток  $I$  и созданный им магнитный поток  $\Phi_a$  формально можно разложить на оси, получим токи  $I_d, I_q$ .

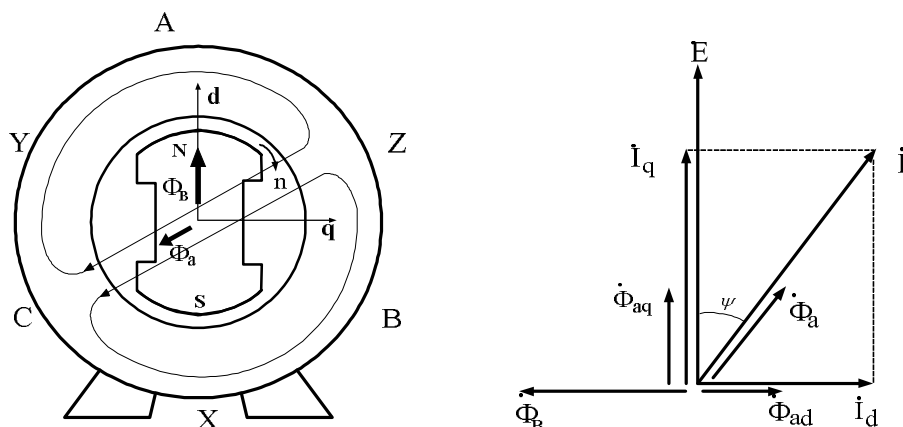


Рис. 3.5. Реакция якоря при смешанной нагрузке

Разложению тока  $I$  можно дать следующее толкование. Реальная обмотка якоря с током  $I$  заменяется двумя фиктивными обмотками неподвижными относительно индуктора по которым протекают токи  $I_d, I_q$  и которые создают свои магнитные поля  $\Phi_{ad}, \Phi_{aq}$ . Эти поля индуцируют в обмотке якоря соответствующие электродвижущие силы  $E_{ad}, E_{aq}$

$$I_d \Rightarrow \Phi_{ad} \Rightarrow E_{ad}, \quad I_q \Rightarrow \Phi_{aq} \Rightarrow E_{aq}.$$

Итак реальное поле  $\Phi_a$  заменили его составляющими вдоль осей  $d$ - $q$  и говорят о продольной  $\Phi_{ad}$  и поперечной  $\Phi_{aq}$  реакции якоря.

### Уравнение напряжений и векторная диаграмма синхронного генератора

Напомним, что рассматривается установившийся режим синхронного генератора, то есть генератор вращается с постоянной скоростью  $n$ , обмотка якоря подключена к трехфазной



симметричной нагрузке, магнитный поток реакции якоря постоянный по амплитуде и вращается синхронно с индуктором. Рассмотрим физические процессы, которые этот поток вызывает в обмотках машины.

*Процессы в обмотке возбуждения.* Потокосцепление обмотки возбуждения с магнитным потоком  $\Phi_a$  постоянно, поэтому ЭДС в обмотке возбуждения отсутствует и никаких других электромагнитных процессов здесь не происходит.

*Процессы в обмотке якоря.* Магнитные потоки  $\Phi_\delta$  и  $\Phi_a$  вращаются относительно обмотки якоря с синхронной скоростью  $n$ , и каждый из них индуцирует в ней соответствующие ЭДС. Вокруг проводников обмотки якоря существует магнитное поле рассеяния  $\Phi_{a\sigma}$ , которое также создает в ядре электродвижущую силу  $E_{a\sigma}$

$$\Phi_\delta \Rightarrow E, \quad \Phi_{ad} \Rightarrow E_{ad}, \quad \Phi_{aq} \Rightarrow E_{aq}, \quad \Phi_{a\sigma} \Rightarrow E_{a\sigma}.$$

Это позволяет написать уравнение напряжений для фазы обмотки якоря

$$\dot{E} + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{a\sigma} = \dot{U} + \dot{I}r_a. \quad (3.1)$$

По уравнению (3.1) построена векторная диаграмма (рис. 3.6). При чтении векторной диаграммы следует помнить, что ЭДС отстает от магнитного потока на  $90^\circ$  эл.

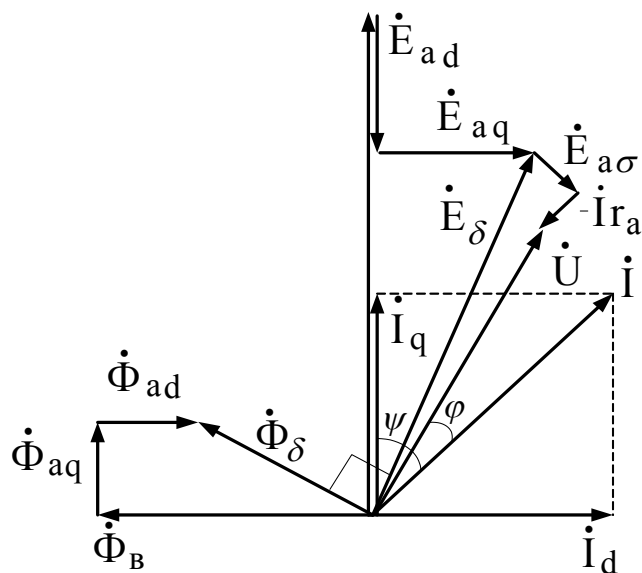


Рис. 3.6. Векторная диаграмма синхронного генератора при активно-индуктивной нагрузке ( $\Phi_\delta$  — главный магнитный поток в воздушном зазоре машины)

### Физика индуктивных сопротивлений синхронной машины

Если в каком либо электрическом устройстве индуцируется синусоидальная ЭДС, то для ее учета используют понятие индуктивного сопротивления, и определяют его по аналогии с законом Ома как отношение ЭДС к току который создал эту ЭДС (см. § 4)

$$x = \frac{E}{I}.$$

*Индуктивные сопротивления  $x_a$ ,  $x_q$ .* Рассмотрим действие поля реакции якоря  $\Phi_a$ , так как именно с ним связаны важнейшие параметры машины. Ток якоря  $I_a$  создает поле реакции  $\Phi_a$  которое, двигаясь относительно обмотки якоря, индуцирует в ней электродвижущую силу  $E_a$

$$I_a \Rightarrow \Phi_a \Rightarrow E_a.$$

Отсюда можно было бы ввести понятие индуктивного сопротивления реакции якоря

$$x_a = \frac{E_a}{I_a}. \quad (3.2)$$

Но определенное таким образом, сопротивление  $x_a$  не может выступать в качестве параметра машины, так как оно не постоянно. Действительно, при изменении характера нагрузки поток  $\Phi_a$  изменяет свое положение относительно ротора и при этом изменяется воздушный зазор, через который это поток проходит (рис. 3.5). А с изменением воздушного зазора в цепи магнитного потока изменяется и индуктивное сопротивление, созданное этим потоком.

Чтобы учесть действие реакции якоря в виде постоянных параметра в реальное поле  $\Phi_a$  заменим его составляющим  $\Phi_{ad}$  и  $\Phi_{aq}$ . Поскольку эти потоки проходят по постоянным зазорам, они создают постоянные индуктивные сопротивления, которые становятся параметрами машины

$$\begin{aligned} I_{ad} \Rightarrow \Phi_{ad} \Rightarrow E_{ad} \quad x_{ad} &= \frac{E_{ad}}{I_{ad}}, \\ I_{aq} \Rightarrow \Phi_{aq} \Rightarrow E_{aq} \quad x_{aq} &= \frac{E_{aq}}{I_{aq}}. \end{aligned}$$

Здесь  $x_{ad}$ ,  $x_{aq}$  — *главные синхронные индуктивные сопротивления по продольной и поперечной осям* (главные — означает, что они созданы главными магнитными потоками реакции якоря, *синхронные* — означает, что они определены в синхронном установившемся режиме, когда поле реакции постоянно по величине и неподвижно относительно ротора).

Кроме главного магнитного поля ток якоря создает поток рассеяния  $\Phi_{a\sigma}$  и поэтому вводят понятие индуктивного сопротивления рассеяния

$$I_{a\sigma} \Rightarrow \Phi_{a\sigma} \Rightarrow E_{a\sigma} \quad x_{a\sigma} = \frac{E_{a\sigma}}{I_{a\sigma}}.$$

Совместное действие магнитных полей реакции якоря главного  $\Phi_a$  и рассеяния  $\Phi_{a\sigma}$  приводит к понятию полных синхронных индуктивных сопротивлений по продольной и поперечной осям

$$x_d = x_{ad} + x_{a\sigma}, \quad (3.3)$$

$$x_q = x_{aq} + x_{a\sigma}. \quad (3.4)$$

**Переходные и сверхпереходные сопротивления.** Когда ток якоря изменяется по амплитуде, например, при изменении нагрузки машины или при коротких замыканиях, главное магнитное поле реакции якоря  $\Phi_a$  также изменяется по амплитуде, при этом в обмотках индуктора наводятся ЭДС. Наличие ЭДС в обмотках индуктора принципиально меняет энергетическое состояние машины.

Под действием ЭДС в обмотках индуктора возникают токи, которые создают свои магнитные потоки. Эти потоки вытесняют главный магнитный поток  $\Phi_a$  из тела индуктора в воздух (рис. 3.7 а). А поскольку воздушный зазор для потока реакции якоря многократно увеличился индуктивные сопротивления, созданные им, значительно уменьшаются. Сопротивления, определенные для этого момента времени называются сверхпереходными и обозначаются  $x''_{ad}$  и  $x''_{aq}$  или

$$x''_d = x_{a\sigma} + x''_{ad}, \quad x''_q = x_{a\sigma} + x''_{aq}. \quad (3.5)$$

Так как успокоительная обмотка индуктора выполняется с повышенным активным сопротивлением, то индуцированный в ней ток затухнет раньше чем в обмотке возбуждения.

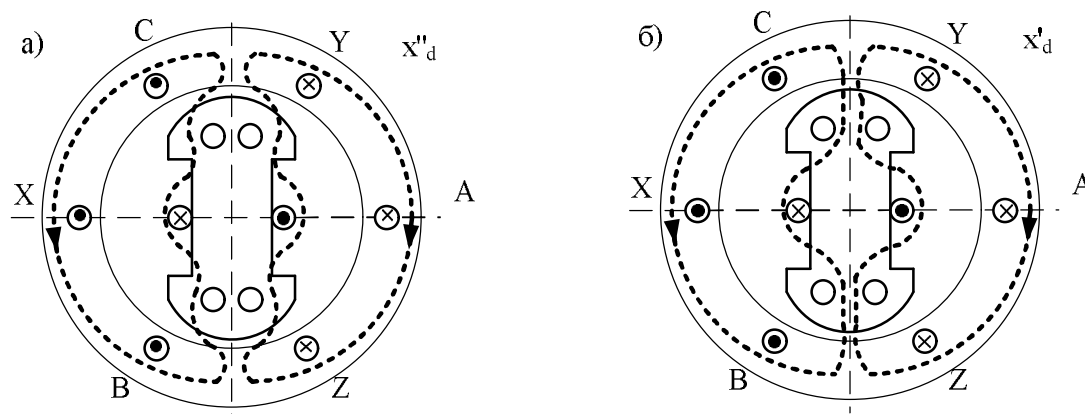


Рис. 3.7. Распределение главного магнитного поля реакций якоря:

- а) в начальный момент короткого замыкания,  
б) после затухания тока в успокоительной обмотке

После затухания тока в успокоительной обмотке поле реакции якоря будет вытесняться из тела индуктора только обмоткой возбуждения (рис. 3.7 б).

Поскольку путь поля реакции якоря по воздуху сократился, индуктивные сопротивления возрастут, они называются переходными индуктивными сопротивлениями и обозначаются  $X'_{ad}$  и  $X'_{aq}$  или

$$x'_d = x_{a\sigma} + x'_{ad}, \quad x'_q = x_{a\sigma} + x'_{aq}. \quad (3.6)$$

После того, как индуцированный ток затухнет и в обмотке возбуждения, главное поле реакции якоря снова проникнет в тело индуктора, и восстановятся индуктивные сопротивления  $x_d$  и  $x_q$ .

**Вывод.** Из рассмотренных физических процессов в синхронной машине следует, что ее индуктивные сопротивления изменяются при изменениях режимов работы, это означает, что при экспериментальном определении индуктивных сопротивлений необходимо обеспечивать те физические условия, при которых возникают указанные сопротивления. Во-первых, это соответствующее положение поля реакции якоря относительно индуктора и, во-вторых, прохождение магнитного потока по путям, соответствующим режиму, для которого это сопротивление измеряется.

### Лабораторная работа 3.1

#### ОПЫТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ $x_d$

Для того чтобы измерить это сопротивление в машине необходимо создать следующие физические условия: машина должна вращаться с синхронной скоростью и поле реакции якоря должно быть расположено по оси  $d$ . Из анализа реакции якоря следует, что такие условия обеспечиваются при чисто индуктивном или чисто емкостном токе якоря. Но в эксперименте проще получить практически чисто индуктивный ток. Действительно, если пренебречь весьма незначительным активным сопротивлением обмотки якоря, то при трехфазном коротком замыкании этой обмотки в ней будет протекать чисто индуктивный ток. Для определения же величины ЭДС, вызвавшей этот ток используют характеристику холостого хода (рис. 3.8).

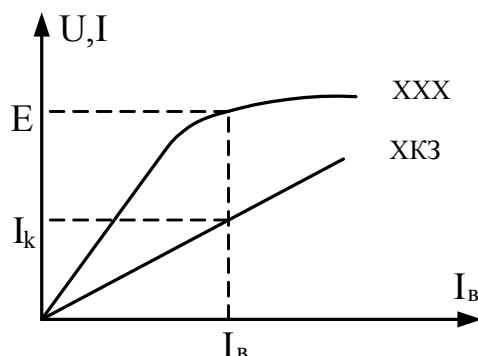


Рис. 3.8. Характеристики холостого хода (XXX) и короткого замыкания (ХКЗ) синхронного генератора

Индуктивное сопротивление синхронной машины по продольной оси определяется по результатам указанных опытов по формуле

$$x_d = \frac{E}{I_k}. \quad (3.7)$$

Следует отметить, что сопротивления многофазной машины определяются для фазы, поэтому в формулу (3.7) должны подставляться фазные значения ЭДС и тока.

#### Этапы проведения лабораторной работы

- 1 этап: Снятие и построение характеристики ХХ;
- 2 этап: Снятие и построение характеристики КЗ;
- 3 этап: Обработка результатов и расчет индуктивного сопротивления  $x_d$ .

#### Программа экспериментов

Эксперименты проводятся на специализированном стенде с использованием следующего оборудования.

#### Перечень аппаратуры

- G1 — источник синусоидального напряжения промышленной частоты;
- G2 — источник питания двигателя постоянного тока М2, используется для питания регулируемым напряжением якорной обмотки и нерегулируемым напряжением обмотки возбуждения машины постоянного тока;
- G6 — синхронный генератор (испытываемая машина);

**G3** — возбудитель (служит для питания обмотки возбуждения синхронного генератора);

**G5, P3** — тахометр (измеряет частоту вращения электромашинного агрегата);

**P1** — измеритель тока и напряжения.

Обозначение на эл. схеме	Наименование	Код (см. на стенде)
G1	Трёхфазный источник питания	201.2
G2	<b>Источник питания двигателя постоянного тока</b>	206.1
G3	Возбудитель синхронной машины	209.2
G5	Преобразователь угловых перемещений	104
G6	Машина переменного тока	102.1
M2	Машина постоянного тока	101.2
P1	Блок мультиметров	508.2
P3	Указатель частоты вращения	506.2

## Этап 1

Снятие характеристики холостого хода  
трехфазного синхронного генератора  $E_0 = f(I_e)$

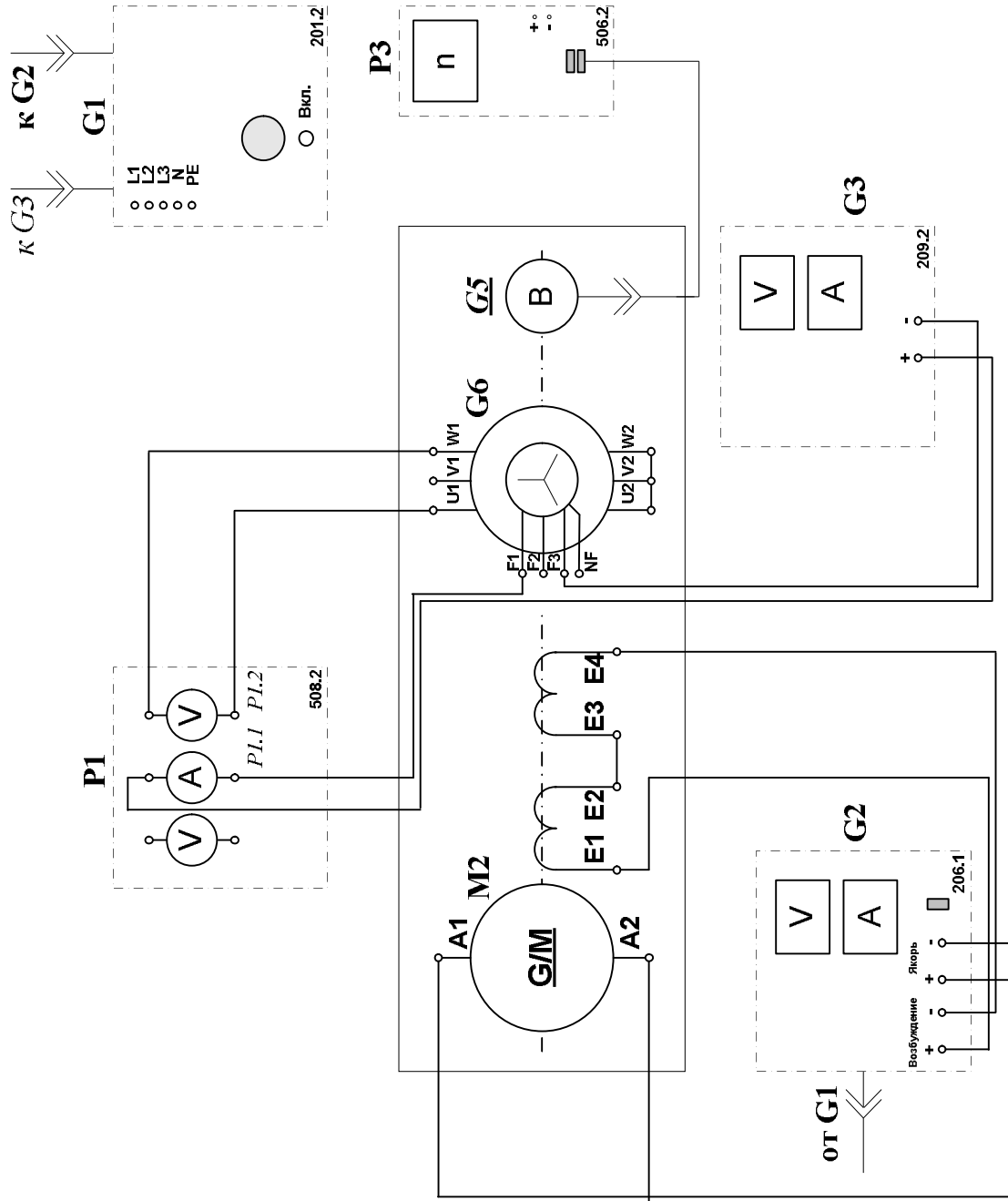


Рис. 3.9. Электрическая схема соединений для снятия характеристики XX синхронного генератора

### Указания по проведению эксперимента

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока (прилож.1).
3. Соедините гнезда защитного заземления « $\oplus$ » устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «Р» трехфазного источника питания G1.
4. Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
5. Переключатели режима работы источника G2 и возбудителя G3 установите в положение «РУЧН.».
6. Регулировочные рукоятки источника G2 и возбудителя G3 поверните против часовой стрелки до упора.
7. Включите выключатели «СЕТЬ» блока мультиметров P1 и указателя частоты вращения P3.
8. Активизируйте мультиметры блока P1, задействованные в эксперименте.
9. Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
10. Включите выключатель «СЕТЬ» и нажмите кнопку «ВКЛ» источника G2.
11. Вращая регулировочную рукоятку источника G2, разгоните двигатель M2 (генератор G6) до частоты  $1500 \text{ мин}^{-1}$  и поддерживайте ее в ходе эксперимента неизменной.
12. Включите выключатель «СЕТЬ» и нажмите кнопку «ВКЛ» возбудителя G3.
13. Вращая регулировочную рукоятку возбудителя G3, изменяйте ток возбуждения  $I_f$  генератора G6 в диапазоне  $0 \dots 2 \text{ A}$  и заносите показания амперметра P1.1 (ток  $I_f$ ) и вольтметра P1.2 ( $E_0$  синхронного генератора G6) в таблицу 3.1.

Таблица 3.1

$I_f, \text{ A}$										
$E_0, \text{ B}$										

14. По завершении эксперимента первоначально у возбудителя G3, а затем и у источника G2 поверните регулировочную рукоятку против часовой стрелки до упора, нажмите кнопку «ОТКЛ» и отключите выключатель «СЕТЬ». Отключите источник G1 нажатием на кнопку-гриб, и последующим отключением ключа — выключателя. Отключите выключатели «СЕТЬ» блока мультиметров P1 и указателя частоты вращения P3.
15. Используя результаты табл. 3.1, постройте искомую характеристику холостого хода  $E_0 = f(I_f)$  трехфазного синхронного генератора.

## Этап 2

Снятие характеристики короткого замыкания  
трехфазного синхронного генератора  $I_K = f(I_e)$

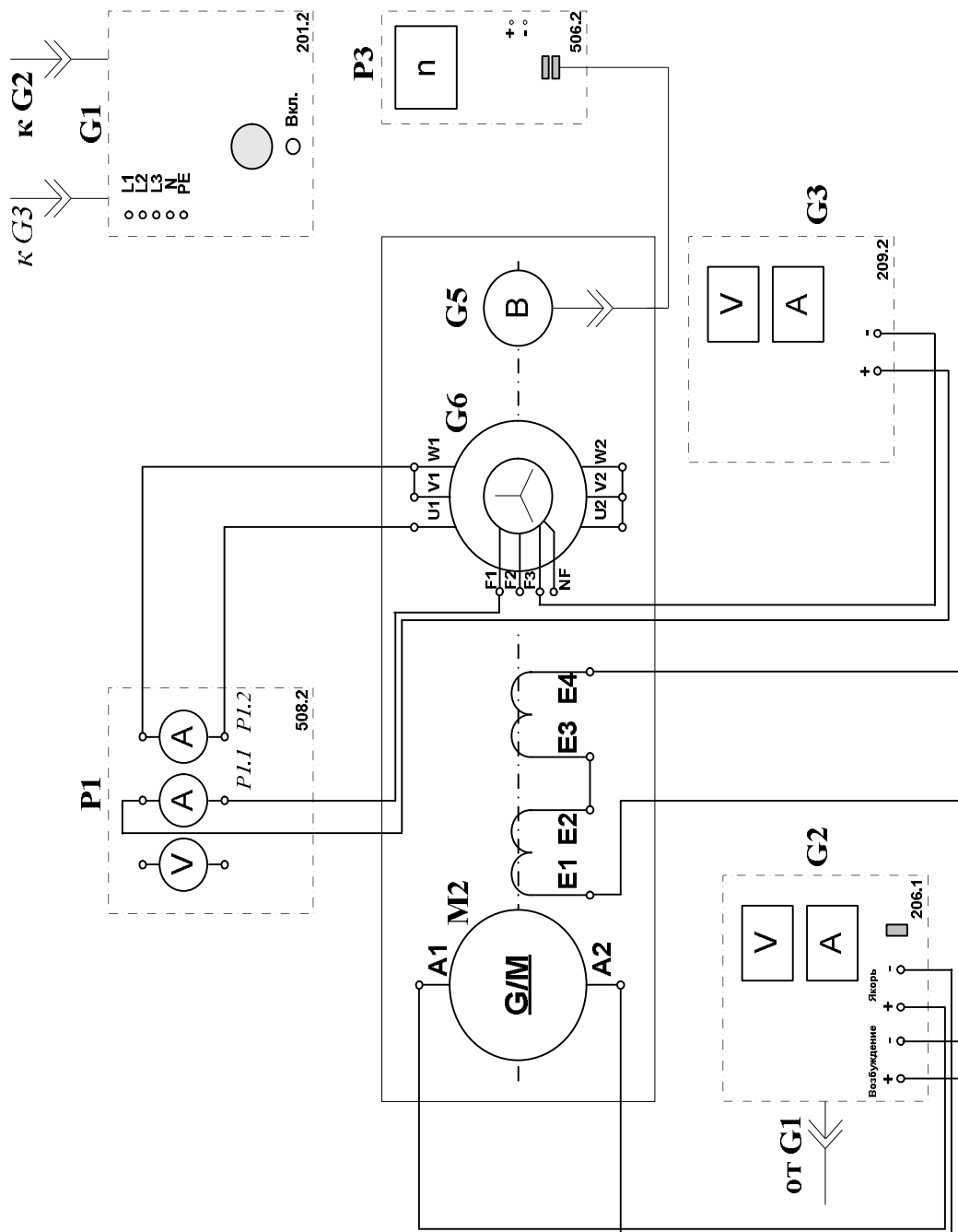


Рис. 3.10. Электрическая схема соединений для снятия характеристики K3 синхронного генератора



### Указания по проведению эксперимента


1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока (прилож.1).
3. Соедините гнезда защитного заземления «» устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» трехфазного источника питания G1.
4. Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
5. Переключатели режима работы источника G2 и возбудителя G3 установите в положение «РУЧН.».
6. Рукоятки источника G2 и возбудителя G3 поверните против часовой стрелки до упора.
7. Включите выключатели «СЕТЬ» блока мультиметров P1 и указателя частоты вращения P3.
8. Активизируйте мультиметры блока P1, задействованные в эксперименте.
9. Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
10. Включите выключатель «СЕТЬ» и нажмите кнопку «ВКЛ» источника G2.
11. Вращая рукоятку источника G2, разгоните двигатель M2 до частоты 1500 мин<sup>-1</sup> и поддерживайте ее в ходе эксперимента неизменной.
12. Включите выключатель «СЕТЬ» и нажмите кнопку «ВКЛ» возбудителя G3.
13. Вращая регулировочную рукоятку возбудителя G3, изменяйте ток возбуждения  $I_f$  генератора G6 в диапазоне 0...2 А и заносите показания амперметров P1.1 (ток  $I_f$ ) и P1.2 (ток  $I_K$  статорной обмотки синхронного генератора G6) в таблицу 3.2.

Таблица 3.2

$I_B, A$									
$I_K, A$									

14. По завершении эксперимента первоначально у возбудителя G3, а затем и у источника G2 поверните рукоятку против часовой стрелки до упора, нажмите кнопку «ОТКЛ» и отключите выключатель «СЕТЬ». Отключите источник G1 нажатием на кнопку-гриб, и последующим отключением ключа — выключателя. Отключите выключатели «СЕТЬ» блока мультиметров P1 и указателя частоты вращения P3.

### Этап 3

#### Обработка результатов и расчет индуктивного сопротивления $x_d$

1. Определить фазные значения ЭДС и тока якоря генератора.
2. Построить графики  $X\chi$  и  $K3$  (см. рис. 3.7).
3. Рассчитать сопротивление  $x_d$  в именованных и в относительных единицах.

## МЕТОДЫ СИНХРОНИЗАЦИИ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ С СЕТЬЮ

**Проблема синхронизации.** В нормальном режиме, это так называемый «синхронный установившийся режим», индуктор машины и поле реакции якоря вращаются синхронно. Поэтому идеальным моментом подключения синхронного генератора в сеть было бы такое, когда индуктор вращается со строго синхронной скоростью, вектора напряжений сети и генератора равны по амплитуде, совпадают по фазе и вращаются с одинаковой скоростью (рис. 3.11 а). Это идеальные условия включения генератора.

При нарушении любого из этих условий появится бросок тока, вызванный напряжением  $\Delta U$  (рис. 3.11 б). При крайне неудачной ситуации, когда вектора находятся в противофазе (рис. 3.11 в), включение генератора равносильно короткому замыканию на двойное напряжение сети  $\Delta U \approx 2U_{ном}$ .

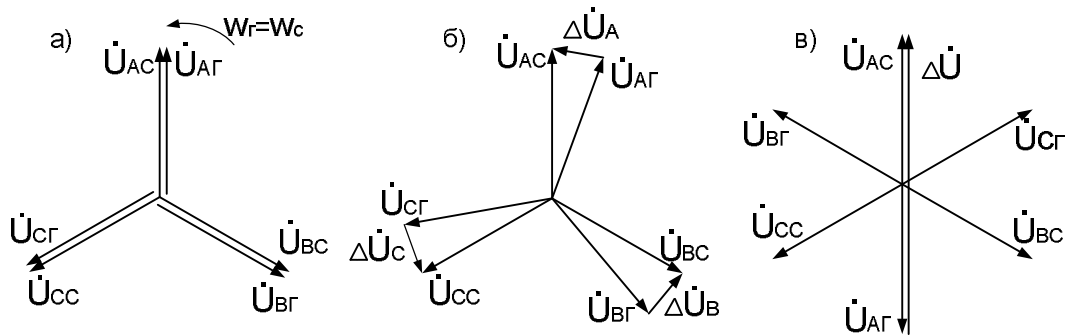


Рис. 3.11. Некоторые возможные ситуации при включении синхронного генератора в сеть

Для создания благоприятных условий перед включением генератора в сеть необходимо отрегулировать его режим на холостом ходу и в надлежащий момент времени включить генератор в сеть. Совокупность этих операций называют *синхронизацией генератора*.

Идеальные условия синхронизации следующие:

- 1) равны напряжения генератора и сети  $U_G = U_C$ ;
- 2) равны частоты генератора и сети  $f_G = f_C$ ;
- 3) напряжения генератора и сети должны совпадать по фазе;
- 4) соблюдено одинаковое чередование фаз генератора и сети.

При этих условиях напряжения между контактами выключателя соединяющего генератор с сетью на всех фазах равны нулю.

Равенство напряжений генератора и сети достигается регулированием тока возбуждения генератора, изменение частоты и фазы регулированием скорости вращения генератора, правильность чередования фаз контролируется использованием специальных схем («на погасание», «на вращение огня») или специальных приборов — синхроскопов.

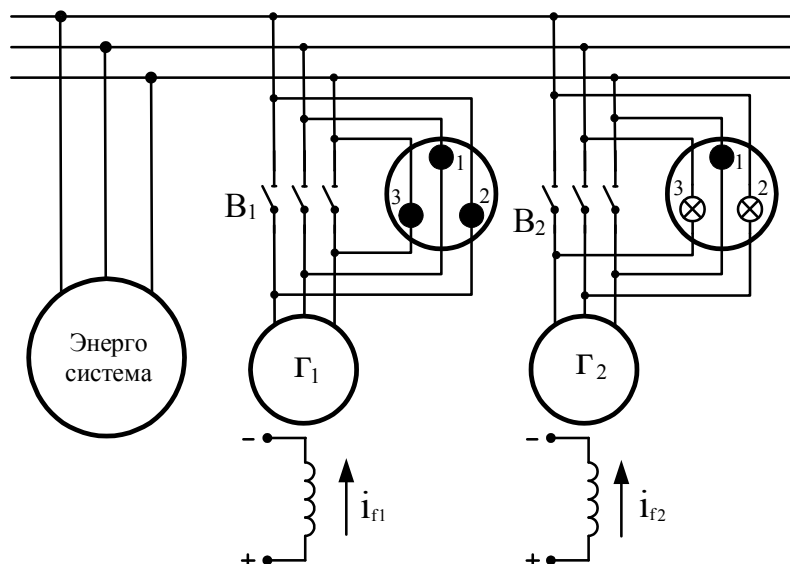


Рис. 3.12. Схемы синхронизации генератора с помощью ламповых синхроскопов по схеме на погасание (а) и на вращение огня (б)

При подготовке к лабораторным работам следует ответить на следующие вопросы:

- 1) объяснить эффект вращения огня (последовательного загорания ламп) и эффект погасания (одновременного погасания всех ламп);
- 2) в какой момент должен включаться выключатель при схеме на погасание и при схеме на вращение огня?
- 3) какой эффект будет наблюдаться при схеме «на вращение огня» при неправильной фазировке генератора?
- 4) какой эффект будет наблюдаться при схеме «на погасание» при неправильной фазировке генератора?

### Методы синхронизации генераторов с сетью

В практике используют два метода включения синхронных генераторов в энергосистему.

**Метод точной синхронизации.** Этот метод требует достаточно точной подгонки параметров холостого хода генератора перед включением его в сеть и выбора момента включения. В момент включения генератора должны быть достаточно точно соблюдены все условия синхронизации. Это сложная оперативная работа, которая на электростанциях, как правило, занимает до 20—30 минут. Такая синхронизация может быть использована только в нормальном режиме работы энергосистемы при плановых подключениях генераторов.

Но во многих практических случаях, когда энергосистема испытывает дефицит активной мощности или происходит изменение частоты, требуется быстрое включение генератора в энергосистему. Это может обеспечить только метод самосинхронизации.

**Метод грубой синхронизации (самосинхронизация).** При самосинхронизации обмотка возбуждения замыкается на сопротивление гашения поля, невозбужденный генератор ( $U_e=0$ ) разгоняется до подсинхронной скорости ( $s \leq 2\%$ ) и при таких условиях обмотка якоря включается в сеть. Сразу после включения обмотки якоря включается ток возбуждения, и генератор втягивается в синхризм. Так как включение невозбужденного генератора на напряжение сети равноценно короткому замыканию, это вызывает бросок тока в сети, однако ограничение броска тока обеспечивается сопротивлением сети (трансформатор, линия) и замыканием обмотки возбуждения на активное сопротивление. По действующим требованиям самосинхронизация допустима при броске тока не более  $3,5 I_H$ , что в большинстве случаев соблюдается.

# Эксперимент 1

## Подключение к сети трехфазного синхронного генератора методом точной синхронизации

Эксперименты проводятся на специализированном стенде с использованием следующего оборудования.

### Перечень аппаратуры

- G1** — источник синусоидального напряжения промышленной частоты;
- G2** — источник питания двигателя постоянного тока: используется для питания регулируемым напряжением якорной обмотки и нерегулируемым напряжением обмотки возбуждения машины постоянного тока M2, работающей в режиме двигателя с независимым возбуждением;
- G3** — возбудитель: служит для питания обмотки возбуждения синхронного генератора G6;
- G6** — испытуемый синхронный генератор: связан с сетью (источником G1) через блок синхронизации A17, трехфазную трансформаторную группу A2 и выключатель A6;
- G5, P3** — тахометр: измеряет частоту вращения электромашинного агрегата;
- P2** — комбинированный измеритель активной и реактивной мощности;
- P4** — измеритель напряжения и частоты: измеряет напряжения и частоты со стороны генератора G6 и со стороны сети.

Обозначение на эл. схеме	Наименование	Код (см. на стенде)
G1	Трехфазный источник питания	201.2
G2	Источник питания двигателя постоянного тока	206.1
G3	Возбудитель синхронной машины	209.2
G5	Преобразователь угловых перемещений	104
G6	Машина переменного тока	102.1
M2	Машина постоянного тока	101.2
A2	Трехфазная трансформаторная группа	347.3
A6	Трехполюсный выключатель	301.1
A17	Блок синхронизации	319
P2	Измеритель мощностей	507.2
P3	Указатель частоты вращения	506.2
P4	Измеритель напряжений и частот	504.1

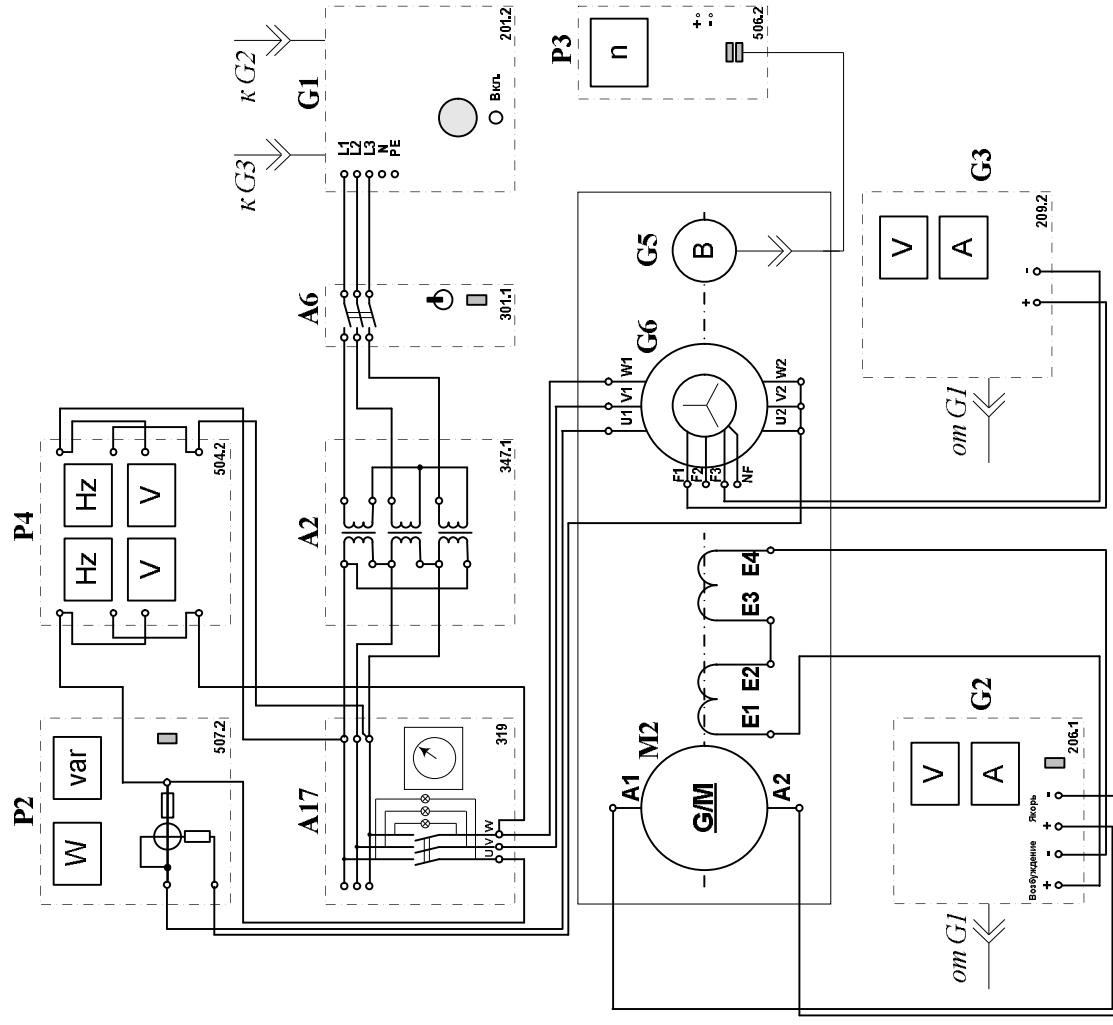


Рис. 3.13. Электрическая схема соединений для точной синхронизации синхронного генератора

### Указания по проведению точной синхронизации


1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соберите схему тепловой защиты машины переменного тока (прилож.1).
3. Соедините гнезда защитного заземления «» устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» трехфазного источника питания G1.
4. Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
5. Переключатели режима работы источника G2, возбудителя G3, выключателя A6 и блока синхронизации A17 переведите в положение «РУЧН.».
6. Регулировочные рукоятки источника G2 и возбудителя G3 поверните против часовой стрелки до упора.
7. Установите переключателем в трехфазной трансформаторной группе A2 номинальные напряжения: вторичных обмоток трансформаторов — 220 В.
8. Включите выключатели «СЕТЬ» выключателя A6, блока синхронизации A18, измерителя мощностей P2 и указателя P3.
9. Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
10. Включите выключатель «СЕТЬ» и нажмите кнопку «ВКЛ» источника G2.
11. Вращая регулировочную рукоятку источника G2, установите частоту вращения двигателя M2 (генератора G6)  $1500 \text{ мин}^{-1}$ .
12. Включите выключатель A6 нажатием на кнопку «ВКЛ» на его передней панели.
13. Включите выключатель «СЕТЬ» и нажмите кнопку «ВКЛ» возбудителя G3.
14. Вращая рукоятку возбудителя G3, установите напряжение между фазами генератора G6 равным напряжению между одноименными фазами сети.
15. Обеспечьте условия синхронизации согласно табл. 3.3, после чего, нажатием на кнопку «ВКЛ» блока синхронизации A17, подключите генератор G6 к сети.
16. Убедитесь, что генератор G6 вошел в режим синхронной работы с сетью, о чем должно свидетельствовать отсутствие колебаний значений его режимных параметров.
17. Вращая регулировочную рукоятку источника G2, нагрузите генератор G6 активной мощностью, например, до 30 Вт, которую определяйте утроением показаний ваттметра измерителя P2.
18. Вращая регулировочную рукоятку возбудителя G3, нагрузите генератор G6 реактивной мощностью с отстающим (опережающим) коэффициентом мощности, например, до 30 Вар, которую определяйте утроением показаний варметра измерителя P2.
19. Для отключения генератора G6 от сети: разгрузите его по активной и реактивной мощностям, нажмите кнопку «ОТКЛ» блока синхронизации A17, поверните рукоятки сначала у возбудителя G3, а затем у источника G2 против часовой стрелки до упора, отключите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте, отключите источник G1 нажатием на кнопку-гриб и последующим отключением ключа — выключателя.

Таблица 3.3

Условие	Средство контроля	Критерий выполнения условия	Критерий невыполнения условия	Рекомендации по выполнению условия
Равенство напряжений синхронного генератора и сети	Вольтметры со стороны синхронного генератора и сети	Напряжения со стороны синхронного генератора и сети равны	Напряжения со стороны синхронного генератора и сети не равны	Регулировать напряжения возбуждения синхронного генератора до момента выравнивания напряжений со стороны синхронного генератора и сети
Одинаковое чередование фаз напряжений синхронного генератора и сети	Лампы в разрывах фаз	Лампы в фазах: периодически одновременно загораются и гаснут (частоты напряжений не равны); горят (напряжения в противофазе); не горят (напряжения синфазные)	Лампы в фазах периодически одновременно загораются и гаснут, создавая эффект «кругового огня»	Переключить любые две фазы синхронного генератора
Равенство частот синхронного генератора и сети	Лампы в разрывах фаз или синхроскоп	Лампы в фазах горят постоянно без мерцания (напряжения в противофазе) или не горят (напряжения синфазные); стрелка синхроскопа неподвижна	Лампы в фазах загораются с частотой скольжения; стрелка синхроскопа вращается	Регулировать частоту вращения синхронного генератора
Синфазность напряжений синхронного генератора и сети	Лампы в разрывах фаз или синхроскоп	Лампы в фазах не горят; стрелка синхроскопа смотрит вверх	Лампы в фазах горят; стрелка синхроскопа не смотрит вверх	Регулировать частоту вращения синхронного генератора до погасания ламп

## Эксперимент 2

### Подключение к сети трехфазного синхронного генератора методом грубой синхронизации

Эксперименты проводятся на специализированном стенде с использованием следующего оборудования.

#### Перечень аппаратуры

**G1** — источник синусоидального напряжения промышленной частоты;

**G2** — источник питания двигателя постоянного тока, используется для питания регулируемым напряжением якорной обмотки и нерегулируемым напряжением обмотки возбуждения машины постоянного тока M2, работающей в режиме двигателя с независимым возбуждением;

**G3** — возбудитель служит для питания обмотки возбуждения синхронного генератора G6;

**G6** — синхронный генератор связан с сетью (источником G1) через блок синхронизации A17, трехфазную трансформаторную группу A2;

**G5, P3** — тахометр, измеряет частоту вращения электромашиного агрегата;

**P2** — комбинированный измеритель активной и реактивной мощности, развиваемые испытуемым генератором G6;

**P4** — комбинированный измеритель напряжения и частоты со стороны генератора G6 и со стороны электрической сети;


**A9** — резистор синхронизации, подключается выключателем A6 к обмотке возбуждения синхронного генератора G6 на этапе асинхронного пуска последнего.

Обозначение на эл. схеме	Наименование	Код (см. на стенде)
G1	Трехфазный источник питания	201.2
G2	Источник питания двигателя постоянного тока	206.1
G3	Возбудитель синхронной машины	209.2
G5	Преобразователь угловых перемещений	104
G6	Машина переменного тока	102.1
M2	Машина постоянного тока	101.2
A2	Трехфазная трансформаторная группа	347.3
A6	Трехполюсный выключатель	301.1
A9	Реостат для цепи ротора машины переменного тока	307.1
A17	Блок синхронизации	319
P2	Измеритель мощностей	507.2
P3	Указатель частоты вращения	506.2





### Указания по проведению грубой синхронизации

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока (прилож.1).
3. Соедините гнезда защитного заземления «» устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» трехфазного источника питания G1.
4. Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
5. Переключатели режима работы источника G2, возбудителя G3, выключателя A6 и блока синхронизации A17 переведите в положение «РУЧН.».
6. Регулировочные рукоятки источника G2 и возбудителя G3 поверните против часовой стрелки до упора.
7. Установите суммарное сопротивление фаз реостата A4, равными 8 Ом.
8. Установите переключателем в трехфазной трансформаторной группе A2 номинальные напряжения: вторичных обмоток трансформаторов 220 В.
9. Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
10. Включите выключатель «СЕТЬ» и нажмите кнопку «ВКЛ» источника G2.
11. Вращая регулировочную рукоятку источника G2, установите частоту вращения двигателя M2 (генератора G6)  $1500 \text{ мин}^{-1}$ .
12. Включите выключатель «СЕТЬ» и нажмите кнопку «ВКЛ» возбудителя G3.
13. Вращая регулировочную рукоятку возбудителя G3 по часовой стрелке, установите ток возбуждения генератора G6, равным 1,5 А, и убедитесь, что свечение индикаторных ламп блока синхронизации A17 меняется синфазно. В противном случае при эффекте «бегущего огня» переключите любые две фазы генератора G6.
14. Нажмите кнопку «ОТКЛ» возбудителя G3.
15. Включите выключатель «СЕТЬ» и нажмите кнопку «ВКЛ» выключателя A6.
16. Подключите генератор G4 к сети путем включения выключателя «СЕТЬ» и нажатия кнопки «ВКЛ» блока синхронизации A17.
17. По окончании разгона генератора G6 нажмите кнопку «ВКЛ» возбудителя G3.
18. Убедитесь, что генератор G6 вошел в режим синхронной работы с сетью, о чем должно свидетельствовать отсутствие колебаний значений его режимных параметров.
19. Отключите выключатель A6 нажатием на кнопку «ОТКЛ».
20. Вращая регулировочную рукоятку источника G2, нагрузите генератор G6 активной мощностью, например, до 30 Вт, которую определяйте утроением показаний ваттметра измерителя P2.
21. Вращая регулировочную рукоятку возбудителя G3, нагрузите генератор G6 реактивной мощностью с отстающим (опережающим) коэффициентом мощности, например, до 30 ВАр, которую определяйте утроением показаний варметра измерителя P2.
22. Для отключения генератора G6 от сети: разгрузите его по активной и реактивной мощностям, нажмите кнопку «ОТКЛ» блока синхронизации A17, поверните регулировочные рукоятки сначала у возбудителя G3, а затем у источника G2 против часовой стрелки до упора, отключите выключатель «СЕТЬ» возбудителя G3, источника G2, блока синхронизации A17, выключателя A6, измерителя P2 и указателя P3, отключите источник G1 нажатием на кнопку-гриб и последующим отключением ключа — выключателя.

## РАБОТА СИНХРОННОЙ МАШИНЫ С СЕТЬЮ

**Прочти это.** Рассмотрим синхронную машину в следующих условиях: машина подключена к шинам энергосистемы, мощность которой значительно больше мощности машины. Это означает, что изменение режима машины не будет влиять на режим энергосистемы, и поэтому принимаем  $U = \text{const}, f = \text{const}$ .

Обсудим установившийся, синхронный режим работы машины с сетью, при этом энергосистему представляем как эквивалентный генератор, выдающий на шины  $U = \text{const}, f = \text{const}$ . Синхронная машина развивает на зажимах обмотки якоря электродвижущую силу  $E$  величина которой управляется током возбуждения.

Для упрощения анализа возьмем неявнополюсную синхронную машину ( $x_d = x_q$ ) и примем  $r_a = 0$ , в результате уравнение напряжений синхронной машины (3.1) примет вид

$$\dot{E} + jx_d \dot{I} = \dot{U} \quad (3.8)$$

Из полученного уравнения определим ток якоря

$$\dot{I} = -j \frac{\dot{E} - \dot{U}}{x_d} = -j \frac{\Delta \dot{U}}{x_d} \quad (3.9)$$

Последнее уравнение определяет физические условия существования тока между синхронной машиной и сетью, и из этого уравнения следует два принципиальных факта:

- 1) причиной существования тока является разность  $\Delta \dot{U} = \dot{E} - \dot{U}$ ,
- 2) ток независимо от режимов машины и сети отстает от  $\Delta \dot{U}$  на  $90^\circ$ .

Покажем возможности уравнения (3.9) для анализа режимов синхронной машины. Рассмотрим несколько режимов.

**Режим 1.** Напряжение сети и ЭДС синхронной машины совпадают по фазе и равны по амплитуде (рис. 3.15 а). В этом режиме машина нейтральна по отношению к сети, так как  $\Delta \dot{U} = 0$  и  $\dot{I} = 0$ .

**Режим 2.** Увеличим вращающий момент на валу синхронной машины (например, на электростанции увеличим подачу пара в турбину), индуктор машины уйдет вперед по отношению к индуктору генератора сети, при этом вектор  $E$  будет опережать вектор  $U$ , появляется  $\Delta \dot{U} \neq 0$  и согласно (3.9) в якоре появляется ток (рис. 3.15 б). Из полученной диаграммы видно, что активная составляющая тока якоря  $I_a > 0$ , это означает, что машина стала отдавать активную мощность в сеть, и это естественно, так как машина получила активную мощность на вал при увеличении вращающего момента. Но реактивная мощность при этом потребляется машиной.

Увеличим ток возбуждения, что приведет к увеличению ЭДС до значения  $E_I$  и к изменению положения векторов на диаграмме (рис. 3.15 в). Синхронная машина по-прежнему работает в генераторном режиме, но теперь в ней появился избыток реактивной мощности, который она отдает в сеть (реактивная составляющая тока изменила знак).

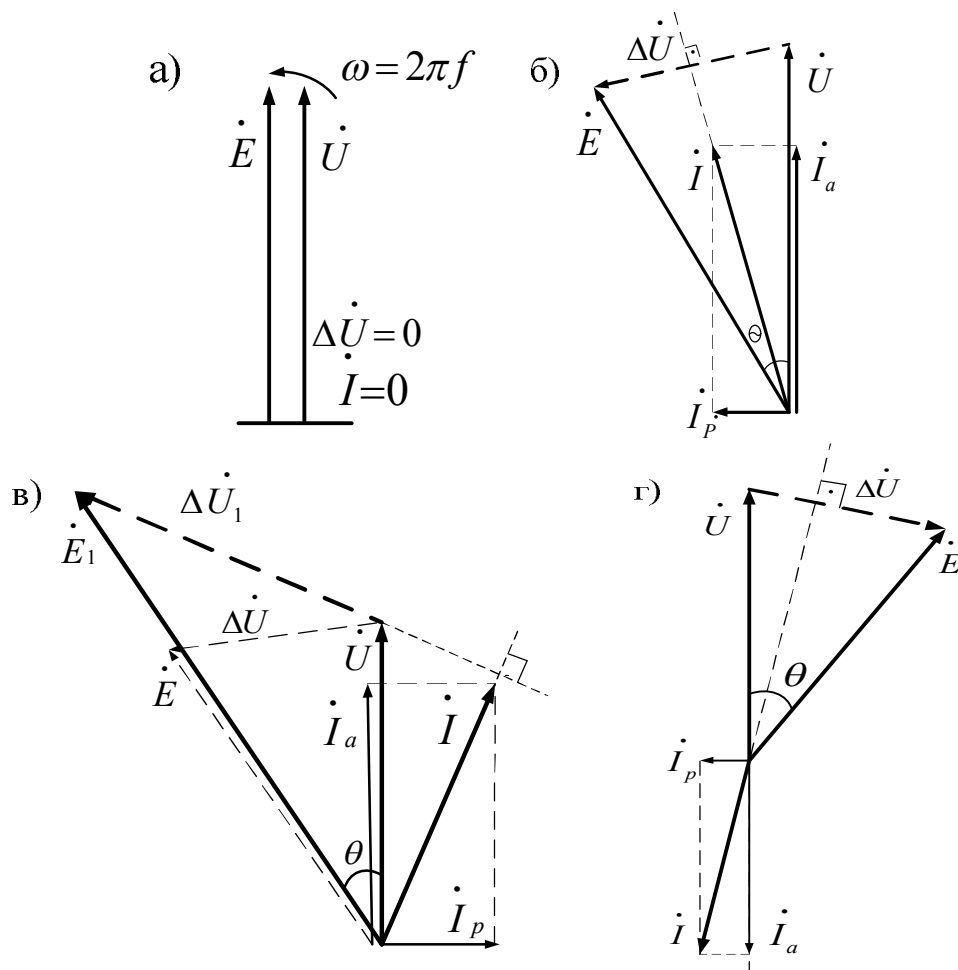


Рис. 3.15. Работа синхронной машины с сетью

*Режим 3.* Начнем рассуждение от нейтрального режима (рис. 3.15 а). Приложим к валу тормозной момент, это приведет к тому, что вектор  $E$  отстанет по фазе от вектора  $U$ , появится  $\Delta \dot{U} \neq 0$  и ток  $I$  (рис. 3.15 г). Из диаграммы видно, что активная составляющая тока изменила знак, это означает, что машина перешла в режим двигателя, то есть потребляет активную мощность из сети и выдает ее на вал.

Проведя построение диаграммы для нескольких значений  $E$  в двигательном режиме, читатель убедится в том, что поведение синхронной машины по отношению к реактивной мощности не зависит от знака активной мощности.

*Выводы:* 1) режим работы синхронной машины по активной мощности зависят только от знака приложенного момента;

2) режим работы синхронной машины по реактивной мощности не зависит от того работает машина в двигательном или генераторном режиме.

Более точные и строгие соотношения определяются угловыми характеристиками синхронной машины и ее  $U$ -образной характеристикой.

### Лабораторная работа 3.3

#### УГЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

$$P, Q = f(\Theta) \text{ при } U = \text{const}, I_b = \text{const}$$

Как установлено выше активная и реактивная мощности синхронной машины зависят от угла нагрузки  $\Theta$  между векторами  $E$  и  $U$ . Уравнения угловых характеристик активной и реактивной мощности синхронной машины выводятся на основе векторной диаграммы (рис. 3.6) и приведены ниже

$$P = \frac{mUE}{x_d} \sin \theta + \frac{mU^2}{2} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta. \quad (3.10)$$

$$Q = \frac{mUE}{x_d} \cos \theta + \frac{mU^2}{2} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cos 2\theta - \frac{mU^2}{2} \left( \frac{1}{x_q} + \frac{1}{x_d} \right). \quad (3.11)$$

Угол нагрузки является важнейшим режимным параметром не только отдельной синхронной машины, но и всей энергосистемы и ее отдельных фрагментов. Поэтому подробнее обсудим определение этого угла.

*Угол нагрузки  $\Theta$  — это угол между вектором электродвижущей силы  $E$  созданной полем возбуждения и вектором напряжения  $U$  в рассматриваемой точке сети, к которой подключена синхронная машина.*

Если рассматриваются процессы только в самой машине, напряжение  $U$  берется на ее вводах. Если в зону анализа процессов входят иные элементы, включенные в цепь машины (например, трансформатор, сеть и т.д.), то напряжение  $U$  берется на границе анализируемой зоны. При этом в  $x_d$  должны включаться индуктивные сопротивления всех элементов сети от машины до рассматриваемой точки.

#### Программа эксперимента

Эксперименты проводятся на специализированном стенде с использованием следующего оборудования.

#### Перечень аппаратуры

**G1** — источник синусоидального напряжения промышленной частоты;

**G2** — источник питания двигателя постоянного тока независимого возбуждения M2: обеспечивает регулируемое напряжение для обмотки якоря и постоянное напряжение для обмотки возбуждения;

**G6** — испытуемый синхронный генератор: связан с сетью (источником G1) через блок синхронизации A17, трехфазную трансформаторную группу A2, выключатель A6 и линейный реактор A14, моделирующий сопротивление электрической сети;

**G3** — возбудитель: служит для питания обмотки возбуждения синхронного генератора G6;

**G5, P3** — тахометр, измеряет частоту вращения электромашинного агрегата;

**P1** — измеритель линейного напряжения генератора G6;

**P2** — измеряет активную и реактивную мощности, развиваемые испытуемым генератором G6 (выполняет функции ваттметра и варметра);

**P4** — измеритель напряжения и частоты на зажимах генератора G6 и сети G1;

**P5** — измеритель угла нагрузки синхронного генератора G6.

<b>Обозначение на эл. схеме</b>	<b>Наименование</b>	<b>Код (см. на стенде)</b>
G1	Трехфазный источник питания	201.2
G2	Источник питания двигателя постоянного тока	206.1
G3	Возбудитель синхронной машины	209.2
G5	Преобразователь угловых перемещений	104
G6	Машина переменного тока	102.1
M2	Машина постоянного тока	101.2
A2	Трехфазная трансформаторная группа	347.1
A6	Трехполюсный выключатель	301.1
A14	Линейный реактор	314.2
A17	Блок синхронизации	319
P1	Блок мультиметров(3 шт)	508.2
P2	Измеритель мощностей	507.2
P3	Указатель частоты вращения	506.2
P4	Измеритель напряжений и частот	504.1
P5	Указатель угла нагрузки синхронной машины	505.2

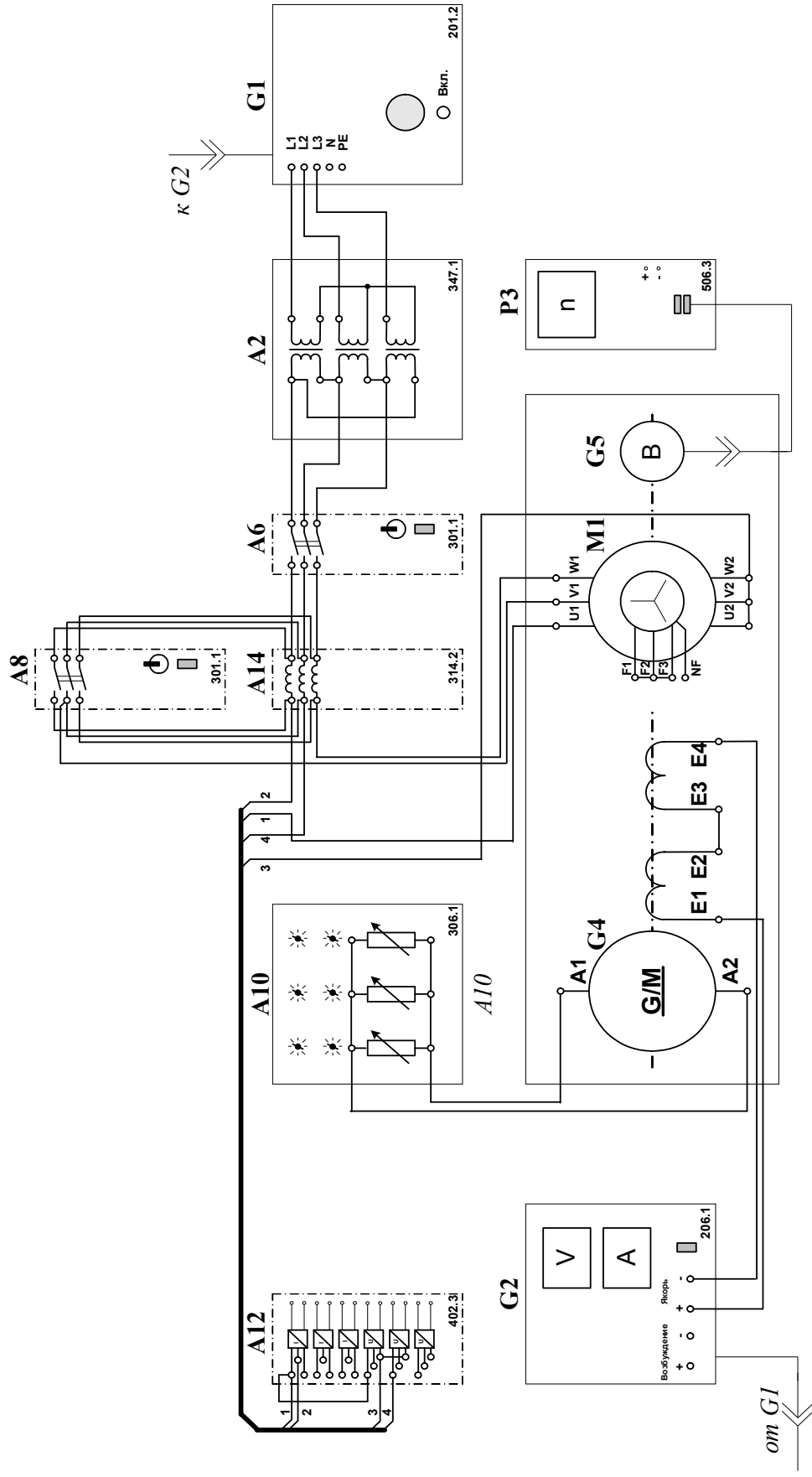


Рис. 3.16. Электрическая схема соединений для снятия угловых характеристик синхронного генератора

### Указания по снятию угловых характеристик синхронного генератора

1. Осуществите подключение к сети синхронного генератора G6 методом точной синхронизации.
2. Установите тумблер указателя угла нагрузки P5 в положение «200°».
3. Включите выключатель «СЕТЬ» указателя угла нагрузки P5.
4. Вращая регулировочные рукоятки источника G2 и возбuditеля G3, установите активную  $P_1$  и реактивную  $Q_1$  мощности генератора G6 равными нулю.
5. Потенциометрами «ГРУБО» и «ТОЧНО» установите стрелку указателя угла нагрузки P5 на нулевую отметку.
6. Установите тумблер указателя угла нагрузки P5 в положение «100°».
7. Установите вращением регулировочной рукоятки возбuditеля G3 желаемый ток возбуждения  $I_f$  генератора G6, например,  $1,0\text{ А}$  и не меняйте его в ходе эксперимента.
8. Вращая регулировочную рукоятку источника G2, изменяйте угол  $\delta$  нагрузки синхронного генератора G6 в диапазоне  $0...90^\circ$  и записывайте показания указателя P5, ваттметра и варметра (активная  $P_1$  и реактивная  $Q_1$  мощности фазы генератора G6) измерителя мощностей P2 и вольтметра (напряжение  $U$  генератора G6) блока мультиметров P1 в таблицу 3.4

Таблица 3.4

$\Theta$ , град										
$P_1$ , Вт										
$Q_1$ , В·Ар										
$U$ , В										

9. В случае перехода генератора G6 в асинхронный режим работы разгружайте его по активной мощности, вращая регулировочную рукоятку источника G2 против часовой стрелки до тех пор, пока не восстановится синхронная работа генератора G6 с сетью.

10. По завершении эксперимента произведите отключение генератора G6 от сети.

11. Используя данные таблицы 3.4, для каждого значения угла нагрузки  $\Theta$  вычислите полные активную  $P = 3P_1$  и реактивную  $Q = 3Q_1$  мощности генератора G6 и занесите их в таблицу 3.5.

Таблица 3.5

$\Theta$ , град										
$P$ , Вт										
$Q$ , вар										

12. Используя данные табл. 3.4 и 3.5, постройте искомые угловые характеристики  $P = f(\Theta)$ ,  $Q = f(\Theta)$  трехфазного синхронного генератора.



## ***U*-ОБРАЗНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА**

$$I = f(I_6) \text{ npu } P = \text{const}, U = \text{const}$$

**Свойства U-образной характеристики.** Из теории известно, что синхронные машины способны как генерировать, так и потреблять активную и реактивную мощности, причем в самых разных соотношениях. Но при этом существует влияние этих мощностей друг на друга, например, при увеличении активной мощности машина начинает терять ресурсы по реактивной мощности и т.д. U-образные характеристики наиболее информативны относительно взаимного влияния активной и реактивной мощностей машины и часто используются в технических системах регулирования режимов синхронных машин.

Обоснование  $U$ -образной формы кривых удобно сделать с помощью упрощенной векторной диаграммы изображенной на рис. 3.17. Эта диаграмма получается из точной диаграммы (рис. 3.6) при следующих допущениях:

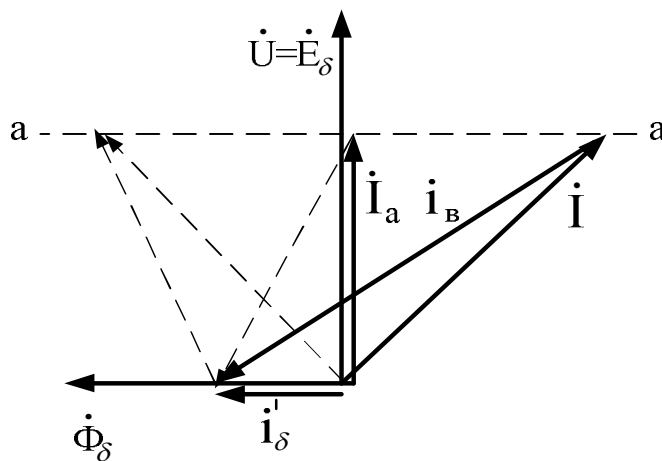
1)  $r_a=0, x_{a6}=0$  и тогда  $\dot{E}_\delta = \dot{U}$ ;

2) так как  $\Phi_\delta \perp E_\delta$ , то становятся справедливыми следующие связи  $\Phi_\delta \perp U_\delta \perp I_a$ , где  $I_a$  — активная составляющая тока якоря. Из условий  $P = mUI_a = \text{const}$ ,  $U = \text{const}$  следует  $I_a = \text{const}$ , это означает, что на рис. 3.17 конец вектора тока якоря  $I$  должен скользить по линии  $aa$ ;

3) так как результирующее магнитное поле в зазоре есть сумма полей возбуждения  $\Phi_{\phi}$  и реакции якоря  $\Phi_a$ , то справедливы следующие уравнения

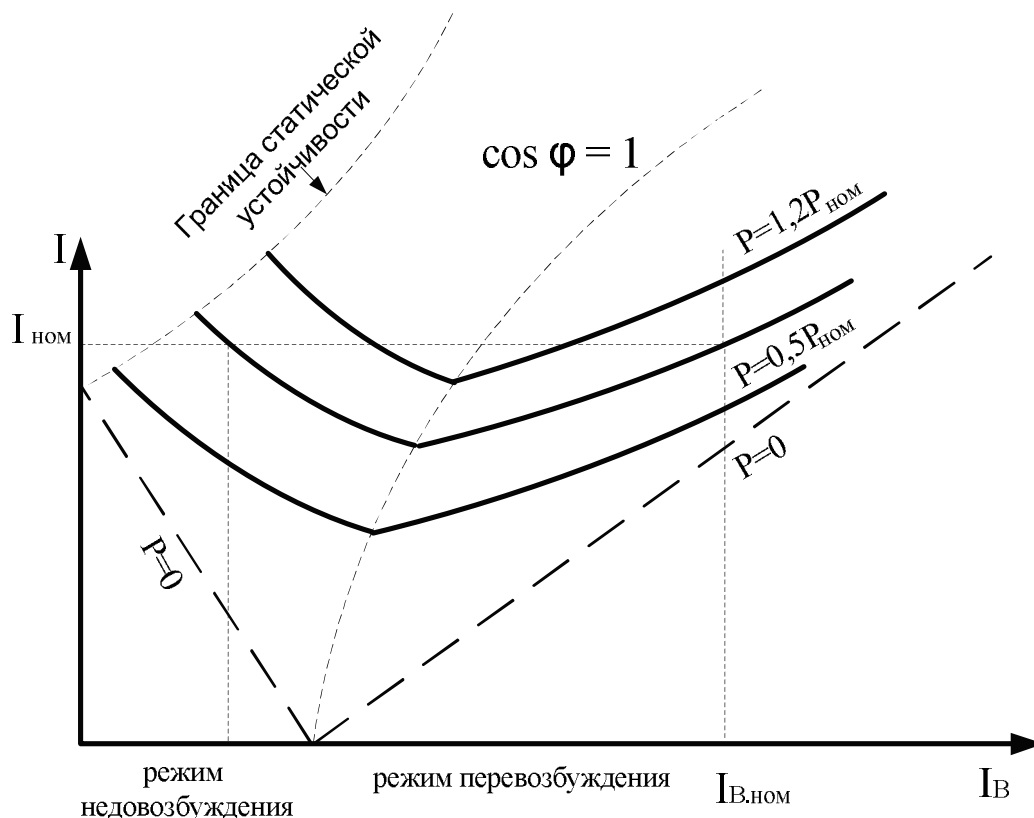
$$\dot{\Phi}_\delta = \dot{\Phi}_\beta + \dot{\Phi}_\alpha, \quad \dot{i}'_\delta = \dot{i}'_\beta + \dot{I}_\alpha.$$

Из упрощенной диаграммы видно, что изменение тока возбуждения вызывает седлообразный вид кривой тока якоря. Сначала, с уменьшением тока возбуждения  $I_e$  ток якоря уменьшается, при  $I = I_a$  принимает минимальное значение, затем опять начинает увеличиваться.



**Рис. 3.17. К обоснованию  $U$ -образной характеристики синхронной машины**

U-образные характеристики это семейство кривых построенных для нескольких постоянных значений активной мощности (рис. 3.18).



**Рис. 3.18. U-образная характеристика синхронного генератора**

Обратим внимание на некоторые принципиальные свойства синхронных машин, которые видны на U-образной характеристике.

1. В режиме перевозбуждения машина выдает реактивную мощность в сеть (эквивалентный конденсатор), при  $\cos\varphi=1$  нейтральна по реактивной мощности, при недовозбуждении потребляет реактивную мощность (эквивалентная индуктивность).

2. Одно и то же значение тока якоря может быть при разных режимах по реактивной мощности.

3. При номинальном токе якоря машина может развивать активную мощность больше номинальной (кривая  $P=1,2P_n$ ).

4. При постоянном токе возбуждения с увеличением активной мощности уменьшается реактивная мощность, и машина из перевозбужденного режима переходит в режим недовозбуждения.

5. Предельный потребляемый реактивный ток возможен в режиме холостого хода, но он ограничен значением  $I=U/x_d$ .

### Программа эксперимента

Эксперименты проводятся на специализированном стенде с использованием следующего оборудования.

### Перечень аппаратуры

**G1** — источник синусоидального напряжения промышленной частоты;

**G2** — источник питания двигателя постоянного тока независимого возбуждения М2: обеспечивает регулируемое напряжение для обмотки якоря и постоянное напряжение для обмотки возбуждения;

**G6** — испытуемый синхронный генератор: связан с сетью (источником G1) через блок синхронизации A17, трехфазную трансформаторную группу A2 и выключатель A6;

**G3** — возбудитель: служит для питания обмотки возбуждения синхронного генератора G6;

**G5, P3** — тахометр, измеряет частоту вращения электромашинного агрегата.

**P1** — измеритель тока возбуждения  $I_b$  и тока якоря  $I$  испытуемого синхронного генератора;

**P2** — измеряет активную и реактивную мощности, развиваемые испытуемым генератором G6 (выполняет функции ваттметра и варметра);

**P4** — измеритель напряжения и частоты на зажимах генератора G6 сети G1.

Обозначение на эл. схеме	Наименование	Код (см. на стенде)
G1	Трехфазный источник питания	201.2
G2	Источник питания двигателя постоянного тока	206.1
G3	Возбудитель синхронной машины	209.2
G5	Преобразователь угловых перемещений	104
G6	Машина переменного тока	102.1
M2	Машина постоянного тока	101.2
A2	Трехфазная трансформаторная группа	347.1
A6	Трехполюсный выключатель	301.1
A17	Блок синхронизации	319
P1	Блок мультиметров	508.2
P2	Измеритель мощностей	507.2
P3	Указатель частоты вращения	506.2
P4	Измеритель напряжений и частот	504.1



### Указания по снятию $U$ -образной характеристики синхронного генератора

1. Осуществите подключение к сети синхронного генератора G6 методом точной.
2. Включите выключатель «СЕТЬ» блока мультиметров P1.
3. Активизируйте мультиметры блока P1, задействованные в эксперименте.
4. Вращая регулировочную рукоятку источника G2, установите желаемую активную мощность генератора G6, например, 30 Вт, которую определяйте утроением показаний ваттметра измерителя P2, и поддерживайте ее в ходе эксперимента неизменной.
5. Вращая регулировочную рукоятку возбудителя G3, изменяйте ток возбуждения  $I_e$  генератора G6 (не превышая значения 2 А) и записывайте показания амперметров P1.1 (ток  $I_e$ ) и P1.2 (ток  $I$  статорной обмотки генератора G6) в таблицу 3.6.

Таблица 3.6

$I_e, A$										
$I, A$										

6. В случае перехода генератора G6 в асинхронный режим работы разгружайте его по активной мощности, вращая регулировочную рукоятку источника G2 против часовой стрелки до тех пор, пока не восстановится синхронная работа генератора с сетью.
7. По завершении эксперимента произведите отключение генератора G6 от сети.
8. Используя данные таблицы 3.6 постройте искомую  $U$ -образную характеристику  $I = f(I_e)$  трехфазного синхронного генератора.

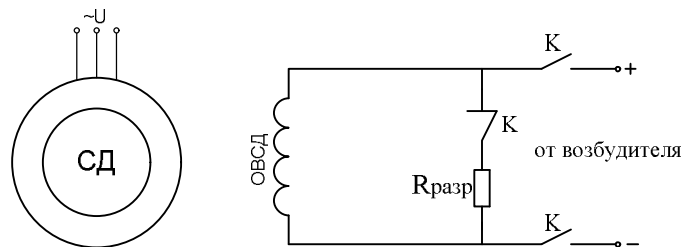
## ПУСК ТРЕХФАЗНОГО СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

**Проблемы пуска синхронных двигателей и способы их решения.** По своему принципу действия синхронный двигатель не развивает пусковой момент. Действительно, если подключить обмотку якоря к сети переменного тока, когда ротор возбужден и неподвижен, то за один период изменения тока якоря электромагнитный момент будет дважды менять свое направление, т.е. средний момент за период будет равен нулю.

Существует несколько способов пуска синхронных двигателей. Пуск при помощи вспомогательного пускового двигателя, обычно пусковым является асинхронный двигатель. Частотный пуск, при котором специальный преобразователь частоты изменяет частоту питающего напряжения от нуля до номинальной с такой скоростью, чтобы ротор успевал разогнаться в синхронном режиме с полем якоря. Однако эти способы пуска не нашли широкого применения и основным на сегодняшний день является асинхронный пуск.

**Алгоритм асинхронного пуска.** Для пуска синхронного двигателя его ротор необходимо разогнать с помощью дополнительного момента до частоты вращения, близкой к синхронной. Для создания такого момента на роторе размещается пусковая обмотка, которая выполнена подобно беличьей клетке асинхронной машины, но занимает лишь часть окружности ротора (в полюсные башмаки ротора закладывают латунные стержни, замкнутые накоротко двумя торцовыми кольцами).

Асинхронный пуск синхронного двигателя производится присоединением статора к сети, и двигатель разгоняется как асинхронный до подсинхронной скорости ( $s \approx 0,05$ ). При пуске обмотка возбуждения замыкается на разрядное сопротивление, чтобы избежать ее пробоя, так как при малой скорости ротора в ней возникают значительные перенапряжения. При достижении подсинхронной скорости срабатывает контактор  $K$ , обмотка возбуждения отключается от разрядного сопротивления и подключается к возбудителю. Далее синхронный двигатель самостоятельно втягивается в синхронизм.



**Рис. 3.20. Схема асинхронного пуска синхронного двигателя (СД):**

*ОВСД — обмотка возбуждения синхронного двигателя,*

*$R_{разр}$  — разрядное сопротивление*

Момент возбуждения синхронного двигателя автоматизируется двумя способами: в функции скорости или в функции тока.

Недостатком асинхронного пуска является большой пусковой ток (в 5—7 раз больше номинального тока). Индуктор синхронной машины в силу магнитной и электрической несимметрии не так хорошо приспособлен для развития асинхронного момента как асинхронный двигатель. И хотя асинхронный пуск синхронных двигателей является основным, он проходит тяжелее, чем у асинхронных двигателей.

Слабым местом большинства электроприводов с синхронными двигателям является электромашинный возбудитель, выполненный на базе генераторов постоянного тока. В настоящее время широкое распространение для возбуждения синхронных двигателей находят тиристорные возбудители. Они обычно поставляются в комплектном виде. Тиристорные возбудители надежны и имеют более высокий КПД. С их помощью легко решаются вопросы оптимального регулирования тока возбуждения, ограничение токов ротора и статора

синхронного двигателя в аварийных режимах. В настоящее время тиристорными возбудителями комплектуется большинство выпускаемых крупных синхронных электродвигателей. При этом они выполняют обычно следующие функции:

- пуск синхронного двигателя с включенным в цепь обмотки возбуждения пусковым резистором,
- автоматическая, оптимальная подача возбуждения синхронного электродвигателя,
- форсирование возбуждения при глубоких посадках напряжения сети,
- эффективное гашение поля синхронного,
- защита ротора синхронного двигателя от длительной перегрузки по току и коротких замыканий.

### Программа эксперимента

Эксперименты проводятся на специализированном стенде с использованием следующего оборудования.

### Перечень аппаратуры

**М1** — испытуемый 3х-фазный синхронный двигатель (получает питание от источника G1 через трансформаторную группу A2 и выключатель A6);

**G1** — источник синусоидального напряжения промышленной частоты;

**G2** — источник питания двигателя постоянного тока;

**G4** — генератор постоянного тока с независимым возбуждением;

**A10** — активные сопротивления, используются для нагрузки генератора G4;

**G3** — возбудитель синхронного двигателя M1;

**G5—P3** — тахометр, измеритель частоты вращения электромашиного агрегата;

**A9** — реостат, выполняет роль резистора синхронизации и подключается выключателем A8 к обмотке возбуждения синхронного двигателя M1 на этапе пуска последнего;

**A12** — датчики тока и напряжения;

**A14** — реактор, моделирует сопротивление кабеля, питающего двигатель M1;

**АСН0-АСН8, АСН1-АСН9, АСН2-АСН10** — аналоговые входы коннектора A4 через которые информация о частоте вращения, токе и напряжении статорной обмотки двигателя M1, вводятся в компьютер A5.

Обозначение на эл. схеме	Наименование	Код (см.на стенде)
G1	Трехфазный источник питания	201.2
G2	Источник питания двигателя постоянного тока	206.1
G3	Возбудитель синхронной машины	209.2
G4	Машина постоянного тока	101.2
G5	Преобразователь угловых перемещений	104
M1	Машина переменного тока	102.1
A2	Трехфазная трансформаторная группа	347.1
A4	Коннектор	330
A5	Персональный компьютер	550
A6, A8	Трехполюсный выключатель	301.1
A9	Реостат для цепи ротора машины переменного тока	307.1
A10	Активная нагрузка	306.1
A12	Блок датчиков тока и напряжения	402.3
A14	Линейный реактор	314.2
P3	Указатель частоты вращения	506.2

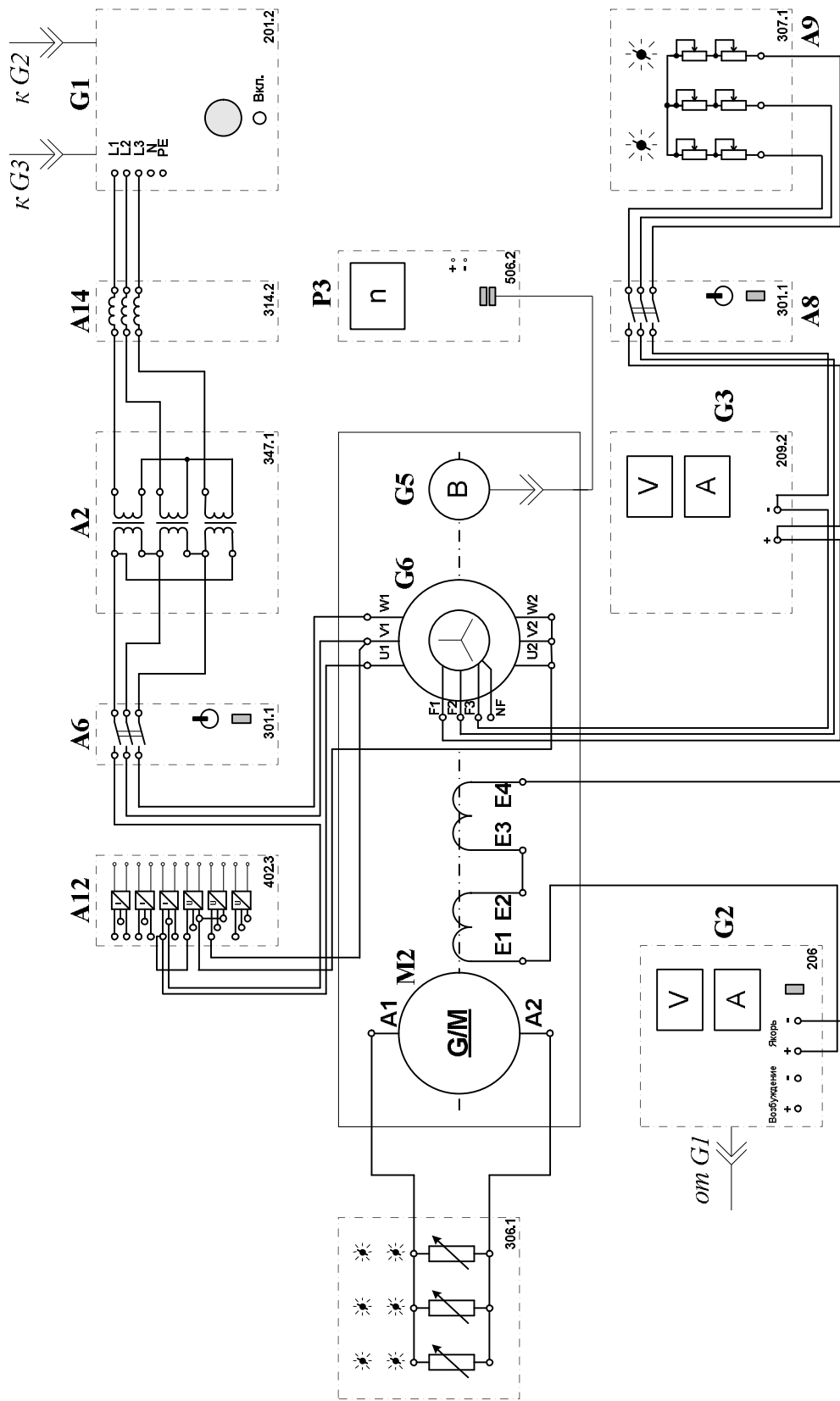


Рис. 3.21. Электрическая схема соединений пуска синхронного двигателя



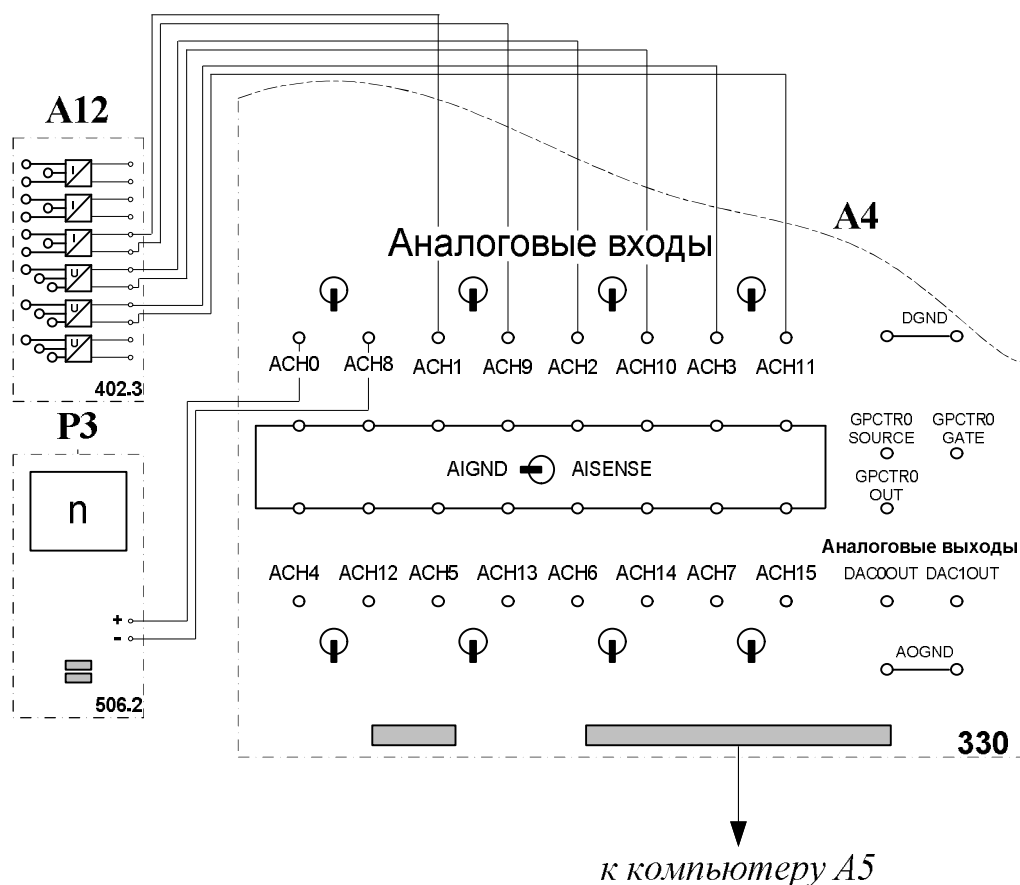



Рис. 3.22. Электрическая схема соединений (продолжение)

### Указания по проведению эксперимента

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока (прилож.1).
3. Соедините гнезда защитного заземления «» устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» источника G1.
4. Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
5. Переключатели режима работы источника G2, возбудителя G3 и выключателей А6 и А8 установите в положение «РУЧН.».
6. Регулировочные рукоятки источника G2 и возбудителя G3 поверните против часовой стрелки до упора.
7. Установите в каждой фазе активной нагрузки А10 ее суммарную величину 100%.
8. В трехфазной трансформаторной группе А2 установите номинальное напряжение вторичных обмоток трансформаторов, равное 220 В.
9. Установите в каждой фазе реостата А9 суммарное сопротивление 8 Ом.
10. Приведите в рабочее состояние персональный компьютер А5, и запустите прикладную программу «Регистратор режимных параметров машины переменного тока».

11. Включите выключатели «СЕТЬ» выключателей А6 и А8, указателя частоты вращения Р3 и блока А12 датчиков тока и напряжения.
12. Включите выключатель А8 кнопкой «ВКЛ».
13. Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
14. Включите выключатель «СЕТЬ» возбудителя G3 и, вращая его регулировочную рукоятку, установите на его выходе напряжение, равное 20 В.
15. Включите выключатель «СЕТЬ» источника G2 и, вращая его регулировочную рукоятку, установите напряжение на его выходе, например, 50 В.
16. Нажмите на виртуальную кнопку «Запустить» на экране компьютера.
17. Нажмите последовательно кнопки «ВКЛ» источника G2, выключателя А6, возбудителя G3 (после разгона двигателя М1), спустя, например, 5 с кнопку «ОТКЛ» выключателя А8 и затем не позднее, чем через 10 с, остановите сканирование данных. В результате должен осуществиться пуск нагруженного синхронного двигателя М1 и должны записаться в компьютер данные о режимных параметрах на этапе пуска.
18. Нажмите кнопку «ОТКЛ» источника G1.
19. Отключите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.
20. Используя возможности программы «Регистратор режимных параметров машины переменного тока», проанализируйте отображенные на мониторе компьютера механическую характеристику и временные зависимости тока статорной обмотки, электромагнитного момента, частоты вращения синхронного двигателя при пуске его в ход.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ ПО РАЗДЕЛУ «СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ»

(\* отмечены задачи повышенной сложности)

### Принцип действия и конструкции синхронных машин

3.1. Объясните принцип работы трехфазного синхронного генератора. По каким физическим признакам синхронные машины называются «синхронными».

3.2. Синхронные машины относятся к машинам переменного тока, но в них шихтуется только магнитная система статора (якоря). Объясните, почему не шихтуется индуктор этих машин.

3.3. Укажите конструктивные отличия явнополюсных и неявнополюсных синхронных машин и области их применения.

### Реакция якоря

*От того насколько глубоко Вы поняли физические процессы связанные с магнитным полем реакции якоря зависит успех в освоении практически всех вопросов теории и эксплуатации синхронных машин.*

3.4. Дайте характеристику магнитного поля реакции якоря  $\Phi_a$  по следующим позициям:

- током какой обмотки машины создается поле  $\Phi_a$ ;
- нарисуйте контура, по которым проходят: *главное поле* реакции якоря и *поле рассеяния*;
- с какой скоростью движется главное поле относительно якоря и относительно индуктора;
- в каких обмотках машины поле  $\Phi_a$  индуцирует ЭДС (рассмотреть только синхронный установившийся режим).

3.5. Определите положение главного поля  $\Phi_a$  относительно индуктора при чисто индуктивном токе якоря.

3.6. Определите положение главного поля относительно индуктора при активно-индуктивной нагрузке при угле между  $E$  и  $I_\psi = 45^\circ$ .

3.7. Какие преимущества дает введение в теорию синхронных машин системы координат «d-q»? Почему эта система координат жестко связана с индуктором?

3.8. Дайте физическое толкование индуктивным сопротивлениям синхронной машины  $x_d, x_q$ . Объясните влияние воздушного зазора на величину этих сопротивлений.

3.9. Нарисуйте векторную диаграмму магнитных потоков и ЭДС для активно-емкостной нагрузки генератора.

### Угловые характеристики мощности и статическая устойчивость СМ

3.10. Явно полюсные СМ способны развивать активную и реактивную мощности без возбуждения ( $E=0$ ). Объясните природу этого эффекта.

3.11. Дайте физическое толкование угла нагрузки  $\theta$ .

3.12. Дайте определение понятия «статическая устойчивость синхронной машины».

3.13. Докажите что при углах нагрузки  $90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$  синхронный генератор не может быть статически устойчивым.

3.14. Докажите что при углах нагрузки  $-180^0 \leq \theta \leq -90^0$  синхронный двигатель не может быть статически устойчивым.

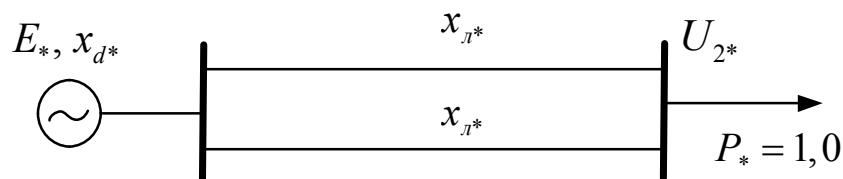
3.15. Какие параметры синхронной машины влияют на величину ее статической устойчивости?

3.16. Определите угол нагрузки синхронного генератора при следующих режимных параметрах (заданы в относительных единицах):

$$E_* = 1,6; \quad U_* = 1,0; \quad P_* = 0,8; \quad x_{d*} = 1,97.$$

Оцените возможность работы генератора с точки зрения статической устойчивости.

Какие меры надо принять, чтобы при  $P_* = 0,8$  генератор имел достаточный запас устойчивости, например,  $\theta = 25^0$ .



3.17. Синхронный генератор работает на 2-х цепную ЛЭП и с шин  $U_{2*}$  отдается активная мощность  $P_* = 1,0$ . Остальные параметры даны ниже:

$$U_{2*} = 0,9; \quad x_{d*} = 1,84; \quad x_{L*} = 0,6.$$

Определите значение ЭДС, которое должна обеспечивать система возбуждения генератора, чтобы при аварийном отключении одной цепи был обеспечен допустимый запас устойчивости, например,  $\theta = 60^0$ .

### Синхронизация генераторов с сетью

3.18. Укажите условия включения синхронного генератора на параллельную работу с сетью.

3.19. Объясните работу синхроноскопа при схеме соединения «вращающий огонь».

3.20. Объясните работу синхроноскопа при схеме соединения «на погасание»

3.21. Покажите, что при схеме синхроноскопа «на погасание» при ошибочной фазировке генератора с сетью на синхроноскопе появится вращающийся огонь.

3.22. Синхроноскоп собран по схеме «на погасание». В какой момент времени генератор должен подключаться к сети?

3.23. Дайте оценку достоинств и недостатков методов точной и грубой синхронизации.

### Параллельная работа синхронной машины с сетью и ее U-образные характеристики

*Как в практических расчетах, так и в научных исследованиях связанных с синхронными машинами часто используется формула определяющая ток, которым СМ обмениваются с сетью*

$$\dot{I} = \frac{\dot{E} - \dot{U}}{jx_d} = -j \frac{\Delta \dot{U}}{x_d}. (*)$$

*Использование этой формулы, а также свойства U-образной характеристики синхронной машины позволят читателю найти решение многих режимных задач.*

3.24. Определите величину тока синхронного генератора при:

$$E_* = 1,0; \quad U_* = 1,0; \quad x_{d*} = 1,8; \quad \theta = 30^\circ.$$

3.25. Синхронный генератор работает при  $I = I_n$ ,  $U = U_n$  и перевозбужден, то есть отдает в сеть активную и реактивную мощности. Какие регулировки необходимо произвести в генераторе, чтобы при тех же значениях тока, напряжения и активной мощности выполнить условие  $Q = 0$ ?

3.26. Известно, что перевозбужденная синхронная машина обладает большей статической устойчивостью, чем недовозбужденная. Покажите это:

- с помощью  $U$ -образной характеристики;
- с помощью угловых характеристик.

3.27. Покажите, что при неизменном токе возбуждения синхронной машины увеличение ее активной мощности приводит к изменению реактивной мощности и угла  $\theta$ . Объяснения дайте с использованием:

- $U$ -образной характеристики;
- угловых характеристик;
- векторной диаграммы.

3.28. \* Определите величину ЭДС, которую должна создавать система возбуждения генератора для выполнения следующих условий:  $U_* = 1,0$ ;  $I_* = 0,9$ ;  $x_{d*} = 1,75$ ;  $\cos \varphi = 0,85$  — перевозбужденный.

Дайте оценку статической устойчивости этого режима.

### **Синхронный двигатель (СД) и синхронный компенсатор (СК)**

3.29. Известно, что синхронный двигатель по своему принципу действия не создает пусковой момент. Объясните это.

3.30. Укажите достоинства и недостатки синхронного двигателя по сравнению с асинхронным.

3.31. Назовите возможные способы пуска синхронного двигателя.

3.32. Объясните конструкцию пусковой обмотки синхронного двигателя. Почему эта обмотка выполняется из материала с повышенным активным сопротивлением?

3.33. Нарисуйте схему асинхронного пуска СД и опишите алгоритм пуска.

3.34. Объясните, почему при пуске двигателя обмотку возбуждения сначала замыкают на активное сопротивление.

3.35. Объясните назначение синхронного компенсатора.

3.36. В каком режиме по активной мощности работает СК, почему в этой машине делают предельно малый воздушный зазор.

3.37. Чем ограничивается предельная потребляемая реактивная мощность синхронного компенсатора.

3.38. Почему для синхронного компенсатора вопрос о статической устойчивости не имеют принципиального значения?

## Раздел 4

### МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

#### ОСНОВНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

На рис. 4.1 дано условное изображение машины постоянного тока, где показано, что якорь машины вращается со скоростью  $n$ , в постоянном магнитном поле возбуждения  $\Phi$  которое создано током обмотки возбуждения  $I_B$ . Обмотка якоря имеет сопротивление  $R_a$ , подключена к сети постоянного напряжения  $U$  и в ней индуцируется электродвижущая сила  $E$ . Рассмотрим установившийся режим работы машины.

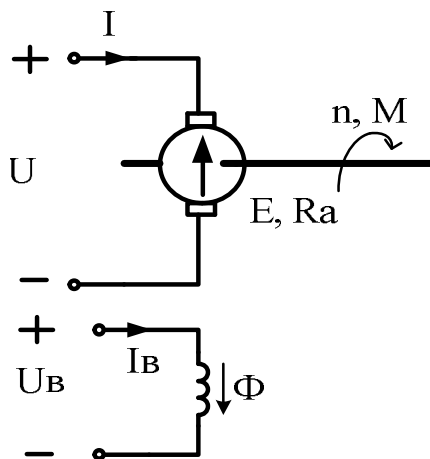


Рис. 4.1. Условное изображение машины постоянного тока

**Электромагнитные процессы в обмотке возбуждения.** В установившемся режиме обмотка возбуждения находится в постоянном магнитном поле, поэтому в ней не индуцируется ЭДС. А так как она подключена к источнику постоянного напряжения  $U_B$ , в ней протекает ток определяемый законом Ома  $I_B = U_B / R_B$ . Этот ток создает в машине постоянный магнитный поток возбуждения  $\Phi = k_B I_B$ , здесь  $k_B$  — коэффициент учитывающий конструктивные параметры машины. Никаких иных процессов в обмотке возбуждения в установившемся режиме не происходит.

**Электромагнитные процессы в обмотке якоря** определяются следующей группой уравнений:

$$E = c_E \Phi n, \quad (4.1)$$

$$M = c_m \Phi I, \quad (4.2)$$

$$U = E + I R_a. \quad (4.3)$$

Происхождение этих уравнений следующее.

Уравнение 4.1 — при вращении обмотки якоря в магнитном поле возбуждения  $\Phi$  в ней индуцируется электродвижущая сила  $E$ , где  $c_E$  — коэффициент пропорциональности по ЭДС, учитывающий конструктивные параметры машины, такие как число витков обмоток, длину якоря и т.д.

Уравнение 4.2 — проводники обмотки якоря с током  $I$  находятся в магнитном поле возбуждения  $\Phi$ , поэтому на них действует электромагнитная сила и на валу машины создается момент  $M$ , здесь  $c_m$  — коэффициент пропорциональности по моменту.

Уравнение 4.3 — при подключении обмотки якоря в сеть с напряжением  $U$  в ней течет ток  $I$  и для образованного контура справедливо уравнение баланса напряжений (уравнение написано для режима двигателя).

Уравнения (4.1—4.3) позволяют получить все основные эксплуатационные характеристики машины постоянного тока. Покажем это на примере двигательного режима машины.

Основными эксплуатационными характеристиками двигателя являются скоростная  $n = f(I)$  и механическая  $n = f(M)$  характеристики. Читателю не составит труда преобразовать уравнения 4.1—4.3 и получить уравнения, которые записаны ниже

$$n = \frac{U - IR_a}{c_E \Phi}, \quad (4.4)$$

$$n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{R_a}{c_E c_m \Phi^2} M. \quad (4.5)$$

Из этих уравнений видна определяющая роль системы возбуждения на эксплуатационные свойства машины, поэтому тип машины постоянного тока определяется схемой подключения обмоток возбуждения (рис. 4.2).

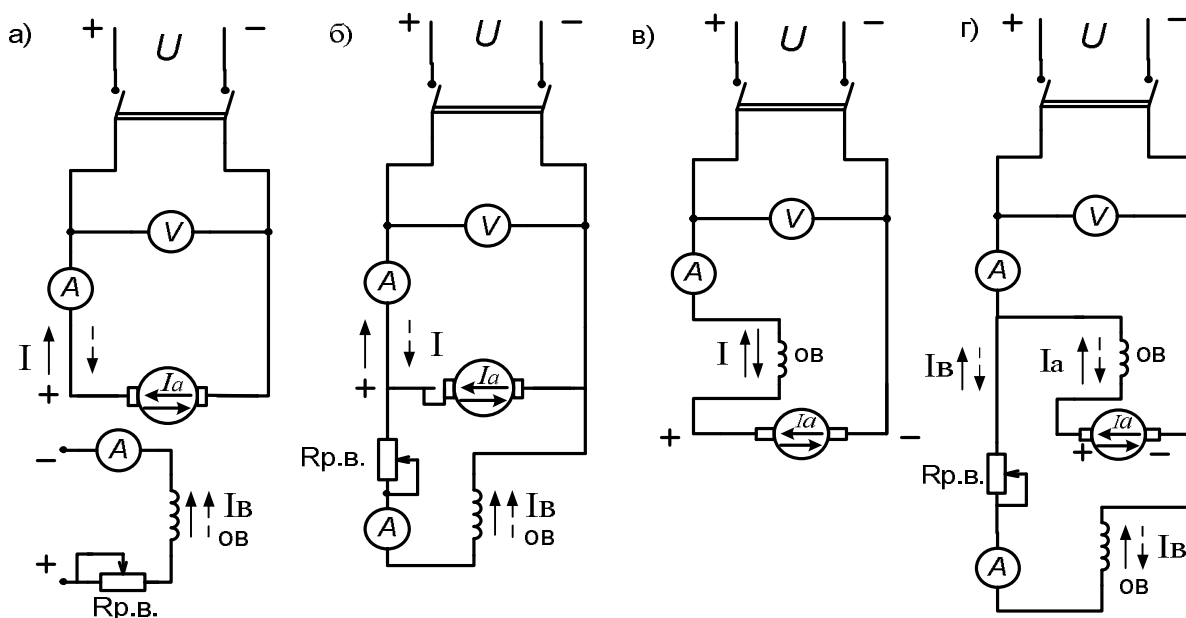


Рис. 4.2. Электрические схемы машин постоянного тока с различным возбуждением:

а) независимое; б) параллельное; в) последовательное; г) смешанное (сплошные стрелки — направление токов в генераторе, штриховые стрелки — в двигателе)

### Эксплуатационные характеристики двигателей постоянного тока (ДПТ)

**Двигатель независимого возбуждения** (рис. 4.2 а). В этой машине обмотка возбуждения включается на отдельный источник и поэтому ток возбуждения, а, следовательно, и магнитный поток, не зависят от нагрузки машины. Характеристики двигателя определяют по уравнениям 4.4 и 4.5 при условии  $\Phi = const$ , они приведены на рис. 4.3.

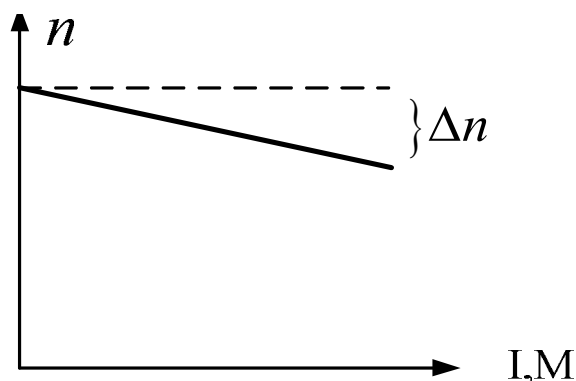


Рис. 4.3. Скоростная и механическая характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения

**Регулирование скорости вращения.** Из уравнений (4.4 или 4.5) следуют три возможных способа:

*Способ 1* — изменением напряжения якоря  $U$ . Так как напряжение не может превышать номинальное значение, этот способ обеспечивает регулирование скорости вниз. При этом регулировании сохраняются высокий КПД и жесткость механической характеристики, не нарушается настройка коллекторно-щеточного аппарата. Этот способ называют «якорным регулированием», в практике это наиболее распространенный способ.

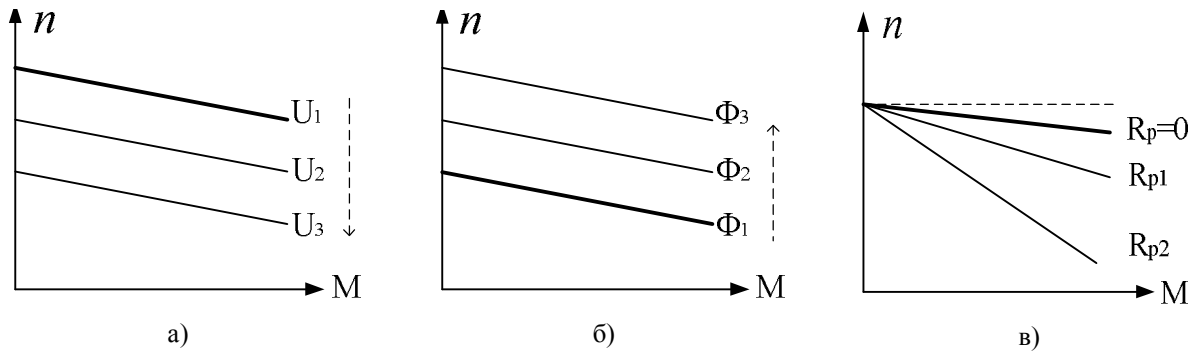
**Примечание.** Под жесткостью механической характеристики понимается относительное изменение скорости вращения при переходе от режима холостого хода к режиму номинальной нагрузки при  $I_B = \text{const}$ ,  $U = \text{const}$ .

$$k_{\text{жест}} = \frac{n_{xx} - n_n}{n_n}.$$

*Способ 2* — изменением потока возбуждения  $\Phi$ . Этот способ допускает только уменьшение потока и согласно уравнению (4.4) обеспечивает регулирование скорости вверх. При этом регулировании также сохраняются высокий КПД и жесткость механической характеристики, но при глубоком уменьшении потока нарушается работа коллекторно-щеточного аппарата (под действием поля реакции якоря может происходить так называемое «опрокидывание полюсов» и машина входит в режим «кругового огня», то есть короткого замыкания якоря.). Этот способ имеет меньшее практическое применение.

*Способ 3* — изменением сопротивления цепи якоря. Для этого в цепь якоря включается добавочное регулируемое сопротивление  $R_p$ , то есть в уравнениях (4.4, 4.5) вместо  $R_a$  ставится  $(R_a + R_p)$ . Этот способ обеспечивает регулирование скорости вниз. При этом регулировании резко уменьшается КПД из-за потерь в добавочном сопротивлении  $I^2 R_p$  и уменьшается жесткость механической характеристики. Это регулирование используется редко и только в машинах небольшой мощности (рис. 4.4 в).





**Рис. 4.4. Регулирование скорости вращения двигателя постоянного тока независимого возбуждения:**  
 а) изменением напряжения якоря ( $U_1 > U_2 > U_3$ ); б) изменением тока возбуждения ( $\Phi_1 > \Phi_2 > \Phi_3$ );  
 в) изменением сопротивления цепи якоря ( $R_{p2} > R_{p1}$ )

**Пуск двигателя.** При пуске двигателя  $n=0$  и электродвижущая сила в обмотке якоря отсутствует  $E=0$ , и согласно уравнению (4.4) пусковой ток ограничивается только сопротивлением цепи якоря

$$I = U / R_a. \quad (4.6)$$

В машинах постоянного тока сопротивление якоря составляет десятые и даже сотые доли Ома, поэтому двигатели при пуске потребляют большой пусковой ток  $I_n = (40—50)I_{ном}$ . Для облегчения условий пуска ток возбуждения при пуске должен быть предельным, чтобы максимально быстро создать ЭДС в обмотке якоря. Из уравнения (4.6) следует два способа уменьшения пускового тока: уменьшение напряжения; 2) введение в цепь якоря пускового сопротивления ( $R_a + R_{п}$ ).

**Двигатель параллельного возбуждения** (рис. 4.2 б). В этой машине обмотка возбуждения включается параллельно обмотке якоря на общий источник. Если принять, что источник достаточно мощный и его напряжение при изменении нагрузки неизменно, то тогда ток возбуждения и магнитный поток не зависят от нагрузки машины. Поэтому характеристики двигателей независимого и параллельного возбуждения практически совпадают.

**Двигатель последовательного возбуждения** (рис. 4.2 в). В этой машине обмотка возбуждения включается последовательно с обмоткой якоря, поэтому ток возбуждения, а значит и магнитный поток возбуждения, пропорционален току нагрузки. Это можно записать так  $\Phi = k_B I$ . Это обстоятельство кардинально меняет эксплуатационные свойства машины.

В группу уравнений (4.1—4.3) подставим  $\Phi = k_B I$  и вновь получим скоростную и механическую характеристики. Результаты преобразований показаны ниже

$$n = \frac{U}{c_E k_B I} - \frac{R_a}{c_E k_B}. \quad (4.7)$$

$$n = \frac{\sqrt{c_m} U}{c_E \sqrt{k_B} \sqrt{M}} - \frac{R_a}{c_E k_B}. \quad (4.8)$$

Как видно из этих уравнений скоростная и механическая характеристики двигателя являются уравнениями гиперболы  $n \sim 1/I \sim 1/\sqrt{M}$  и имеют следующие эксплуатационные особенности (рис. 4.5).

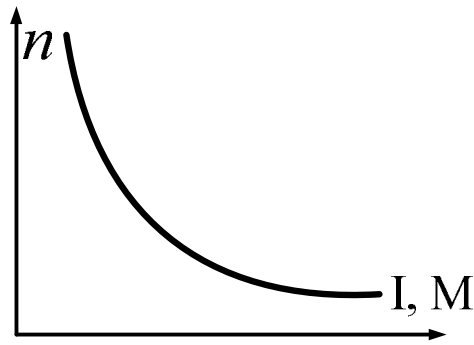


Рис. 4.5. Скоростная и механическая характеристики ДПТ последовательного возбуждения

При уменьшении нагрузки скорость вращения резко возрастает и может достигать опасных для двигателя величин. Поэтому подключение двигателя последовательного возбуждения к нагрузке запрещается через ременные передачи. При пуске ( $n = 0$ ) двигатель развивает значительный пусковой момент в связи с чем он используется в транспорте с электроприводом и в механизмах работающих на упор.

**Двигатель смешанного возбуждения** (рис. 4.2 з). В этом двигателе установлены две обмотки возбуждения параллельная, с магнитным потоком  $\Phi_{нар}$ , и последовательная с потоком  $\Phi_{посл}$ . Обмотки могут включаться как согласно, так и встречно, что отражено в уравнениях характеристик знаками ( $\pm$ )

$$n = \frac{U - IR_a}{c_{e1}\Phi_{нар} \pm c_{e2}\Phi_{посл}}, \quad (4.9)$$

$$n = \frac{U}{c_{e1}\Phi_{нар} \pm c_{e2}\Phi_{посл}} - \frac{R_a}{c_m(c_{e1}\Phi_{нар} \pm c_{e2}\Phi_{посл})^2} M. \quad (4.10)$$

При работе на одной из обмоток возбуждения обеспечиваются характеристики двигателя соответственно параллельного или последовательного возбуждения, при совместной работе обмоток возбуждения обеспечивает чрезвычайно широкий диапазон изменения скоростной и механической характеристик (рис. 4.6).

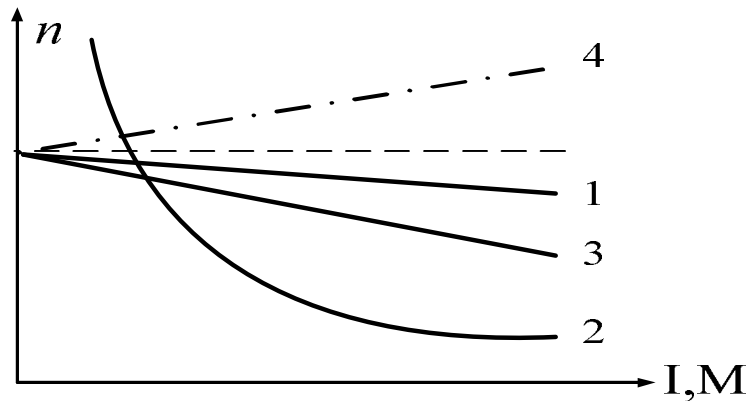


Рис. 4.6. Иллюстрация возможностей регулирования двигателя смешанного возбуждения:

- 1 — ДПТ параллельного возбуждения; 2 — ДПТ последовательного возбуждения;
- 3 — ДПТ смешанного возбуждения при согласном включении обмоток возбуждения;
- 4 — смешанного возбуждения при встречном включении обмоток возбуждения.

### Лабораторная работа 4.1

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДПТ НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ $n = f(M)$

### Программа экспериментов

Эксперименты проводятся на специализированном стенде с использованием следующего оборудования.

### Перечень аппаратуры

**G1** — источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

**M2** — испытуемый двигатель постоянного тока с независимым возбуждением.

**G2** — источник постоянного напряжения используется:

1) для питания обмотки якоря испытуемого двигателя (регулируемый);

2) для питания обмотки возбуждения испытуемого двигателя (нерегулируемый).

**G6** — нагрузочная машина (синхронный генератор питает активную нагрузку A10).

**G3** — возбудитель синхронного генератора G6.

**(G5—P3)** — измеритель частоты вращения электромашинного агрегата (выполняет функции тахометра).

**P1** — блок мультиметров измеряет напряжение и ток обмотки якоря испытуемого двигателя M2.

Обозначение на эл. схеме	Наименование	Код (см. на стенде)
G1	Трехфазный источник питания	201.2
G2	Источник питания двигателя постоянного тока	206.1
G3	Возбудитель синхронной машины	209.2
G5	Преобразователь угловых перемещений	104
G6	Машина переменного тока	102.1
M2	Машина постоянного тока	101.2
A10	Активная нагрузка	306.1
P1	Блок мультиметров	508.2
P3	Указатель частоты вращения	506.2



### Указания по проведению эксперимента

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока (прилож. 1).
3. Соедините гнезда защитного заземления «⊕» устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» трехфазного источника питания G1.
4. Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
5. Переключатели режима работы источника G2 и возбудителя G3 установите в положение «РУЧН.».
6. Регулировочные рукоятки источника G2 и возбудителя G3 поверните против часовой стрелки до упора.
7. Установите в каждой фазе активной нагрузки A10 суммарную величину 100%.
8. Включите выключатель «СЕТЬ» блока мультиметров P1 и указателя частоты вращения P3.
9. Активизируйте мультиметры блока P1, задействованные в эксперименте.
10. Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
11. Включите выключатель «СЕТЬ» и нажмите кнопку «ВКЛ» источника G2.
12. Вращая регулировочную рукоятку источника G2, разгоните двигатель M2 до частоты вращения  $n$ , например, равной  $1500 \text{ мин}^{-1}$ .
13. Включите выключатель «СЕТЬ» и нажмите кнопку «ВКЛ» возбудителя G3. Вращая регулировочную рукоятку возбудителя G3, изменяйте ток якоря  $I$  (ток не должен превышать значения  $1,0 \text{ А}$ ) двигателя M2 и заносите показания амперметра P1.1 (ток  $I$ ), вольтметра P1.2 (напряжение  $U$  якоря двигателя M2) и указателя P3 (частота вращения  $n$ ) в таблицу 4.1

Таблица 4.1

$I, \text{ А}$								
$U, \text{ В}$								
$n, \text{ мин}^{-1}$								
$M, \text{ Нм}$								

14. По завершении эксперимента сначала у возбудителя G3, а затем у источника G2 поверните регулировочную рукоятку против часовой стрелки до упора, нажмите кнопку «ОТКЛ» и отключите выключатель «СЕТЬ». Отключите источник G1 нажатием на кнопку-гриб.

15. Используя данные таблицы 4.1, для каждого значения частоты вращения  $n$  вычислите по формуле

$$M = \frac{60}{2\pi n} (U - 65 \cdot I) I \text{ [Н·м]}$$

и постройте механическую характеристику  $n = f(M)$ .

## Лабораторная работа 4.2

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДПТ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ $n = f(M)$

#### Программа экспериментов

Эксперименты проводятся на специализированном стенде с использованием следующего оборудования.

#### Перечень аппаратуры

**G1** — источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

**M2** — испытуемый двигатель постоянного тока последовательного возбуждения.

**G2** — источник постоянного напряжения (регулируемый): используется для питания обмотки якоря испытуемого двигателя;

**G6** — нагрузочная машина (синхронный генератор активной нагрузкой A10).

**G3** — возбудитель синхронного генератора G6.

**(G5—P3)** — измеритель частоты вращения электромашинного агрегата (выполняет функции тахометра).

**P1** — блок мультиметров измеряет напряжение и ток обмотки якоря испытуемого двигателя M2.

Обозначение на эл. схеме	Наименование	Код (см. на стенде)
G1	Трехфазный источник питания	201.2
G2	Источник питания двигателя постоянного тока	206.1
G3	Возбудитель синхронной машины	209.2
G5	Преобразователь угловых перемещений	104
G6	Машина переменного тока	102.1
M2	Машина постоянного тока	101.2
A10	Активная нагрузка	306.1
P1	Блок мультиметров	508.2
P3	Указатель частоты вращения	506.2

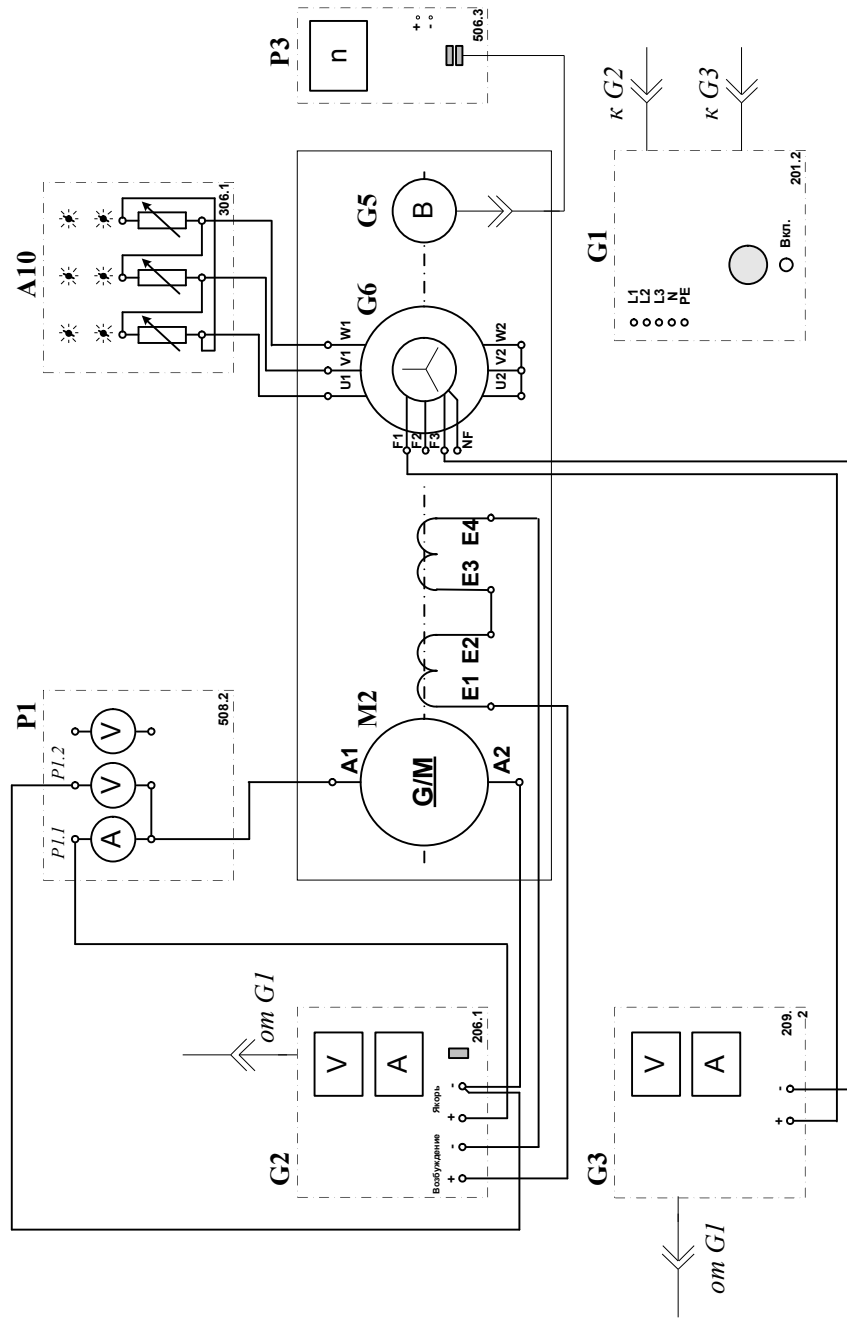


Рис. 4.8. Электрическая схема для испытания двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

### Указания по проведению эксперимента


1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока (прилож.1).
3. Соедините гнезда защитного заземления «» устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» трехфазного источника питания G1.
4. Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
5. Переключатели режима работы источника G2 и возбудителя G3 установите в положение «РУЧН».
6. Регулировочные рукоятки источника G2 и возбудителя G3 поверните против часовой стрелки до упора.
7. Установите в каждой фазе активной нагрузки A10 суммарную ее величину 100%.
8. Включите выключатель «СЕТЬ» блока мультиметров P1 и указателя частоты вращения P3.
9. Активизируйте мультиметры блока P1, задействованные в эксперименте.
10. Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
11. Включите выключатель «СЕТЬ» и нажмите кнопку «ВКЛ» источника G2.
12. Вращая регулировочную рукоятку источника G2, разгоните двигатель M2 до частоты вращения  $n$ , например, равной  $1500 \text{ мин}^{-1}$ .
13. Включите выключатель «СЕТЬ» и нажмите кнопку «ВКЛ» возбудителя G3. Вращая регулировочную рукоятку возбудителя G3, изменяйте ток якоря  $I$  (ток не должен превышать значения  $1,0 \text{ А}$ ) двигателя M2 и заносите показания амперметра P1.1 (ток  $I$ ), вольтметра P1.2 (напряжение  $U$  якоря двигателя M2) и указателя P3 (частота вращения  $n$ ) в таблицу 4.2.

Таблица 4.2

I, А								
U, В								
$n, \text{ мин}^{-1}$								
M, Нм								

14. По завершении эксперимента сначала у возбудителя G3, а затем у источника G2 поверните регулировочную рукоятку против часовой стрелки до упора, нажмите кнопку «ОТКЛ» и отключите выключатель «СЕТЬ». Отключите источник G1 нажатием на кнопку-гриб.

15. Используя данные таблицы 4.2, для каждого значения скорости вращения  $n$  вычислите по формуле

$$M = \frac{60}{2\pi n} (U - 65 \cdot I) I \text{ [Н·м]}$$

и постройте механическую характеристику  $n = f(M)$ .



### Лабораторная работа 4.3

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДПТ НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ $n = f(P_2)$ , $M = f(P_2)$ , $\eta = f(P_2)$

### Программа экспериментов

Эксперименты проводятся на специализированном стенде с использованием следующего оборудования.

### Перечень аппаратуры

**G1** — источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

**M2** — испытуемый двигатель постоянного тока с независимым возбуждением.

**G2** — источник постоянного напряжения используется:

1) для питания обмотки якоря испытуемого двигателя (регулируемый);

2) для питания обмотки возбуждения испытуемого двигателя (нерегулируемый).

**G6** — нагрузочная машина (синхронный генератор с активной нагрузкой A10).

**G3** — возбудитель синхронного генератора G6.

**(G5—P3)** — измеритель частоты вращения электромашинного агрегата (выполняет функции тахометра).

**P1** — блок мультиметров: измеряет необходимые для построения характеристик напряжения и тока.

Обозначение на эл. схеме	Наименование	Код (см. на стенде)
G1	Трехфазный источник питания	201.2
G2	Источник питания двигателя постоянного тока	206.1
G3	Возбудитель синхронной машины	209.2
G5	Преобразователь угловых перемещений	104
G6	Машина переменного тока	102.1
M2	Машина постоянного тока	101.2
A10	Активная нагрузка	306.1
P1	Блок мультиметров	508.2
P2	Измеритель мощностей	507.2
P3	Указатель частоты вращения	506.2

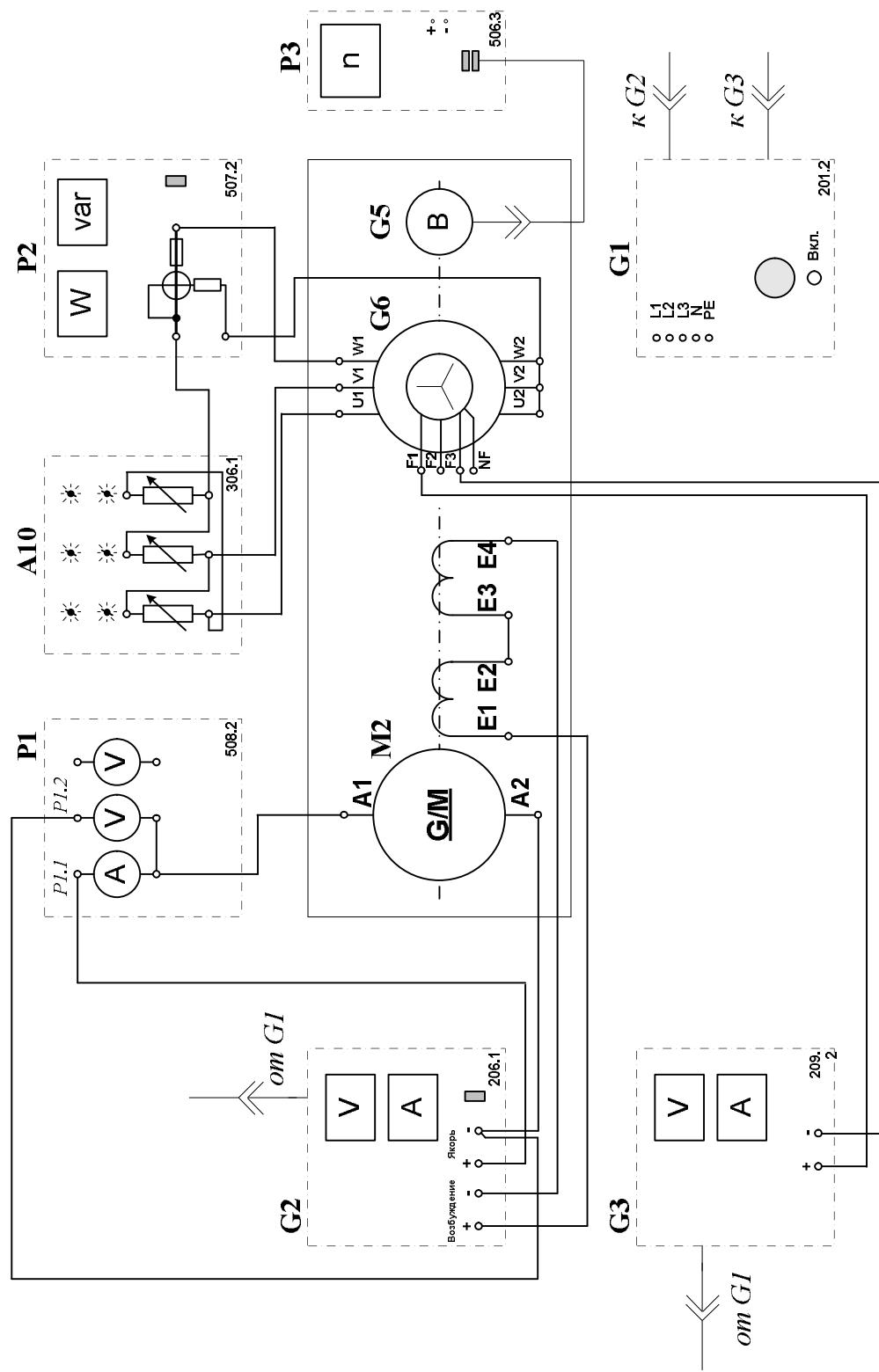


Рис. 4.9. Электрическая схема соединений

## Указания по проведению эксперимента


1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока (прилож. 1).
3. Соедините гнезда защитного заземления «» устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» трехфазного источника питания G1.
4. Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
5. Переключатели режима работы источника G2 и возбудителя G3 установите в положение «РУЧН.».
6. Регулировочные рукоятки источника G2 и возбудителя G3 поверните против часовой стрелки до упора.
7. Установите в каждой фазе активной нагрузки A10 суммарную ее величину 100%.
8. Измерьте одним из мультиметров активное сопротивление  $r_c$  статорной обмотки генератора G6 (должно быть примерно равно 21 Ом).
9. Включите выключатели «СЕТЬ» блока мультиметров P1 и измерителя мощностей P2.
10. Активизируйте мультиметры блока P1, задействованные в эксперименте.
11. Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
12. Включите выключатель «СЕТЬ» и нажмите кнопку «ВКЛ» источника G2.
13. Вращая регулировочную рукоятку источника G2, разгоните двигатель M2 до частоты вращения  $n$ , например, равной 1500 мин<sup>-1</sup>.
14. Включите выключатель «СЕТЬ» и нажмите кнопку «ВКЛ» возбудителя G3.
15. Вращая регулировочную рукоятку возбудителя G3, изменяйте ток якоря  $I_a$  двигателя M2 в диапазоне 0...1 А и заносите показания ваттметра измерителя P2 (активная мощность  $P_2$ , потребляемая одной фазой синхронного генератора G6), амперметра P1.1 (ток  $I_a$ ), вольтметра P1.2 (напряжение  $U_a$  якорной обмотки двигателя M2), вольтметра P1.3 (напряжение возбуждения  $U_f$  двигателя M2) и указателя P3 (частота вращения  $n$ ) в таблицу 4.3.

Таблица 4.3

$P_2, \text{Н} \cdot \text{м}$									
$I_a, \text{А}$									
$U_a, \text{В}$									
$U_f, \text{В}$									
$n, \text{мин}^{-1}$									

16. По завершении эксперимента сначала у возбудителя G3, а затем у источника G2 поверните регулировочную рукоятку против часовой стрелки до упора, нажмите кнопку «ОТКЛ» и отключите выключатель «СЕТЬ». Отключите источник G1 нажатием на кнопку-гриб.
17. Используя данные таблицы 4.3 и измеренное значение активного сопротивления  $r_f$  обмотки возбуждения двигателя M2 для каждого значения частоты вращения  $n$  вычислите и занесите в табл. 4.4 значения:

— полезной активной мощности двигателя М2 по формуле

$$P_2 = 3P'_2, [\text{Вт}];$$

— активной мощности, потребляемой из сети двигателем М2

$$P_1 = U_{\text{я}} I_{\text{я}} + \frac{U_f^2}{r_f}, [\text{Вт}];$$

— электромагнитного момента двигателя М2 по формуле

$$M = \frac{60}{2\pi n} (U_{\text{я}} - 65 I_{\text{я}}) I_{\text{я}}, [\text{Н}\cdot\text{м}];$$

— коэффициента полезного действия двигателя М2 по формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100, [\%].$$

Таблица 4.4

$n, \text{мин}^{-1}$									
$P_2, \text{Вт}$									
$P_1, \text{Вт}$									
$M, \text{Н}\cdot\text{м}$									
$\eta, \%$									

18. Используя данные таблицы 4.4 постройте искомые рабочие характеристики  $n = f(P_2)$ ,  $M = f(P_2)$ ,  $\eta = f(P_2)$  двигателя.

## **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ ПО РАЗДЕЛУ «МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА»**

(\* отмечены задачи повышенной сложности)

### **Принцип действия и конструкция машин постоянного тока**

- 4.1. Объясните принцип действия и конструкцию машины постоянного тока (МПТ).
- 4.2. Какую роль в машинах постоянного тока выполняет коллекторно-щеточный аппарат. Опишите его устройство.
- 4.3. МПТ подключается к сети постоянного тока, а какой ток (постоянный или переменный) протекает в обмотке якоря?
- 4.4. Почему в МПТ шихтуется только якорь?
- 4.5. Нарисуйте контуры магнитного поля реакции якоря.
- 4.6. Нарисуйте результирующее магнитное поле в МПТ. Покажите линию геометрической и физической нейтрали.
- 4.7. Покажите схему подключения секций обмотки якоря к коллекторным пластинам (на примере петлевой обмотки).
- 4.8. Что такое коммутация машины постоянного тока? Объясните причины искрения в коллекторно-щеточном аппарате.
- 4.9. Что представляет собой круговой огонь и причины его возникновения.
- 4.10. На каких физических принципах основаны способы улучшения коммутации? Перечислите их.
- 4.11. Укажите место расположения дополнительных полюсов, их функция и схема подключения.
- 4.12. Почему дополнительные полюса делаются заостренными с небольшой зоной излучения, а основные полюса имеют развитую поверхность на большую часть полюсного деления.
- 4.13. Нарисуйте электрические схемы МПТ параллельного, последовательного и смешанного возбуждения.

### **Двигатель постоянного тока (ДПТ)**

- 4.14. Напишите уравнения характеристик ДПТ параллельного возбуждения:
    - скоростной  $n=f_1(I)$ ;
    - механической  $n=f_2(M)$ .
  - 4.15. Назовите способы регулирования скорости ДПТ параллельного возбуждения и для каждого из способов дайте оценку:
    - диапазон регулирования (вверх, вниз);
    - изменение жесткости механической характеристики;
    - изменение КПД.
  - 4.16. Напишите уравнения характеристик ДПТ последовательного возбуждения:
    - скоростной  $n=f_1(I)$ ;
    - механической  $n=f_2(M)$ .
- Объясните, почему эти двигатели запрещается соединять с рабочим механизмом ременными передачами.

4.17. Назовите способы регулирования скорости ДПТ последовательного возбуждения и для каждого из способов дайте оценку:

- диапазон регулирования;
- изменение КПД.

4.18. \* Напишите уравнения характеристик ДПТ смешанного возбуждения при согласном и встречном включении обмоток возбуждения:

- скоростной  $n=f_1(I)$ ;
- механической  $n=f_2(M)$ .

Объясните, почему не используется встречное включение обмоток возбуждения.

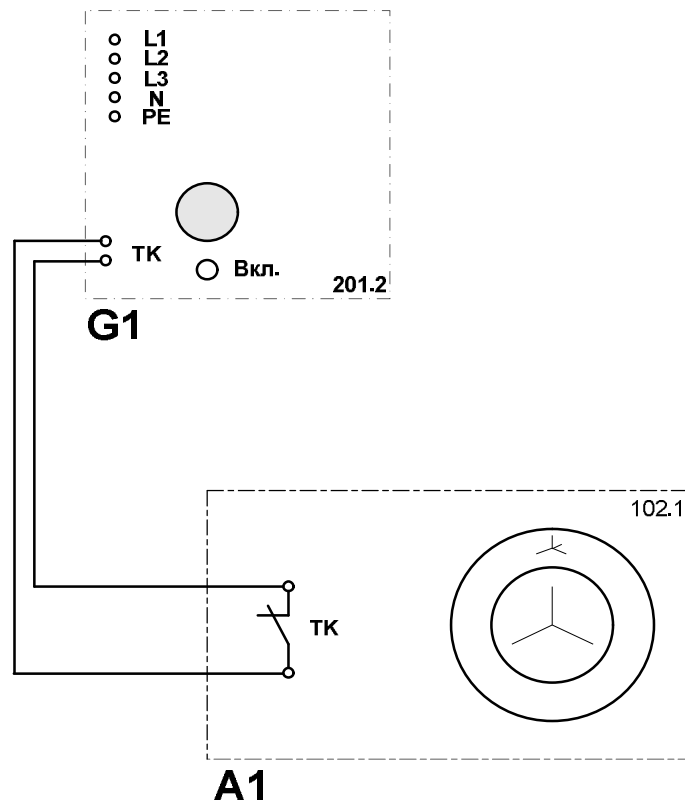
4.19. Объясните причину большого пускового тока ДПТ.

4.20. Какие способы пуска ДПТ используются на практике?

4.21. Почему при пуске двигателя его обмотки возбуждения подключаются так, чтобы в них при включении протекал максимальный ток?

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### П.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА СОЕДИНЕНИЙ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА



Перечень аппаратуры тепловой защиты		
Обозначение	Наименование	Код
A1	Машина переменного тока	102.1
G1	Трёхфазный источник питания	201.4

### П. 2. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТЕНДА И ЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

Настоящий раздел написан по материалам «Руководства по выполнению базовых экспериментов» [5].

Стенд предназначен для выполнения лабораторных работ по курсу «Электрические машины». Стенд модульного типа и представляет собой набор аппаратных блоков. Каждый блок имеет свой код, что позволяет легко находить необходимые блоки и собирать нужную электрическую схему. Ниже в таблицах представлено описание электромашинного агрегата и всех остальных блоков стенда.

**Электромашинный агрегат** состоит из машины постоянного тока, машины переменного тока и преобразователя угловых перемещений, соединенных по валу. Концы обмоток машин выведены через гнезда на терминальные панели, прикрепленные к их корпусам.

<b>Машина постоянного тока (код 101.2)</b>	
Номинальная мощность, Вт	90
Номинальное напряжение якоря, В	220
Номинальный ток якоря, А	0,56
Номинальная частота вращения, мин <sup>-1</sup>	1500
Возбуждение	независимое, параллельное, последовательное
Номинальное напряжение возбуждения, В	220
Номинальный ток обмотки возбуждения, А	0,2
КПД, %	57,2
Направление вращения	реверсивное
Режим работы	Двигатель/ генератор
<b>Машина переменного тока (код 102.1)</b>	
Число фаз на статоре	3
Число фаз на роторе	3
<i><b>Как синхронная машина</b></i>	
Номинальная активная мощность, Вт	100
Номинальное напряжение, В	230
Схема соединения обмоток статора	Y
cos φ <sub>н</sub>	1
Номинальный ток статора, А	0,26
Ток возбуждения холостого хода, А	1,6
Номинальное напряжение возбуждения, В	22
Номинальный ток возбуждения, А	1,85
Направление вращения	любое
Номинальная частота вращения, мин <sup>-1</sup>	1500
<i><b>Как асинхронная машина</b></i>	
Частота тока, Гц	50
Номинальная полезная активная мощность, Вт	30
Номинальное напряжение, В	127
Схема соединения обмотки статора	Y
Схема соединения обмотки ротора	Y
Номинальный ток статора, А	0,35
КПД, %	36
cos φ <sub>н</sub>	0,73
Номинальная частота вращения, мин <sup>-1</sup>	1250
<b>Преобразователь угловых перемещений (код 104)</b>	
Модель	BE 178A
Количество выходных каналов	6
Диапазон изменения рабочих частот вращения вала, мин <sup>-1</sup>	0..6000



## ОПИСАНИЕ БЛОКОВ И ИХ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Наименование и описание	Параметры	Код
1	2	3
<b>Трехфазный источник питания.</b> Предназначен для питания комплекта типового лабораторного оборудования трехфазным переменным напряжением промышленной частоты. Включается вручную. Имеет защиту от перегрузок, устройство защитного отключения, кнопку аварийного отключения и ключ от несанкционированного включения.	400 В ~ 16 А Ток срабатывания УЗО – 30 мА	201.4
<b>Источник питания двигателя постоянного тока.</b> Предназначен для питания обмоток якоря и возбуждения машины постоянного тока. Включается вручную или дистанционно/автоматически (от ПЭВМ). Якорное напряжение регулируется вручную или дистанционно. Напряжение возбуждения постоянное.	Цепь якоря 0...250 В; 3 А Цепь возбуждения 200 В; 1 А	206.1
<b>Возбудитель машины переменного тока.</b> Предназначен для питания обмотки возбуждения машины переменного тока. Включается и регулируется вручную или дистанционно/автоматически (от ПЭВМ). Выходные цепи изолированы от входных.	0...40 В; 3,5 А	209.3
<b>Трехполюсный выключатель</b> Предназначен для ручного или дистанционного/автоматического (от ПЭВМ) включения/отключения электрических цепей.	~400 В; 10 А	301.1
<b>Активная нагрузка.</b> Предназначена для моделирования однофазных и трехфазных потребителей активной мощности. Регулируется вручную.	220 В; 50Гц 3×0...50 Вт	306.1
<b>Реостат для цепи ротора машины переменного тока.</b> Предназначен для изменения активного сопротивления цепи ротора машины переменного тока. Регулируется вручную.	3×0...40 Ом; 1 А	307.2
<b>Реостат возбуждения машины постоянного тока.</b> Предназначен для изменения активного сопротивления цепи возбуждения машины переменного тока. Регулируется вручную.	0...2000 Ом 0,1...0,5 А	308.2
<b>Линейный реактор.</b> Предназначен для изменения индуктивности однофазной/трехфазной электрической цепи.	0,3 Гн; 0,5 А	314.2
<b>Емкостная нагрузка.</b> Предназначена для моделирования однофазных и трехфазных источников реактивной мощности. Регулируется вручную.	220 В; 50Гц 3×0...40 Вар	317.2
<b>Регулируемый автотрансформатор.</b> Предназначен для получения регулируемого однофазного напряжения промышленной частоты. Регулируется вручную.	220 / 0..240 В 2А	318.2
<b>Блок синхронизации.</b> Предназначен для ручного или дистанционного/автоматического подключения (от ПЭВМ) синхронной машины к сети методами точной синхронизации или самосинхронизации.	~400 В; 10 А 3 индикаторные лампы, синхроноскоп	319

<b>Реостат.</b> Предназначен для изменения активного сопротивления электрической цепи. Регулируется вручную.	2×0..100 Ом 1 А	323.4
<b>Индуктивная нагрузка.</b> Предназначена для моделирования однофазных и трехфазных потребителей реактивной мощности. Регулируется вручную.	220 В; 50Гц 3×0...40 Вар	324.2
<b>Коннектор.</b> Предназначен для обеспечения удобного доступа к входам/выходам платы ввода/вывода данных PCI 6023E (PCI 6024E) персонального компьютера.	8 аналог. диф. входов; 2 аналоговых выхода; 8 цифровых входов/выходов	330
<b>Трехфазная трансформаторная группа.</b> Предназначена для преобразования энергии однофазного/трехфазного тока. Коэффициент трансформации регулируется вручную.	3×80 В·А 230 В/242,235, 230, 226, 220, 133, 127 В	347.3
<b>Блок измерительных трансформаторов тока и напряжения.</b> Предназначен для получения нормированных гальванически не связанных с сетью сигналов, пропорциональных синусоидальным токам и напряжениям промышленной частоты.	3 трансформатора напряжения 600/3В; 3 трансформатора тока 0,3 А/3 В	401.1
<b>Блок датчиков тока и напряжения.</b> Предназначен для получения нормированных гальванически не связанных с сетью сигналов, пропорциональных токам и напряжениям.	3 датчика напряжения ±100; 1000 В/±5 В 3 датчика тока ±1; 5 А / ±5 В	402.3
<b>Измеритель напряжений и частот.</b> Предназначен для измерения напряжений и частот переменных напряжений промышленной частоты.	2 вольтметра ~0...500 В 2 частотомера 45...55 Гц; ~220 В	504.2
<b>Указатель угла нагрузки синхронной машины.</b> Предназначен для измерения и отображения в аналоговой форме угла нагрузки синхронной машины. Имеет выходные гнезда для подключения к ПЭВМ.	-180°...0...180°	505.3
<b>Указатель частоты вращения.</b> Предназначен для отображения частоты вращения электрических машин в аналоговой форме. Имеет выходные гнезда для подключения к ПЭВМ.	2000...0...2000 мин <sup>-1</sup>	506.3
<b>Измеритель мощностей.</b> Предназначен для измерения активной и реактивной мощностей в однофазной цепи, и отображения их в аналоговой форме. Имеет выходные гнезда для подключения к ПЭВМ.	15; 60; 150; 300; 600 В 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 А.	507.3
<b>Блок мультиметров.</b> Предназначен для измерения токов, напряжений и омических сопротивлений в цепях постоянного или синусоидального токов.	3 мультиметра MY-60	508.2
<b>Персональный компьютер.</b> Предназначен для сбора, обработки и отображения режимных параметров процессов, моделируемых на комплекте лабораторного оборудования.	Windows, плата PCI 6023E (PCI 6024E)	550

### П.3. СТАНДАРТИЗАЦИЯ МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

В стандартах на электрические машины приводятся программы их испытаний. Вся система стандартов разбита на две группы:

***Группа стандартов на общие методы испытаний электрических машин:***

ГОСТ 11828 — регламентируются отдельные методы испытаний;  
ГОСТ 25000 — устанавливаются методы испытаний на нагревание;  
ГОСТ 25941 — методы определения потерь и КПД;  
ГОСТ 11929 — методы определения уровня шума;  
ГОСТ 12379 — методы оценки вибрации;  
ГОСТ 12259 — методы определения расхода охлаждающего газа;  
СТ 295 — методы определения момента инерции вращающейся части;  
СТ 1107 — методы определения сопротивлений обмоток без отключения машины от сети.

***Группа стандартов на методы испытаний отдельных видов электрических машин:***

ГОСТ 7217 — методы испытаний трехфазных асинхронных двигателей;  
ГОСТ 34784 — методы испытаний силовых трансформаторов;  
ГОСТ 10159 — методы испытаний машин постоянного тока;  
ГОСТ 10169 — методы испытаний трехфазных синхронных машин;  
ГОСТ 17691 — методы испытаний электромашинных преобразователей мощностью 250 кВт и выше.

Согласно ГОСТ 183, различают следующие виды испытаний: приемочные, приемосдаточные, периодические, типовые и квалификационные.

*Приемочные испытания* проводятся на опытном образце электрической машины с целью приемки ее для серийного производства.

*Приемо-сдаточным испытаниям* подвергают каждую электрическую машину с целью установить пригодность каждой изготовленной машины к эксплуатации.

*Периодические испытания* проводят в определенные, установленные стандартами или техническими условиями сроки. Цель их убедиться в том, что в процессе производства качество электрических машин не изменилось существенно по сравнению с результатами приемочных испытаний. Поэтому программа периодических испытаний близка к программе приемочных испытаний.

*Типовые испытания* проводят при изменении конструкции, материалов или технологии, если эти изменения могут оказать влияние на характеристики машин.

*Квалификационные испытания* проводят после изготовления установочной серии машин.

Кроме перечисленных видов испытаний, являющихся промышленными, могут проводиться исследовательские испытания, цель которых получить рекомендации для проектирования новых электрических машин или их модернизации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: Учебник для вузов. СПб, 2009.
2. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока: Учебник для вузов. СПб, 2010.
3. Беспалов В.Я. Электрические машины: Учеб. пособие. 3-е изд., стер. М., 2010.
4. Гольдберг О.Д. Электромеханика: Учебник. 2-е изд., испр. М., 2010.
5. Галишников Ю.П., Сенигов П.Н., Карпеш М.А. Электрические машины: Руководство по выполнению базовых экспериментов. ЭМ.001 РБЭ (904). Челябинск, 2005.
6. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: Учебник для вузов: В 2 т. Т. 1. 3-е изд., стереот. М., 2006.
7. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: Учебник для вузов: В 2 т. Т. 2. 3-е изд., стереот. М., 2006.
8. Кацман М.М. Лабораторные работы по электрическим машинам и электрическому приводу: Учеб. пособие. 7-е изд., стер. М., 2011.