

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ  
ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ**

**Б1.В.08 Электрические машины**

**Направление подготовки 35.03.06 Агроинженерия**

**Профиль образовательной программы Электрооборудование и электротехнологии**

**Форма обучения заочная**

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>1. Конспект лекций</b>	<b>3</b>
<b>1.1 Лекция №1 - Введение. Машины постоянного тока</b>	<b>3</b>
<b>1.2 Лекция №2 - Генераторы постоянного тока. Двигатели постоянного тока</b>	<b>14</b>
<b>1.3 Лекция №3 - Назначение, устройство и принцип действия трансформаторов.</b>	<b>35</b>
Рабочий процесс трансформатора	
<b>1.4 Лекция №4 - Устройство и особенности конструктивного выполнения 3-х фазных трансформаторов. Режимы работы трёхфазных трансформаторов.</b>	<b>51</b>
<b>1.5 Лекция №5 - Устройство и принцип действия асинхронных машин</b>	<b>70</b>
<b>1.6 Лекция №6 - Пуск АД и регулирование частоты вращения</b>	<b>75</b>
<b>2. Методические указания по выполнению лабораторных работ</b>	<b>89</b>
<b>2.1 Лабораторная работа № ЛР-1 - Генератор постоянного тока</b>	<b>89</b>
<b>2.2 Лабораторная работа № ЛР-2 - Двигатель постоянного тока</b>	<b>94</b>
<b>2.3 Лабораторная работа № ЛР-3 - Регулирование частоты вращения ДПТ</b>	<b>96</b>
<b>2.4 Лабораторная работа № ЛР-4 - Однофазные трансформатор и автотрансформатор</b>	<b>99</b>
<b>2.5 Лабораторная работа № ЛР-5 - Параллельная работа трансформаторов</b>	<b>102</b>
<b>2.6 Лабораторная работа № ЛР-6 - Несимметричные режимы работы трёхфазного трансформатора</b>	<b>104</b>
<b>2.7 Лабораторная работа № ЛР-7 - Трёхфазная асинхронная машина в режимах с заторможенным ротором.</b>	<b>108</b>
<b>2.8 Лабораторная работа № ЛР-8 - Исследование АД с КЗР в режимах холостого хода и короткого замыкания</b>	<b>111</b>
<b>2.9 Лабораторная работа № ЛР-9 - Трёхфазный асинхронный электродвигатель в однофазном режиме</b>	<b>115</b>
<b>2.10 Лабораторная работа № ЛР-10 - Асинхронный генератор</b>	<b>119</b>
<b>2.11 Лабораторная работа № ЛР-11 - Испытание трёхфазного синхронного генератора</b>	<b>122</b>
<b>3. Методические указания по проведению практических занятий</b>	<b>128</b>
<b>3.1 Практическое занятие № ПЗ-1 - Решение задач по основам теории электротехники</b>	<b>128</b>
<b>3.2 Практическое занятие № ПЗ-2 - Решение задач по основам теории машин постоянного тока</b>	<b>131</b>
<b>3.3 Практическое занятие № ПЗ-3 - Расчёт магнитной цепи трансформатора</b>	<b>135</b>
<b>3.4 Практическое занятие № ПЗ-4 - Построение круговой диаграммы АД</b>	<b>138</b>
<b>3.5 Практическое занятие № ПЗ-5 - Построение внешней характеристики СГ</b>	<b>142</b>
<b>3.6 Практическое занятие № ПЗ-6 - Параллельная работа СГ с сетью</b>	<b>144</b>

# 1. КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

## 1.1 Лекция №1 (2 часа).

### Тема: «Введение. Машины постоянного тока»

#### 1.1.1 Вопросы лекции:

1. Назначение и принцип действия.
2. Устройство и магнитная цепь машины постоянного тока.
3. Обмотки якоря машин постоянного тока

#### 1.1.2 Краткое содержание вопросов

1. Назначение и принцип действия.

Машины постоянного тока — генераторы и двигатели — находят себе широкое применение в современных электроустановках. Они выполняются с неподвижными полюсами и вращающимся якорем. На рис. 5-1 представлен схематически разрез четырехполюсной машины. Здесь же приведены названия ее основных частей.

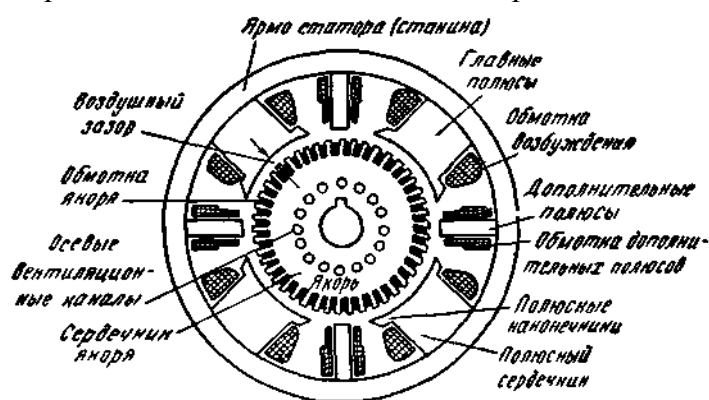


Рис. 1. Основные части машины постоянного тока.

Характерной частью машин постоянного тока является коллектор. Он состоит из медных пластин, разделенных изоляционными прослойками и собранных в виде цилиндра (рис. 5-2,а).

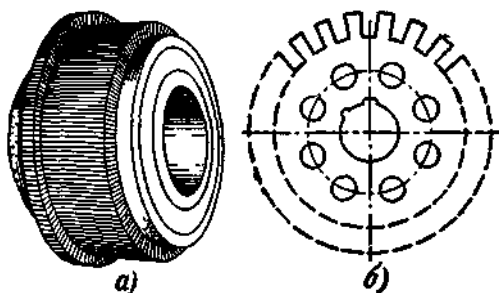


Рис. 2. Коллектор (а) и лист якоря (б)

Якорь машины постоянного тока при его вращении перемагничивается, поэтому он собирается из листов электротехнической стали обычно толщиной 0,5 мм (рис. 5-2,б). Листы перед сборкой покрываются с обеих сторон лаком; таким образом, предотвращается образование в стали якоря больших вихревых токов. На внешней поверхности якоря после сборки листов получаются пазы и зубцы. В пазы закладываются проводники обмотки якоря, которые по особым правилам соединяются между собой и с коллекторными пластинами. На рис. 5-3 показаны пазы якоря. Они обычно делаются открытыми, что в большой степени облегчает укладку обмотки и позволяет хорошо ее изолировать. Для небольших машин делаются полужакрытые пазы, так же как для статоров асинхронных машин. У машин небольшой и средней мощности якорь помещается непосредственно на валу, для больших машин — на втулке, выполняемой в

виде крестовины. Главные полюсы служат для создания основного поля в машине. Они имеют сердечники, на которых помещается обмотка возбуждения, и полюсные наконечники. Последние удерживают катушки возбуждения и способствуют наиболее благоприятному распределению индукции в воздушном зазоре машины вдоль окружности якоря. Полюсы в современных машинах собираются из стальных листов толщиной  $0,5 \div 1$  мм для уменьшения потерь от вихревых токов в поверхностном слое полюсных наконечников, обращенном к якорю. Вихревые токи возникают вследствие пульсации индукции, вызванной зубчатостью якоря: под отдельными частями полюсного наконечника проходит то зубец, то паз якоря, что вызывает в этих частях то сгущение, то разрежение магнитных линий. Пульсации индукции проникают в сравнительно неглубокий слой, поэтому можно было бы делать слоистыми только полюсные наконечники. Однако технологически обычно выгоднее весь полюс собирать из листов.

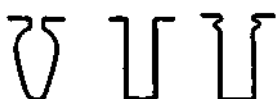


Рис. 3. Паза якоря

Ярмо статора или станина для современных машин большой и средней мощности выполняется из прокатанной листовой стали, согнутой в цилиндр и сваренной по шву, или из литой стали; для машин небольшой мощности — из цельнотянутой стальной трубы. Дополнительные полюсы выполняются обычно из ковanej стали или собираются из листов. Они, так же как главные полюсы, прикрепляются к станине при помощи болтов. Их назначение — создать условия для безыскровой работы щеток на коллекторе (улучшить коммутацию, см. § 5-7).

На рис. 5-4 показана машина в разобранном виде. Здесь в нижней части показан якорь, имеющий слева вентилятор и справа коллектор.

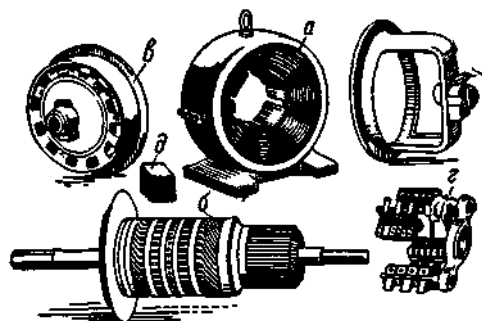


Рис. 4. Машина постоянного тока в разобранном виде. а — станина, б — якорь, в — подшипниковые щиты, г — траверса со щеткодержателями, д — коробка, прикрывающая зажимы.

Коллектор состоит из клинообразных пластин твердотянутой меди, которые изолируются друг от друга и от корпуса коллектора миканитом (с малым содержанием связующих веществ). Его конструкция показана на рис. 5-5.

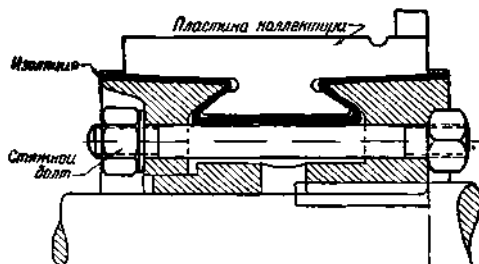


Рис. 5. Конструкция коллектора.

Для малых машин в последние годы часто применяются коллекторы на пластмассе. В этом случае коллекторные пластины вместе с миканитовыми прокладками

между ними запрессовываются в пластмассу при соответствующей термической обработке

На коллектор опираются угольные, графитные или металлографитные щетки, помещенные в щеткодержателях. При вращении якоря щетки сохраняют неизменное положение по отношению к полюсам машины. Щетка 2 (рис. 5-6), помещенная в обойме щеткодержателя, прижимается пружиной к коллектору. Щеткодержатели укрепляются на щеточных болтах, которые в свою очередь укрепляются на траверсе (рис. 5-4,з).

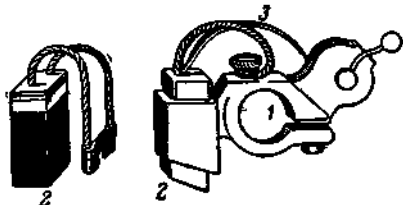


Рис. 6. Щетка и щеткодержатель со щеткой. 1 — отверстие для щеточного болта; 2 — щетка; 3 — пружина.

Траверса связывается либо с подшипниковым щитом, либо со станиной; ее можно поворачивать и тем самым изменять положение всей системы щеток по отношению к полюсам машины.

Щеточные болты изолируются от траверсы при помощи изоляционных шайб и втулок.

## 2. Устройство и магнитная цепь машины постоянного тока.

Вначале обратимся к кольцевому якорю. Он представляет собой полый цилиндр, собранный из листов электротехнической стали; этот цилиндр укреплен на валу машины, например, при помощи крестовины, имеющей спицы из немагнитного материала. Обмотка якоря обвивает полый цилиндр в виде спирали, поэтому ее называют спиральной или кольцевой обмоткой. Она образует замкнутый контур. Можно считать, что магнитный поток, создаваемый электромагнитами машины, будет проходить только по якорю (рис. 5-7). Если принять, что э.д.с. в проводниках наводятся в результате пересечения проводниками индукционных линии потока в воздушном зазоре, то при вращении якоря э.д.с. возникнут только в проводниках, лежащих на наружной поверхности якоря.

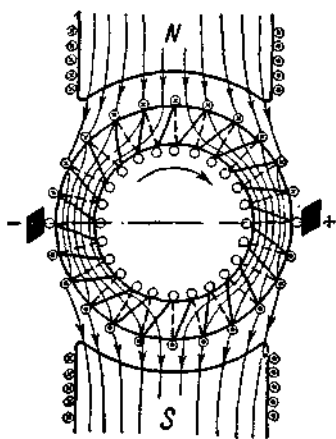


Рис. 5-7. Направление э.д.с., наведенных в обмотке кольцевого якоря.

Направления э.д.с. найдем, пользуясь правилом правой руки. В контуре обмотки вследствие симметрии обеих половин машины никакого уравнивающего тока возникать не будет, так как в любой момент времени э.д.с. в проводниках, лежащих под разноименными полюсами, противоположны по направлению и сумма их равна нулю.

Чтобы использовать э.д.с. обмотки, соединим ее с внешней цепью посредством неподвижных щеток. Последние могут скользить непосредственно по освобожденной от изоляции части проводников якоря, как это иногда делалось в машинах, изготовлявшихся в 80-х годах прошлого столетия. Для того чтобы полностью использовать э.д.с. обмотки,

щетки нужно поставить на геометрической нейтральной, т. е. на линии, перпендикулярной оси полюсов. Щетки делят обмотку на две параллельные ветви, причем при указанном на рис. 5-7 положении щеток э.д.с. параллельной ветви будет наибольшей. Если щетки смещать, то э.д.с. в параллельной ветви будет уменьшаться и в предельном случае, когда щетки будут совпадать с осью полюсов, она будет равна нулю, так как в этом случае в каждую параллельную ветвь будут входить проводники с э.д.с., сумма которых равна нулю.

Напряжение на щетках, равное э.д.с. параллельной ветви обмотки, будет при большом числе витков обмотки практически постоянным по величине. Рассматривая вращающийся якорь (рис. 5-7), мы видим, что витки параллельной ветви, э.д.с. которых определяют напряжение на щетках, все время находятся в поле одной и той же полярности и, следовательно, в сумме дадут э.д.с. одного направления, несмотря на то, что э.д.с. каждого витка при его вращении будет переменной.

Приспосабливать обмотку якоря для непосредственного контакта со щетками нецелесообразно; гораздо лучше и надежнее этот контакт обмотки со щетками осуществить при помощи пластин коллектора; они при этом соединяются проводниками с отдельными витками замкнутой обмотки якоря (рис. 5-8), и, таким образом, щетки посредством коллектора так же делят обмотку якоря на параллельные ветви, как это было при непосредственном их контакте с проводниками якоря.

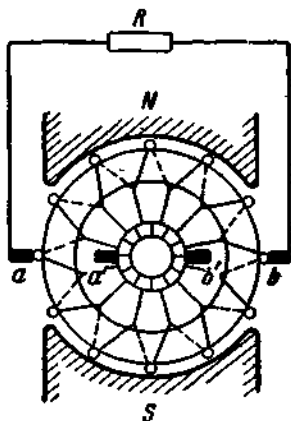


Рис. 5-8. Коллекторные пластины как замена непосредственного контакта щеток с проводниками якоря.

Идея применения коллектора в машинах постоянного тока впервые была осуществлена русским академиком Б. С. Якоби в изобретенном им двигателе постоянного тока (1834 г.).

Чем больше коллекторных пластин приходится на один полюс, тем меньше будут так называемые коллекторные пульсации напряжения на щетках. Они определяются как отношение разности максимального и среднего напряжений к среднему напряжению.

### 3. Обмотки якоря машин постоянного тока

#### *а) Общие определения.*

Кольцевой якорь со спиральной обмоткой в настоящее время не применяется, так как более выгодным и надежным является барабанный якорь с обмоткой, все проводники которой укладываются на его внешней поверхности.

При барабанном якоре обмотка состоит из витков, имеющих ширину, равную (или почти равную) полюсному делению. Здесь виток охватывает весь поток  $\Phi$ , вступающий в якорь, и э.д.с. в нем получается в 2 раза больше, чем в витке спиральной обмотки, где максимальный поток, охватываемый витком, равен половине потока, вступающего в якорь. Поэтому для получения одной и той же э.д.с. при барабанной обмотке требуется витков в 2 раза меньше, чем при кольцевой. К тому же изготовление кольцевой обмотки гораздо сложнее и условия ее охлаждения хуже, чем барабанной обмотки.

Проводники барабанной обмотки укладываются в пазы. Они называются активными проводниками. Два активных проводника, соединенных друг с другом, образуют виток. Витки соединяются между собой и с коллекторными пластинами и образуют замкнутый контур.

Часть обмотки, находящаяся при ее обходе между следующими друг за другом коллекторными пластинами, называется секцией. Секция может состоять из одного или нескольких витков (рис. 5-9). Ширину секции следует выбирать или равной полюсному делению (расстояние по окружности якоря между осями соседних полюсов), или близкой к нему. Секционные стороны в пазах обычно размещают в два слоя. На рис. 5-10 показаны пазы якоря с размещенными в них секционными сторонами. Здесь прямоугольниками изображены секционные стороны, которые могут состоять из одного или нескольких активных проводников.

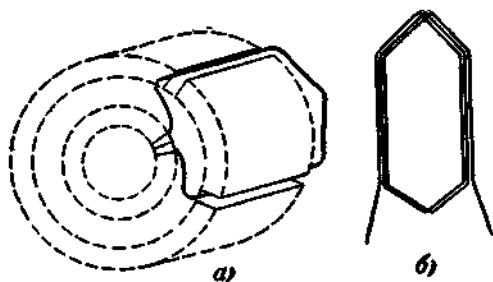


Рис. 5-9. Одновитковая секция, заложенная в пазы (а), и трехвитковая секция (б).

Для того чтобы правильно соединить секции обмотки между собой и с коллекторными пластинами, нужно найти шаги обмотки. Их целесообразно измерять числом элементарных пазов, причем под последними понимаются условные пазы с двумя секционными сторонами, расположенными одна над другой. На рис. 5-10,а показаны реальные пазы, которые в то же время являются и элементарными. На рис. 5-10,б и в показаны пазы, из которых каждый состоит соответственно из двух и трех элементарных пазов. Нумерация элементарных пазов производится так, как показано на рис. 5-10.

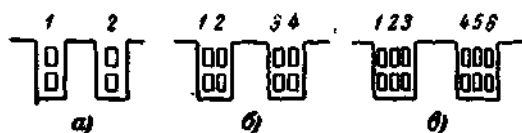


Рис. 5-10. Пазы якоря

Секция обмотки укладывается в пазы таким образом, чтобы одна ее сторона находилась в верхнем слое паза, а другая сторона в нижнем слое. На рис. 5-11 изображены секции обмоток. Здесь часть секции, находящаяся в верхнем слое, изображена сплошной линией, а часть секции, находящаяся в нижнем слое, — пунктирной линией.

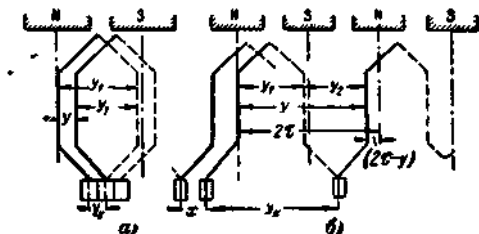


Рис. 5-11. Секции якорных обмоток.

Барабанные обмотки делятся на петлевые и волновые. Секции петлевой обмотки показаны на рис. 5-11,а и волновой обмотки — на рис. 5-11,б.

Различают следующие шаги обмоток (рис. 5-11):  $y_1$  — первый шаг, равный ширине секции или расстоянию между начальной и конечной сторонами секции;  $y_2$  — второй шаг, равный расстоянию между конечной стороной одной секции и начальной стороной следующей секции;  $y$  — результирующий шаг, равный расстоянию между начальными сторонами следующих друг за другом секций;  $y_k$  — шаг по коллектору, равный

расстоянию между началом и концом секции по окружности коллектора (измеряется числом коллекторных делений, т. е. расстояний между серединами соседних коллекторных пластин).

Если  $y$  измеряется числом делений элементарных пазов, то  $y$  и  $y_k$  выражаются одним и тем же числом, т. е.

$$y = y_k. \quad (5-1)$$

Если обозначить:  $S$  — число секций,  $K$  — число коллекторных пластин,  $Z_s$  — число элементарных пазов, то

$$S = K = Z_s. \quad (5-2)$$

Минимальное число параллельных ветвей  $2a$  замкнутой обмотки равно двум, т. е.

$$2a \geq 2. \quad (5-3)$$

Для обеспечения симметрии обмотки общее число секций выбирается таким образом, чтобы на каждую пару параллельных ветвей приходилось целое число секций. В этом случае имеем:

$$\frac{S}{a} = \frac{K}{a} = \text{целому числу}. \quad (5-4)$$

*б) Петлевая обмотка.*

При петлевой обмотке первый шаг делается по окружности якоря в одну сторону, второй шаг — в противоположную (рис. 5-11,а), поэтому шаги петлевой обмотки связаны соотношением

$$y_1 - y_2 = y = y_k. \quad (5-5)$$

Обычно  $y_1 > y_2$  и  $y > 0$ . Такая обмотка называется неперекрещенной или правой. Здесь при обходе секций мы будем все время смещаться вправо. При  $y_1 < y_2$  и  $y < 0$  получается перекрещенная или левая петлевая обмотка. В этом случае при обходе обмотки будем все время смещаться влево. Левая обмотка на практике почти не встречается.

Число параллельных ветвей петлевой обмотки определяется числом полюсов  $2p$  и значением результирующего шага  $y$ . В общем случае число параллельных ветвей петлевой обмотки равно:

$$2a = 2py. \quad (5-6)$$

На рис. 5-11,а показаны две секции петлевой обмотки с шагом  $y = y_k = 1$ . Такая обмотка называется простой петлевой. Она имеет число параллельных ветвей, равное числу полюсов:  $2a = 2p$ . Простые петлевые обмотки применяются для машин средней и большой мощности.

Если  $y > 1$ , то получается сложная петлевая обмотка. Петлевую обмотку называют также параллельной, и соответственно различают простую и сложную параллельные обмотки.

На рис 5-12 приведена схема — развертка простой петлевой обмотки при  $Z_s = S = K = 24$ ,  $2p = 2a = 4$ .

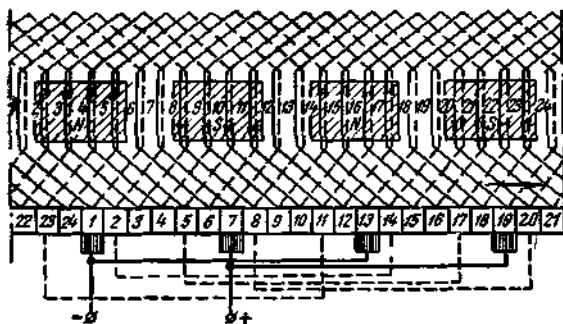


Рис. 5-12. Схема-развертка простой петлевой обмотки.  
 $Z_s = S = K = 24$ ;  $2p = 2a = 4$ ;  $y = y_k = 1$ ;  $y_1 = 6$ ;  $y_2 = 5$ .

Шаги обмотки взяты равными:



$$y = y_k = 1; \quad y_1 \approx \frac{Z_2}{2p};$$

$$y_1 = 6; y_2 = y_1 - y; y_2 = 5.$$

Если схему начертить на полосе бумаги и обернуть ею цилиндр подходящих размеров, то мы получим наглядное представление о соединении секций между собой и с коллекторными пластинами.

Для той же самой обмотки на рис. 5-12а представлена так называемая радиальная схема.

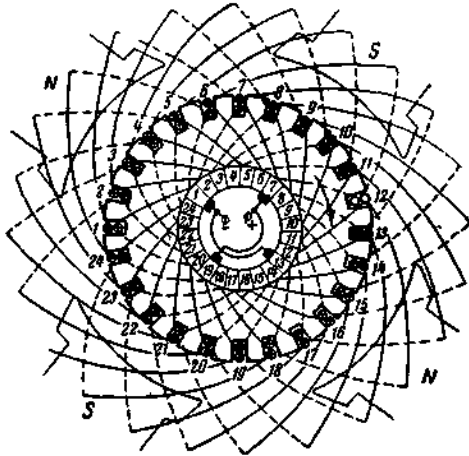


Рис. 5-12а. Радиальная схема простой петлевой обмотки (кривые вне якоря условно показывают лобовые соединения на задней стороне машины, кривые внутри якоря — лобовые соединения на ее передней стороне; см. рис. 5-12).

На рис. 5-12 показаны полюсы и э.д.с., наведенные в секционных сторонах. Мы приняли, что полюсы расположены над обмоткой и что якорь относительно полюсов и щеток движется вправо.

При выбранном положении якоря относительно полюсов получаются четыре параллельные ветви ( $2a = 2p = 4$ ); они показаны на рис. 5-13, где цифрами без штриха обозначены верхние секционные стороны, а цифрами со штрихом — нижние.

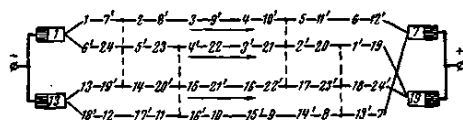


Рис. 5-13. Параллельные ветви простой петлевой обмотки (см. рис. 5-12).

При перемещении якоря некоторые секции замыкаются щетками. Они в это время не участвуют в создании э.д.с. параллельной ветви. Для рассматриваемого случая мы будем иметь то 6, то 5 секций в каждой параллельной ветви. В соответствии с этим напряжение на щетках будет несколько изменяться по величине, оставаясь постоянным по направлению. В практических случаях, когда взято на параллельную ветвь обмотки 15—20 и больше секций, коллекторные пульсации напряжения на щетках получаются меньше 1%.

Щетки на рис. 5-12 и 5-12а соприкасаются с коллекторными пластинами, соединенными с секционными сторонами, находящимися приблизительно посередине между главными полюсами, т. е. вблизи геометрической нейтрали. В этом случае считают, что щетки находятся приблизительно на геометрической нейтрали, имея в виду положение щеток не относительно полюсов, а относительно секционных сторон, с которыми они соединены. Щетки устанавливаются на геометрической нейтрали не только для того, чтобы иметь наибольшую э.д.с. в параллельной ветви, но и для того, чтобы в секциях, замыкаемых щетками почти накоротко, не могли образоваться большие токи.

Из сложных петлевых обмоток применяются иногда обмотки при  $y = 2$  для машин на большие токи, для которых увеличение числа параллельных ветвей за счет увеличения числа полюсов невозможно или невыгодно.

Сложную петлевую обмотку можно представить себе, как две простые петлевые обмотки, уложенные на один и тот же якорь и смещенные одна относительно другой (рис. 5-14).

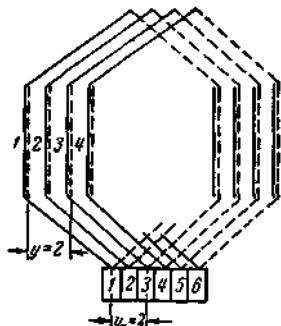


Рис. 5-14. Секции сложной петлевой обмотки ( $y = y_k = 2$ ).

При исследовании якорных обмоток машин постоянного тока, так же как якорных обмоток машин переменного тока, применяются векторные диаграммы э.д.с. обмоток. Такие диаграммы можно построить, приняв, что кривая распределения индукции вдоль окружности якоря (кривая поля машины) синусоидальна. Тогда мы можем э.д.с., наведенные в секционных сторонах, изобразить временными векторами. Следовательно, э.д.с. одной какой-либо секции также изобразится вектором, равным разности векторов э.д.с., наведенных в сторонах этой секции (см. § 3-3,а).

Электродвижущие силы секций, следующих одна за другой, сдвинуты по фазе в соответствии с их сдвигом в магнитном поле. Этот сдвиг легко найти, так как сдвигу в магнитном поле на полюсное деление  $\tau$  соответствует сдвиг по фазе на  $180^\circ$ .

Для петлевой обмотки сдвиг между следующими одна за другой секциями равен  $y$  делений элементарных пазов, чему соответствует

$$\alpha = \frac{y}{\tau} 180^\circ$$

Для обмотки, схема которой показана на рис. 5-12, имеем ( $y = 1$ ,  $\tau = Z_p/2p = 24/4 = 6$ , следовательно,

$$\alpha = \frac{1}{6} \cdot 180^\circ = 30^\circ$$

Складывая при обходе обмотки векторы э.д.с. отдельных секций, мы получим многоугольники э.д.с., каждый из которых соответствует одной паре параллельных ветвей обмотки. Они называются многоугольниками э.д.с. секций обмотки (или потенциальными многоугольниками обмотки).

Для обмотки рис. 5-12 мы получим два равных друг другу многоугольника э.д.с.

$$\frac{S}{a} = \frac{K}{a} = \frac{24}{2} = 12$$

обмотки ( $a = 2$ ) с числом сторон  $\frac{S}{a} = \frac{K}{a} = \frac{24}{2} = 12$ , показанных на рис. 5-15. Здесь цифрами обозначены номера секций, соответствующие номерам коллекторных пластин.

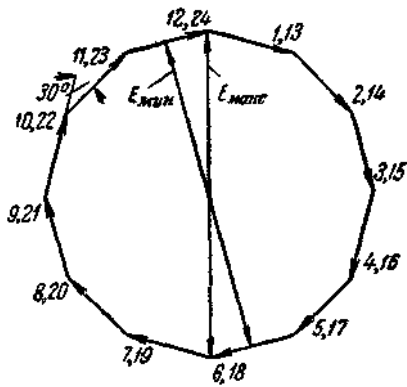


Рис. 5-15. Многоугольник э.д.с. обмотки (см. рис. 5-12).

При помощи рис. 5-15 можно найти пульсацию э.д.с. на щетках. Она равна:

$$\Delta E\% = \frac{E_{\max} - E_{\text{ср}}}{E_{\text{ср}}} \cdot 100\%$$

$$E_{\text{ср}} = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{2};$$

для данного случая  $\Delta E\% \approx 1,2\%$

Очевидно, что при  $K/a$ , равном нечетному числу, которое обычно и выбирается, пульсация э.д.с. на щетках будет относительно меньше.

При увеличении числа секций в параллельной ветви многоугольник приближается к окружности.

Из схем обмоток и соответствующих многоугольников э.д.с. следует, что если мы при обходе некоторого числа секций обмотки смещаемся в магнитном поле на  $\square$ , то получаем при этом одну параллельную ветвь. Таким образом, число параллельных ветвей равно общему сдвигу в магнитном поле при обходе всех секций обмотки, поделенному на  $\square$ . Для петлевой обмотки общий сдвиг в магнитном поле равен  $yS$ , а число параллельных ветвей

$$2a = y \cdot S : \tau = y \cdot S : \frac{S}{2p} = 2py$$

в) Волновая обмотка.

При волновой обмотке второй шаг  $y_2$  делается в ту же сторону, что и первый шаг  $y_1$  (рис. 5-11,б), поэтому шаги обмотки связаны соотношением

$$y_1 + y_2 = y = y_k. \quad (5-7)$$

Результирующий шаг  $y$  должен быть больше или меньше, чем двойное полюсное деление  $2\square$ , чтобы при обходе секций все они были включены в обмотку. Поэтому, делая один обход по окружности якоря, мы попадаем в элементарный паз, сдвинутый вправо или влево от начала обхода на  $x$  делений элементарных пазов (рис. 5-11,б). Так как мы должны при этом сделать столько результирующих шагов  $y$ , сколько имеется пар полюсов, то  $yp \pm x = Z_s = S$ . Отсюда получаем:

$$y = \frac{S \mp x}{p} \quad (5-8)$$

Число параллельных ветвей волновой обмотки зависит только от  $x$ , оно равно  $2a = 2x$ . В этом можно убедиться, рассматривая схемы обмоток.

Формула для результирующего шага пишется следующим образом

$$y = y_k = \frac{S \mp a}{p} = \frac{K \mp a}{p}. \quad (5-9)$$

Верхний знак соответствует неперекрещенной обмотке, нижний знак — перекрещенной.

При  $a = 1$  получается простая волновая обмотка или простая последовательная обмотка. При  $a > 1$  получается сложная волновая или сложная последовательная обмотка.

На рис. 5-16 приведена схема-развертка простой волновой обмотки:

$$2p = 4; Z_s = S = K = 19; 2a = 2;$$

$$y = y_k = \frac{19-1}{2} = 9; \quad y_1 \approx \frac{y}{2}; \quad y_1 = 5;$$

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

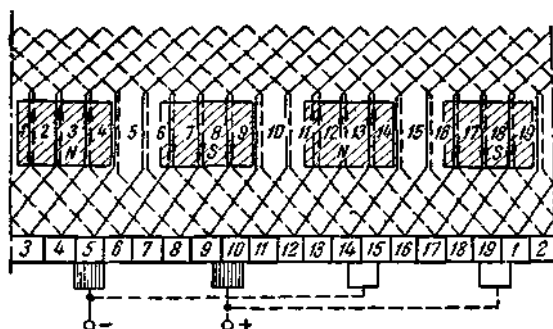


Рис. 5-16. Схема-развертка простой волновой обмотки  $Z_s = S = K = 19; 2p = 4; y = y_k = 9; y_1 = 5; y_2 = 4; a = 1$ .

Радиальная схема той же обмотки приведена на рис. 5-16а.

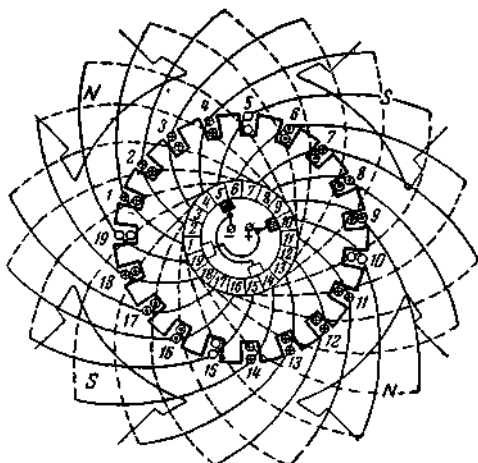


Рис. 5-16а. Радиальная схема простой волновой обмотки (кривые линии вне якоря условно показывают лобовые соединения на задней стороне машины, кривые внутри якоря — лобовые соединения на ее передней стороне (см рис. 5-16).

На рис. 5-17 представлены параллельные ветви обмотки, соответствующие положению якоря и коллектора относительно полюсов и щеток, показанному на рис. 5-16. Получаются две параллельные ветви. Для любой волновой обмотки можно взять только две щетки (заштрихованные на рис. 5-16 и 5-17). Однако в обычных случаях берут число щеток равным числу полюсов, так как в этом случае поверхность коллектора лучше используется и его размеры можно сократить. Выключаемые при этом секции (замкнутые щетками) практически не изменяют (при большом числе секций в параллельной ветви) ее э.д.с.

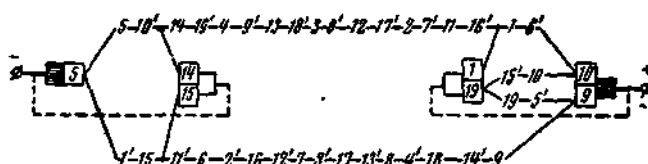


Рис. 5-17. Параллельные ветви простой волновой обмотки (см. рис. 5-16) при двух щетках и при четырех щетках.

Сложную волновую обмотку можно представить себе, как  $a$  простых волновых обмоток, уложенных на якоре, имеющем число пазов и число коллекторных пластин в  $a$  раз больше, чем это нужно для одной простой волновой обмотки. Сложные волновые обмотки на практике встречаются сравнительно редко.

Простая волновая обмотка находит себе самое широкое применение для нормальных машин небольшой и средней мощности при  $2p=4$  и 6. Ее преимущество перед простой петлевой обмоткой заключается в том, что она при любом числе полюсов имеет только две параллельные ветви и, следовательно, при  $2p>2$  требует меньше проводников. При этом сечение проводников должно быть взято больше, чем при петлевой обмотке, но при меньшем числе проводников изготовление обмотки облегчается. Другим важным преимуществом простой волновой обмотки является то, что она не требует уравнительных соединений, тогда как петлевая обмотка при  $2p>2$  должна быть снабжена уравнительными соединениями.

Число параллельных ветвей волновой обмотки, как отмечалось, зависит только от  $x$  коллекторных делений между началом и концом одного обхода по окружности коллектора. Это можно доказать, пользуясь теми же рассуждениями, что и в отношении петлевой обмотки. Для волновой обмотки можно также построить векторные диаграммы э.д.с. — многоугольники э.д.с. обмотки. Здесь сдвиг по фазе э.д.с. секций, следующих одна за другой при обходе обмотки, соответствует их сдвигу в магнитном поле, равному  $2\alpha$ -у (см. рис. 5-11,б). Так как число параллельных ветвей  $2a$  равно общему сдвигу в магнитном поле при обходе всех секций обмотки, т. е.  $(2\alpha-y)S$ , поделенному на  $\alpha$ , то получим:  $2a = (2\alpha-y)S : \alpha$ . Подставляя сюда (5-8) и  $\alpha = S/2p$ , будем иметь:

$$2a = \left( \frac{S}{p} - \frac{S \mp x}{p} \right) S : \frac{S}{2p} = 2x$$

(здесь знак минус опускаем, так как  $2a$  — число существенно положительное).

з) Уравнительные соединения.

Обратимся к рис. 5-12, 5-12а и 5-13, где приведены схемы простой петлевой обмотки и ее параллельных ветвей. При различных потоках отдельных магнитных цепей э.д.с. параллельных ветвей будут неодинаковы. Различие потоков может быть вызвано эксцентричным положением якоря относительно полюсов, раковинами, получающимися при отливке станины. Допустим, например, что э.д.с. верхней ветви на рис. 5-13 больше э.д.с. третьей (сверху) ветви. Тогда в контуре, состоящем из этих ветвей, правых и левых щеток и соединительных проводников между ними, будет проходить уравнительный (постоянный) ток, причем он будет иметь большое значение, даже при небольшом различии э.д.с. ветвей обмотки. В результате верхние щетки будут иметь чрезмерную нагрузку, что может вызвать искрение под этими щетками.

Для того чтобы уменьшить уравнительные токи, проходящие через щетки, устраивают уравнительные соединения. Они представляют собой проводники, соединяющие друг с другом точки обмотки с теоретически равными потенциалами, т. е. те точки обмотки, которые имели бы равные потенциалы, если бы были соблюдены все условия симметрии. На рис. 5-12 и 5-13 показаны пунктиром четыре группы уравнительных соединений (каждая группа представляет собой соединение  $a$  "равнопотенциальных" точек). Для реальных обмоток делают обычно 6—12 групп уравнительных соединений. Только для обмоток быстроходных машин, таких, например, как возбудители к мощным турбогенераторам, часто делают полное возможное число групп уравнительных соединений, равное  $K/a$ .

При наличии уравнительных соединений уравнительные токи будут проходить главным образом по этим соединениям. Токи будут переменными. Они образуют многофазную систему и, следовательно, создадут н.с., вращающуюся с такой же скоростью, с какой вращается якорь, но в противоположную сторону. Эта н.с. относительно полюсов будет неподвижной и согласно закону Ленца будет выравнивать

потоки под полюсами. Тем самым будет почти полностью устраняться причина, вызывающая уравнивающие токи через щетки.

При простой волновой обмотке нельзя выполнить уравнивающие соединения, но они здесь не требуются, так как секции любой параллельной ветви этой обмотки располагаются под всеми полюсами и неравенство отдельных потоков в одинаковой степени сказывается на э.д.с. обеих параллельных ветвей.

## 1.2 Лекция №2 (2 часа).

### Тема: «Генераторы постоянного тока. Двигатели постоянного тока»

#### 1.2.1 Вопросы лекции:

1. Генераторы постоянного тока.
2. Генератор с независимым возбуждением.
3. Генераторы с параллельным и смешанным возбуждением.
4. Пуск двигателя в ход.
5. Основные характеристики двигателей постоянного тока.
6. Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока.

#### 1.2.2 Краткое содержание вопросов

1. Генераторы постоянного тока.

*а) Классификация генераторов по способу возбуждения.*

В зависимости от способа возбуждения основного магнитного поля машины различают генераторы с независимым, параллельным, последовательным и смешанным возбуждением.

Генератор, обмотка возбуждения которого получает питание от постороннего источника тока (например, от аккумуляторной батареи или от другого генератора постоянного тока), называется генератором с независимым возбуждением (рис. 5-41,а).

Генератор с параллельным возбуждением имеет обмотку возбуждения, подключенную параллельно к якору (рис. 5-41,б). В генераторе последовательного возбуждения обмотка возбуждения соединена последовательно с якорем (рис. 5-41,в).

В генераторе со смешанным возбуждением на главных полюсах помещаются две обмотки: одна из них соединяется параллельно, другая — последовательно с якорем (рис. 5-41,г).

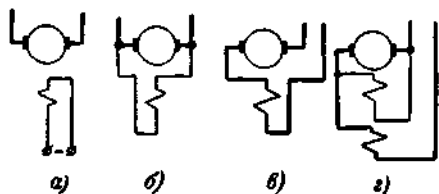


Рис. 5-41. Генераторы постоянного тока.

По параллельной обмотке возбуждения проходит небольшой ток, составляющий 1—5% номинального тока якоря. Она выполняется обычно с большим числом витков из проводника относительно небольшого сечения. По последовательной обмотке возбуждения проходит полный ток якоря, поэтому она выполняется с небольшим числом витков из проводника относительно большого сечения.

Генераторы малой мощности выполняются иногда с постоянными магнитами; их можно назвать магнито-электрическими. По свойствам они приближаются к генераторам с независимым возбуждением.

На щитке машины указываются номинальные величины: мощность (электрическая мощность на зажимах для генератора или мощность на валу для двигателя в ваттах или киловаттах), напряжение, ток, скорость вращения.

## 2. Генератор с независимым возбуждением.

### б) Генератор с независимым возбуждением.

Схема генератора с независимым возбуждением приведена на рис. 5-42. Здесь  $R_p$  — регулировочный реостат в цепи возбуждения;  $R_n$  —нагрузочный реостат.

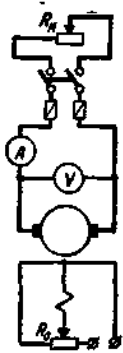


Рис. 5-42. Генератор с независимым возбуждением.

При холостом ходе генератора, когда отключена внешняя цепь, напряжение на его зажимах, измеряемое вольтметром, можно считать равным э.д.с. якоря. Таким образом, опытным путем легко может быть найдена характеристика холостого хода;  $E_0 = f(I_B)$  при  $n = \text{const}$ . Она представлена на рис. 5-43. При ее снятии ток возбуждения  $I_B$  изменяют от 0 до некоторого максимума, соответствующего  $E_0 \approx 1,25 U_n$ , и затем его уменьшают до нуля. При этом получают восходящая и нисходящая ветви характеристики холостого хода. Расхождение этих ветвей объясняется наличием гистерезиса в полюсах и ярме статора. При  $i_B=0$  э.д.с. в обмотке якоря индуцируется потоком остаточного магнетизма. Она обычно составляет 2-4% от  $U_n$ .

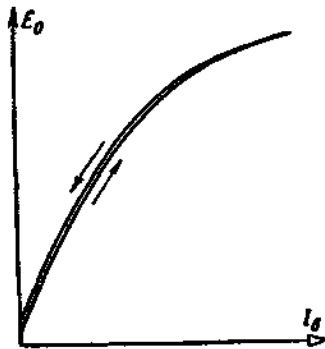


Рис. 5-43. Характеристика холостого хода.

Регулировочный реостат  $R_p$  имеет холостой контакт, соединенный с противоположным зажимом обмотки возбуждения. Такое соединение делается для того, чтобы при переводе ручки реостата на холостой контакт обмотка возбуждения была замкнута, так как при ее размыкании образовывались бы (из-за ее большой индуктивности) электрические дуги, приводящие к подгоранию контактов.

Для определения н.с. реакции якоря снимают также нагрузочные характеристики:  $U = f(I_B)$  при  $I_a = \text{const}$  и  $n = \text{const}$ . Одна из них при  $I_a = I_n$  представлена на рис. 5-44.

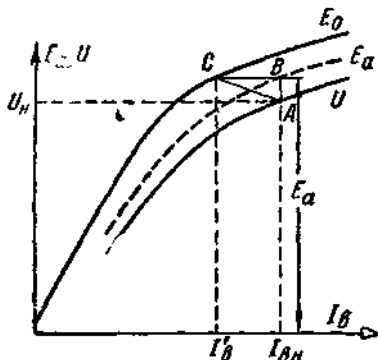


Рис. 5-44. Характеристики — нагрузочная ( $U$ ), внутренняя нагрузочная ( $E_a$ ) и холостого хода ( $E_0$ ) (к определению реакции якоря).

Если к ординатам нагрузочной характеристики прибавить внутреннее падение напряжения в цепи якоря  $I_a r_x + 2 U_{ш}$  [см. § 5-6, уравнение (5-22) и далее], то получим внутреннюю нагрузочную характеристику  $E_a = f(I_a)$ . Она показана на рис. 5-44 пунктиром. Здесь же приведена характеристика холостого хода.

Мы видим, что для создания э.д.с.  $E_a$  при холостом ходе потребовался бы ток возбуждения  $I_{в.н.}$ , тогда как для создания той же э.д.с.  $E_a$  при нагрузке требуется ток возбуждения  $I_{в.н.}$ ; следовательно,  $I_{в(р.я)} = I_{в.н.} - I_{в'} = \overline{BC}$  идет на компенсацию реакции якоря. Для определения н.с. реакции якоря  $F_{р.я}$  надо ток  $I_{в(р.я)}$  умножить на число витков  $2w_{в.н.}$  пары полюсов:  $F_{р.я} = 2w_{в.н.} I_{в(р.я)}$ . Для уточнения результатов следует, брать нисходящую ветвь характеристики холостого хода и снимать нагрузочную характеристику, начиная с наибольшего значения  $U$  и уменьшая  $I_a$ . Тогда будет исключено влияние гистерезиса.

Треугольник  $ABC$ , у которого один катет  $\overline{AB}$  равен внутреннему падению напряжения в цепи якоря, а другой катет  $\overline{BC}$  равен току  $I_{в(р.я)}$  (соответствующему реакции якоря), называется реактивным (или характеристическим) треугольником.

Если снять несколько нагрузочных характеристик для различных значений тока якоря  $I_a$ , то можно найти зависимость  $I_{в(р.я)}$  (или  $F_{р.я}$ ) не только от насыщения, но и от тока  $I_a$ .

Большое практическое значение имеет внешняя характеристика:  $U = f(I)$  при  $n = \text{const}$  и  $I_{в.н.} = \text{const}$  (рис. 5-45). Она снимается при включенном рубильнике (рис. 5-42); ток нагрузки  $I$  изменяют при помощи реостата  $R_n$ .

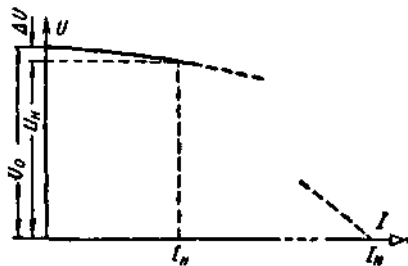


Рис. 5-45. Внешняя характеристика генератора с независимым возбуждением.

Внешняя характеристика показывает, что напряжение на зажимах генератора при увеличении тока нагрузки понижается. Понижение напряжения вызвано уменьшением потока  $\Phi$ , а следовательно, и э.д.с.  $E_a$  из-за реакции якоря, а также внутренним падением напряжения.

При дальнейшем уменьшении внешнего сопротивления  $R_n$  ток будет увеличиваться и при  $R_n = 0$  достигнет наибольшего значения  $I_k$ . Ток  $I_k$  — ток короткого замыкания. Он опасен для машины, так как в несколько раз превышает ее номинальный ток. Для предохранения машины от короткого замыкания во внешней цепи ставят предохранители, отключающие цепь при токе, превышающем допустимый для машины.

Изменение напряжения генератора характеризуется повышением напряжения при переходе от режима номинальной нагрузки к режиму холостого хода, отнесенным к номинальному напряжению (рис. 5-45):

$$\Delta U\% = \frac{U_0 - U_n}{U_n} \cdot 100\% \quad (5-50)$$

Для генераторов с независимым возбуждением, работающих при  $I_{в.н.} = \text{const}$ ,  $\Delta U\% = 5 \div 10\%$ .

Напряжение на зажимах генератора можно поддерживать постоянным при изменении нагрузки путем регулирования тока возбуждения. Как при этом нужно



регулировать ток возбуждения, показывает регулировочная характеристика:  $I_b = f(I)$  при  $n = \text{const}$  и  $U = \text{const}$  (рис. 5-46).



Рис. 5-46. Регулировочная характеристика.

Генераторы с независимым возбуждением применяются в тех случаях, где необходимо регулирование напряжения в широких пределах: например, для питания электролитических ванн, в схеме генератор-двигатель (§ 5-10, в). Они на практике встречаются сравнительно редко. Гораздо чаще применяются генераторы, работающие с самовозбуждением.

### 3. Генераторы с параллельным и смешанным возбуждением.

#### в) Генератор с параллельным возбуждением.

Схема генератора с параллельным возбуждением представлена на рис. 5-47. Здесь обмотка возбуждения питается от самого генератора. Такая работа возможна благодаря самовозбуждению машины. Принцип самовозбуждения заключается в следующем.

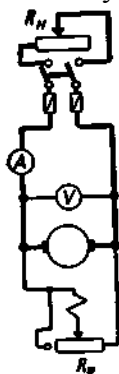


Рис. 5-47. Генератор с параллельным возбуждением.

В полюсах и ярме машины обычно всегда имеет место остаточный магнетизм, наличие которого обуславливает самовозбуждение.

Действительно, поток остаточного магнетизма при вращении якоря наводит в его обмотке небольшую э.д.с., которая создает небольшой ток в обмотке возбуждения. Этот ток при правильном соединении обмотки возбуждения с обмоткой якоря увеличивает поток полюсов, который в свою очередь наводит в якоре большую э.д.с. Она создает в обмотке возбуждения соответственно больший ток — снова увеличивается поток и э.д.с. в якоре и т. д. до тех пор, пока не установится соответствие между током возбуждения, магнитным потоком и э.д.с.

Для уяснения процесса самовозбуждения обратимся к рис. 5-48. Здесь изображены характеристика холостого хода  $E_0 = f(I_b)$  и "прямая постоянного сопротивления цепи возбуждения"

$E_0 = r_b I_b$ , где  $E_0$  принята равной напряжению, приложенному к цепи возбуждения;  $r_b$  — сопротивление этой цепи.

Можно считать, что падение напряжения в цепи якоря, вызванное током  $I_b$ , ничтожно, поэтому напряжение на зажимах якоря, а следовательно, и на зажимах цепи возбуждения можно принять равным э.д.с.  $E_b$ . При постоянном сопротивлении  $r_b$  цепи возбуждения напряжение на ее зажимах пропорционально току  $I_b$ , т. е. изменяется при изменении  $I_b$  по закону прямой линии, которую мы назвали прямой постоянного сопротивления цепи возбуждения (встречается также название "вольт-амперная" характеристика цепи возбуждения).

Оба уравнения  $E_0=f(I_0)$  и  $E_0=r_B I_B$  одновременно будут удовлетворяться только в точке  $A$ . В этой точке мы получаем установившуюся в процессе самовозбуждения э.д.с.  $E_0 = \overline{BA}$  при данном сопротивлении  $r_B$ . При отклонении э.д.с. от этого значения вследствие какой-нибудь причины после устранения этой причины э.д.с. снова вернется, очевидно, в исходное положение, т. е. будет равна  $\overline{BA}$ .

На рис. 5-48  $\operatorname{tg} \alpha = \frac{\overline{BA}}{\overline{OB}} \equiv r_B$ . При увеличении  $r_B$  угол  $\alpha$  будет увеличиваться и при совпадении прямой постоянного сопротивления цепи возбуждения с прямолинейной частью характеристики холостого хода будет равен критическому значению  $\alpha_{кр}$ . Соответствующее ему значение  $r_{B,кр}$  ( $\operatorname{tg} \alpha_{кр} = r_{B,кр}$ ) называется критическим сопротивлением цепи возбуждения. Оно определяет "порог самовозбуждения" — при увеличении  $r_B$  сверх  $r_{B,кр}$  самовозбуждение невозможно.

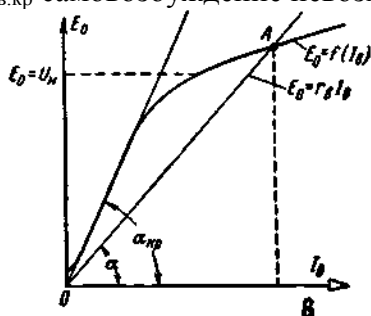


Рис. 5-48. Самовозбуждение генератора с параллельным возбуждением.

При  $r_B = r_{B,кр}$  напряжение на зажимах якоря практически будет неустойчивым. Поток остаточного магнетизма дает очень небольшое напряжение ( $0,02—0,04 U_n$ ), которое может быть практически устойчивым только при холостом ходе. Этим и объясняется то, что у генератора нормального исполнения получить устойчивое напряжение при холостом ходе, которое было бы меньше  $60—70\%$  номинального, не представляется возможным.

Если все же требуется от генератора параллельного возбуждения, чтобы он давал устойчивое напряжение, начиная, например, с  $20\%$  номинального, то приходится переходить к специальному выполнению его главных полюсов. Полюсы при этом собирают из листов, показанных на рис. 5-49, *а*, или их выполняют, как показано на рис. 5-49, *б*. В обоих случаях в полюсах получаются участки (*а* и *б* или участки сплошных листов), которые насыщаются при малом значении потока, вследствие чего характеристика холостого хода искривляется в своей начальной части (рис. 5-50). Генераторы с такой характеристикой применяются в качестве возбудителей, например, для турбогенераторов, для которых требуется изменять их ток возбуждения в широких пределах.

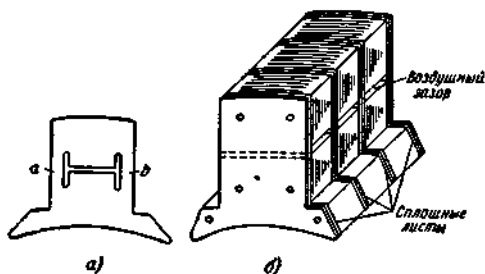


Рис. 5-49. Полюсы для получения искривленной в начальной части характеристики холостого хода.

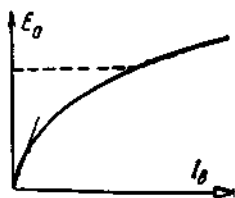


Рис. 5-50. Характеристика холостого хода, искривленная в начальной части.

Обмотка возбуждения должна быть присоединена к зажимам якоря таким образом, чтобы ток, проходящий по этой обмотке, увеличивал поток остаточного магнетизма, в противном случае машина не может самовозбудиться.

Убедиться в наличии остаточного магнетизма можно путем измерения напряжения при холостой работе машины с отключенной обмоткой возбуждения. Если при включении обмотки возбуждения напряжение уменьшается, то это указывает на неправильное присоединение обмотки возбуждения. Следует или поменять местами ее концы, или изменить направление вращения машины. Обычно применяют первый способ. Генераторы с параллельным возбуждением часто встречаются на практике.

Так как ток, ответвляющийся в обмотку возбуждения, составляет небольшую долю номинального тока, то характеристика холостого хода генератора с параллельным возбуждением, снятая для напряжения на зажимах, а не для э.д.с., практически не отличается от той же характеристики генератора с независимым возбуждением; то же можно сказать и о регулировочной характеристике.

Внешняя характеристика генератора с параллельным возбуждением  $U = f(I)$  при  $n = \text{const}$  и  $r_b = \text{const}$  представлена на рис. 5-51. Верхняя кривая здесь представляет собой внешнюю характеристику при постоянном токе возбуждения.

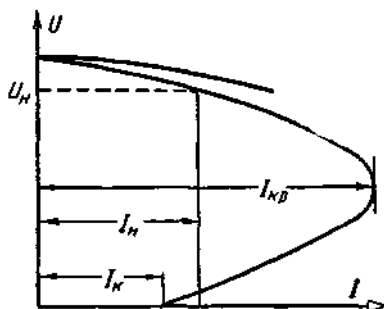


Рис. 5-51. Внешняя характеристика генератора с параллельным возбуждением.

Понижение напряжения на зажимах генератора с параллельным возбуждением будет больше, чем на зажимах генератора независимого возбуждения, работающего при постоянном токе возбуждения. У генератора с параллельным возбуждением напряжение понижается не только из-за реакции якоря и внутренних сопротивлений цепи якоря, но и вследствие уменьшения тока возбуждения.

При некотором нагрузочном токе дальнейшее уменьшение внешнего сопротивления влечет за собой не увеличение тока, а его уменьшение. Этот наибольший возможный ток  $I_{kp}$  генератора с параллельным возбуждением называется критическим током (рис. 5-51).

Представленный на рис. 5-51 вид внешней характеристики объясняется следующим образом. Если мы при критическом токе уменьшим сопротивление внешней цепи, то в первый момент ток в якорю возрастет. Это вызовет возрастание реакции якоря и внутреннего падения напряжения, а следовательно, понижение напряжения на его зажимах, которое еще больше уменьшится вследствие обусловленного им уменьшения тока возбуждения. В результате установится режим работы, при котором напряжение будет снижено на относительно большую величину (например, на 30%), чем было уменьшено внешнее сопротивление (например, на 20%), что и приводит к уменьшению нагрузочного тока.

Когда сопротивление внешней цепи равно нулю, т. е. при коротком замыкании, ток якоря равен  $I_k$  (рис. 5-51). Этот ток обусловлен наличием остаточного магнетизма. Для больших машин он может быть больше номинального.

Внезапное короткое замыкание для генератора с параллельным возбуждением так же опасно, как и для генератора с независимым возбуждением. Магнитный поток здесь не может быстро уменьшиться из-за большой индуктивности обмотки возбуждения; следовательно, и э.д.с., наведенная им в обмотке якоря, будет уменьшаться постепенно, что приводит к большим значениям тока в цепи якоря в процессе перехода к установившемуся режиму короткого замыкания.

Поэтому генераторы с параллельным возбуждением также должны быть снабжены предохранителями, причем при большой их мощности часто устанавливаются быстродействующие выключатели, отключающие короткозамкнутую цепь еще до того, как ток якоря достиг опасных значений.

г) *Генератор с последовательным возбуждением.*

Схема генератора с последовательным возбуждением приведена на рис. 5-52.

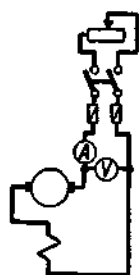


Рис. 5-52. Генератор с последовательным возбуждением.

Характеристику холостого хода этого генератора можно снять только при питании обмотки возбуждения от постороннего источника.



Рис. 5-53. Внешняя характеристика генератора с последовательным возбуждением.

Внешняя характеристика генератора показана на рис. 5-53. Так как одновременно с током в яоре возрастает и ток в обмотке возбуждения, то напряжение растет вместе с нагрузкой. Однако напряжение будет расти только до некоторого предела, так как дальнейшее увеличение тока в обмотке возбуждения увеличивает магнитный поток лишь в небольшой степени из-за насыщения стальных участков магнитной цепи машины. Ток в обмотке якоря вызывает все большее уменьшение напряжения как вследствие реакции якоря, так и вследствие падения напряжения в сопротивлении цепи якоря. Поэтому в дальнейшем при увеличении нагрузочного тока напряжение уменьшается. Генераторы с последовательным возбуждением на практике применяются в редких случаях и только в специальных схемах.

д) *Генератор со смешанным возбуждением.*

Схема генератора со смешанным возбуждением приведена на рис. 5-54. Можно ее изменить, соединив конец параллельной обмотки возбуждения  $a$  с точкой  $b$ . Полученная в этом случае схема принципиально не будет отличаться от приведенной на рис. 5-54.

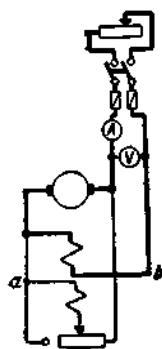


Рис. 5-54. Генератор со смешанным возбуждением.

Мы видели, что у генератора с параллельным возбуждением напряжение при увеличении нагрузки падает и что для поддержания его постоянным нужно увеличивать ток возбуждения.

В генераторе со смешанным возбуждением последовательная обмотка при увеличении нагрузки автоматически увеличивает магнитный поток соответственно току, проходящему по ней.

Таким образом, создается возможность иметь почти постоянное напряжение при любых нагрузках. Внешняя характеристика генератора имеет вид, представленный на рис. 5-55 (кривая *a*). Для получения этой характеристики последовательную обмотку нужно присоединить таким образом, чтобы поток, создаваемый ею, складывался с потоком, создаваемым параллельной обмоткой. Такое соединение последовательной обмотки называется согласным. Оно наиболее часто применяется на практике. При встречном (дифференциальном) включении обеих обмоток — последовательной и параллельной — напряжение при увеличении нагрузки будет резко падать (кривая *c* на рис. 5-55).

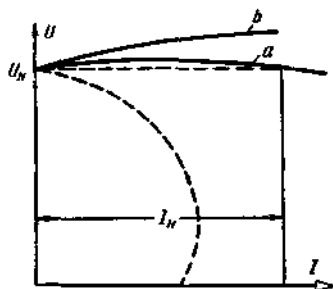


Рис. 5-55. Внешние характеристики генераторов со смешанным возбуждением.

В некоторых случаях применяются генераторы, которые автоматически поддерживают приблизительно постоянное напряжение в конце линии на зажимах приемников. Их внешняя характеристика представлена на рис. 5-55 (кривая *b*).

#### 1. Общие сведения.

##### *a) Общие вопросы теории.*

Для того чтобы двигатель вращался с постоянной скоростью, развиваемый им момент  $M$  должен равняться тормозящему моменту нагрузки  $M_{ст}$ :

$$M_c = M_{ст}. \quad (5-51)$$

Если это равенство нарушается, то скорость вращения двигателя уменьшается или увеличивается до тех пор, пока снова момент двигателя не будет уравновешен моментом нагрузки.

Устойчивая работа двигателя постоянного тока, так же как и асинхронного двигателя (см. § 3-14, *a*), может быть только при выполнении условия

$$\frac{dM_{ст}}{dn} > \frac{dM}{dn}. \quad (5-52)$$

Это условие выполняется при кривых изменения моментов  $M$  и  $M_{ст}$ , показанных на рис. 5-56, *a*, и не выполняется при кривых, показанных на рис. 5-56, *б*. Действительно, в случае кривых рис. 5-56, *a* при возмущении режима работы, вызвавшем увеличение

скорости вращения (положительное приращение  $\Delta n$ ), после прекращения возмущения двигатель вернется в исходную точку, так как тормозящий момент  $M_{ст}$  больше момента двигателя  $M$  ( $\Delta M_{ст} > \Delta M$ ); при отрицательном приращении  $\Delta n$  момент двигателя  $M$  больше тормозящего момента  $M_{ст}$  ( $\Delta M > \Delta M_{ст}$ ), следовательно, двигатель после прекращения возмущения также вернется в исходную точку. Обратные соотношения получаются в случае кривых моментов рис. 5-56,б; при таких кривых двигатель не может работать устойчиво.

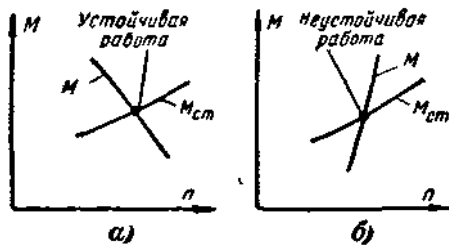


Рис. 5-56. Кривые вращающих моментов.  $M$ —двигателя;  $M_{ст}$  — нагрузочного.

Обычно для устойчивой работы двигателя необходимо, чтобы при увеличении его скорости вращения развиваемый им вращающий момент уменьшался.

Для изменения направления вращения (для реверсирования) двигателя нужно изменить или направление магнитного потока, или направление тока в обмотке якоря; одновременное же изменение направлений потока и тока якоря не приведет к изменению направления вращения, в чем мы можем убедиться, пользуясь "правилом левой руки".

При пуске двигателей в ход, т. е. при включении их в сеть, необходимо последовательно с обмоткой якоря соединить добавочное сопротивление, которое называется пусковым реостатом.

Если бы не было в цепи якоря пускового реостата, то при пуске в первый момент мы получили бы ток в якоре (здесь мы пренебрегаем влиянием индуктивности цепи якоря, которая несколько уменьшает пусковой ток в начальный период)

$$I_a = \frac{U}{\Sigma r}, \quad (5-53)$$

где  $\Sigma r$  — сумма всех сопротивлений внутренней цепи якоря (включая и сопротивление переходных контактов щеток). Так как сопротивление  $\Sigma r$  мало, то ток в якоре получился бы во много раз больше номинального.

Для примера возьмем нормальный двигатель мощностью 10 кВт при напряжении  $U_n = 110$  В, номинальном токе  $I_n = 108$  А и сопротивлении  $\Sigma r = 0,08$  Ом. Начальный пусковой ток этого двигателя, если бы мы его включили в сеть без пускового реостата, был бы

$$I_a = \frac{U_n}{\Sigma r} = \frac{110}{0,08} = 1375, \text{ А,}$$

т. е. превосходил бы почти в 13 раз номинальный ток.

От такого тока могли бы пострадать обмотка якоря и прежде всего коллектор и щетки. Поэтому необходимо последовательно с якорем включать добавочное сопротивление  $r_d$ , чтобы пусковой ток, равный теперь

$$I_a = \frac{U_n}{\Sigma r + r_d}, \quad (5-54)$$

не превышал допустимого для двигателя. Так как время пуска сравнительно невелико, то пусковой ток берут несколько больше номинального, доводя его для небольших двигателей до двукратного значения номинального тока.

При пуске двигатель развивает начальный пусковой момент. Двигатель начинает вращаться; в его обмотке якоря начинает наводиться э.д.с.  $E_a$ . Применяя "правило левой руки", найдем направление вращения двигателя; применяя при этом "правило правой

руки", найдем, что наведенная в якоре э.д.с. направлена против тока и, следовательно, против приложенного к двигателю напряжения. Поэтому она называется противо-э.д.с. или обратной э.д.с. Ее роль при работе машины двигателем была впервые выяснена в работах Э. Х. Ленца и Б. С. Якоби.

При вращении двигателя ток в якоре определяется равенством

$$I_a = \frac{U - E_a}{\Sigma r + r_d} \quad (5-55)$$

По мере нарастания скорости вращения и пропорциональной ей обратной э.д.с.  $E_a$  добавочное сопротивление нужно уменьшать, т. е. выводить пусковой реостат. Выводить пусковой реостат нужно постепенно, чтобы успевали расти скорость вращения и обратная э.д.с.

Ток в якоре при нормальной работе двигателя, когда выведен весь реостат,

$$I_a = \frac{U - E_a}{\Sigma r} \quad (5-56)$$

Согласно изложенному выше можем написать уравнение напряжений двигателя:

$$U = E_a + I_a \Sigma r \quad (5-57)$$

Найдем скорость вращения двигателя. Из (5-14) следует:

$$E_a = c_p n \Phi; \quad (5-58)$$

отсюда, учитывая (5-57), получим:

$$n = c_n \frac{E_a}{\Phi} = c_n \frac{U - I_a \Sigma r}{\Phi}, \quad (5-59)$$

$$c_n = \frac{1}{c_p} = \frac{1}{\frac{p}{a} \cdot \frac{1}{60} N}$$

где  $\frac{1}{a} \cdot \frac{1}{60} N$  - постоянная величина.

Из (5-59) следует, что скорость вращения прямо пропорциональна э.д.с. якоря  $E_a$  и обратно пропорциональна магнитному потоку  $\Phi$ .

В зависимости от способа возбуждения различают двигатели: с параллельным, с последовательным и со смешанным возбуждением.

## 2. Пуск двигателя в ход.

### б) Двигатель с параллельным возбуждением.

Схема двигателя с параллельным возбуждением представлена на рис. 5-57. Пусковой реостат здесь имеет три зажима. Один из них (ручка реостата) присоединяется к сети; другой (конец пускового сопротивления) — к якору; третий (полоска, по которой скользит ручка реостата) — к обмотке возбуждения или через регулировочный реостат  $R_p$ , или непосредственно.

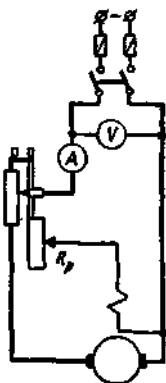


Рис. 5-57. Двигатель с параллельным возбуждением.

Пусковой реостат имеет холостой контакт, не соединенный с пусковым сопротивлением, выполняемый иногда из какого-нибудь изоляционного материала.

Первый контакт пускового реостата соединяется с полоской, к которой присоединена обмотка возбуждения (рис. 5-57). Это делается для того, чтобы цепь возбуждения при остановке двигателя, когда ручка реостата ставится на холостой контакт, была замкнута. Она при этом будет замкнута на обмотку якоря, пусковое сопротивление и регулировочный реостат, если он имеется.

Энергия магнитного поля, запасенная в магнитной системе машины, будет постепенно переходить в электрическую энергию; уменьшение магнитного потока, сцепляющегося с обмоткой возбуждения, вызовет в ней сравнительно небольшую э.д.с. Резкий же разрыв цепи возбуждения при наличии в ней тока приводит к быстрому изменению потока и, следовательно, к появлению большой э.д.с. в обмотке возбуждения, опасной для ее изоляции.

Выключать рубильник следует после того, как ручка реостата поставлена на холостой контакт. Отключая двигатель указанным способом, мы предохраняем контакты рубильника от подгорания и сеть от резкого изменения нагрузки; кроме того, при следующем включении двигателя в сеть мы обеспечиваем пуск его при включенном пусковом реостате.

Магнитный поток  $\Phi$  двигателя с параллельным возбуждением при  $I_b = \text{const}$  изменяется из-за реакции якоря незначительно. Поэтому с большим приближением можно считать в соответствии с (5-49), что его вращающий момент пропорционален току якоря:

$$M \propto I_a. \quad (5-60)$$

Зависимость  $n = f(I)$  при  $I_b = \text{const}$  и  $U = \text{const}$  называется скоростной характеристикой (рис. 5-58). Ток  $I = I_a + I_b$  мало отличается от тока  $I_a$ , так как  $I_b$  составляет небольшую долю от  $I_n$ .

Зависимость  $n = f(M)$  при  $I_b = \text{const}$  и  $U = \text{const}$  называется механической характеристикой (рис. 5-58). Она отличается от скоростной практически только масштабом по оси абсцисс. Сплошная кривая на рис. 5-58 представляет собой обычную характеристику. Она показывает, что скорость вращения с увеличением нагрузки на валу падает.

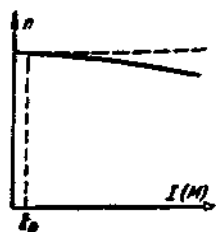


Рис. 5-58. Скоростная  $n = f(I)$  или механическая  $n = f(M)$  характеристика двигателя с параллельным возбуждением.

Обратимся к формуле (5-59) для скорости  $n$ . Из нее видим, что при увеличении тока уменьшается числитель  $U - I_a r$ , при этом будет также уменьшаться знаменатель  $\Phi$  вследствие реакции якоря. Обычно числитель уменьшается больше, чем знаменатель. Поэтому скорость вращения при увеличении  $I$  (или  $M$ ) будет падать. Если же в двигателе создается сильная реакция якоря, что приводит к большому уменьшению потока  $\Phi$ , то скорость вращения с увеличением нагрузки будет не падать, а возрастать, например, согласно пунктирной кривой на рис. 5-58. Двигатель с такой характеристикой для работы в обычных условиях практики непригоден, так как он будет работать неустойчиво (рис. 5-56, б).

Показанный на рис. 5-58 ток  $I_0$  есть ток двигателя при холостом ходе (при отсутствии нагрузки на валу).

Двигатели с параллельным возбуждением являются лучшими из регулируемых электродвигателей. Они позволяют плавно и экономично регулировать скорость вращения.



На рис. 5-59 приведены рабочие характеристики двигателя с параллельным возбуждением:  $M$ ,  $n$ ,  $I$ ,  $\eta = f(P_2)$  при  $U = \text{const}$  и  $I_B = \text{const}$  ( $\eta$  — к.п.д.,  $P_2$  — мощность на валу).

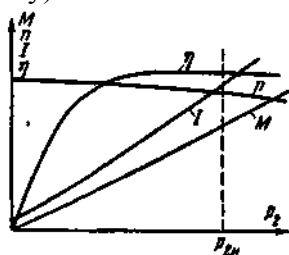


Рис. 5-59. Рабочие характеристики двигателя с параллельным возбуждением.

Формула (5-59) показывает, что для изменения  $n$  достаточно изменять поток  $\Phi$ . Изменение потока достигается путем изменения тока возбуждения при помощи регулировочного реостата  $R_p$  (рис. 5-57). Так как ток возбуждения составляет небольшую долю номинального тока якоря, то при указанном способе регулирования скорости вращения потери в регулировочном реостате незначительны.

При увеличении тока возбуждения скорость вращения падает, при уменьшении тока возбуждения она возрастает.

При уменьшении  $I_B$  поток становится меньше. Так как при этом скорость вращения в первый промежуток времени остается почти постоянной вследствие инерции вращающихся частей, то уменьшается э.д.с.  $E_a$ . Уменьшение  $E_a$  приводит согласно (5-56) к увеличению тока якоря  $I_a$ , причем даже небольшое уменьшение  $E_a$  дает относительно большое увеличение тока  $I_a$ , так как значения  $U$  и  $E_a$  мало отличаются одно от другого.

В качестве примера рассмотрим работу двигателя при  $U = 110$  В,  $E_a = 105$  В,  $r = 0,08$  Ом и токе якоря

$$I_a = \frac{U - E_a}{\Sigma r} = \frac{110 - 105}{0,08} = 62,5 \text{ А.}$$

Если магнитный поток  $\Phi$  уменьшить путем уменьшения тока возбуждения на 5%, то э.д.с.  $E_a$  в первый промежуток времени, когда скорость еще не успела возрасти, будет равна приблизительно 100 В, а ток якоря

$$I_a \approx \frac{110 - 100}{0,08} = 125 \text{ А,}$$

т. е. при уменьшении  $\Phi$  на 5% ток возрастает приблизительно на 100%.

Обращаясь к формуле (5-49), мы устанавливаем, что момент  $M$ , развиваемый двигателем, повышается, потому что  $I_a$  увеличивается больше, чем уменьшается  $\Phi$ . Увеличение  $M$  приводит к увеличению скорости вращения. При ее увеличении будет возрастать э.д.с.  $E_a$ , следовательно, будут уменьшаться  $I_a$  и  $M$ . Режим устанавливается при более высокой скорости вращения, при которой момент двигателя  $M$  будет равен моменту нагрузки  $M_{\text{ст}}$ .

Применяя аналогичные рассуждения, можно доказать, что при увеличении тока возбуждения скорость вращения будет падать.

Рассмотрим, как производится определение скоростной характеристики  $n = f(I)$  и механической характеристики  $n = f(M)$ . Оно может быть произведено при помощи кривой  $E_a/n = f(I_B)$ , полученной из характеристики холостого хода, снятой опытным путем или найденной путем расчета. Эта кривая представлена на рис 5-60. При других масштабах на осях координат она представляет собой зависимость  $\Phi = f(I_B)$ , так как

$$\frac{E_a}{n} = \frac{1}{60} \cdot \frac{p}{a} N \Phi = c \Phi$$

Будем считать, что известны величины при номинальной нагрузке:  $U_n$ ,  $I_{an}$  ( $I_{an} = I_n - I_{B.n}$ ),  $n_n$ ,  $I_{B.n}$ ,  $I_{B(p.я)}$  или  $F_{p.я}$  ( $I_{B(p.я)}$  - ток возбуждения, соответствующий размагничивающей

н.с. реакции якоря  $F_{р.я}$ ) Тогда определение скорости вращения  $n$  при холостом ходе производится следующим образом.

Сначала находим э.д.с. якоря при номинальной нагрузке  $E_{aн} = U_n - I_{aн} r$ , затем — э.д.с. якоря при холостом ходе  $E_0 = U_n - I_{a0} r$ , причем для двигателей, имеющих ток холостого хода  $I_{a0} < 0,1 I_n$  можно приближенно принять  $E_{a0} \approx U_n$ . Далее по кривой рис. 5-60

находим для  $I_{в.н} = \overline{OA_0}$ :

$$\frac{\overline{A_0 B_0}}{A_0 B_0} = \frac{E_{a0}}{n_0} \approx \frac{U_n}{n_0} \quad (5-61)$$

и для  $I_{в.н} - I_{в(р.я)} = \overline{OA_n}$ :

$$\frac{\overline{A_n B_n}}{A_n B_n} = \frac{E_{ан}}{n_n} \quad (5-62)$$

Из равенств (5-61) и (5-62) получаем:

$$n_0 = n_n \frac{E_{a0}}{E_{ан}} \frac{\overline{A_n B_n}}{\overline{A_0 B_0}} \approx n_n \frac{U_n}{E_{ан}} \frac{\overline{A_n B_n}}{\overline{A_0 B_0}} \quad (5-63)$$

$$\frac{\overline{A_n B_n}}{\overline{A_0 B_0}} = \frac{\Phi_n}{\Phi_0}$$

Очевидно, что  $\frac{\overline{A_n B_n}}{\overline{A_0 B_0}} = \frac{\Phi_n}{\Phi_0}$ , т. е. отношению потоков при нагрузке  $\Phi_n$  и при холостом ходе  $\Phi_0$ .

Если известна скорость вращения  $n_0$  при холостом ходе, то скорость вращения при нагрузке равна:

$$n_n = n_0 \frac{E_{ан}}{E_{a0}} \frac{\overline{A_0 B_0}}{\overline{A_n B_n}} \approx n_0 \frac{E_{ан}}{U_n} \frac{\overline{A_0 B_0}}{\overline{A_n B_n}} \quad (5-64)$$

Промежуточные значения скорости вращения при  $I_a < I_{ан}$  найдем определив  $E_a$  и  $I_{в(р.я)}$  для тока  $I_a$ .

Зная  $E_a$ ,  $I_a$  и  $n$ , найдем вращающий момент, кг·м

$$M = 0,102 \cdot 60 \frac{E_a I_a}{2\pi n} = \frac{0,973}{n} E_a I_a \quad (5-65)$$

и, следовательно, можем построить механическую характеристику  $n = f(M)$ . Как отмечалось, для устойчивой работы двигателя необходимо, чтобы  $n_0$  было больше  $n_n$ .

Если двигатель с параллельным возбуждением предназначается для широких пределов регулирования скорости вращения (например, 4:1) путем изменения тока возбуждения, то при ослабленном поле реакция якоря может оказаться слишком сильной (работа будет протекать на начальной части кривой рис. 5-60) и мы можем получить

$\overline{A_0 B_0} / \overline{A_n B_n} > E_{a0} / E_{ан}$  и  $n_n > n_0$  согласно (5-64).

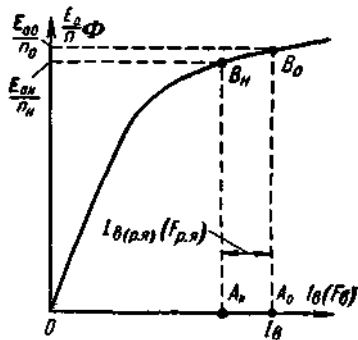


Рис. 5-60. К определению скоростной характеристики.

Тогда необходимо для уменьшения относительного значения реакции якоря (величины  $I_{в(р.я)} / I_{в.н}$ ) выполнить двигатель с увеличенным воздушным зазором  $\square$ . Такие

двигатели стоят дороже, чем нормальные двигатели с пределами регулирования скорости вращения примерно 1:1,5.

Регулировать скорость вращения двигателя можно также путем изменения напряжения  $U$  на зажимах якоря, что следует из формулы (5-59). Изменение  $U$  может быть достигнуто при помощи реостата, включенного в цепь якоря. Такой способ регулирования скорости вращения неэкономичен, так как он приводит к непроизводительной затрате большой энергии в реостате. Действительно, при уменьшении  $n$ , например, на 50%, если при этом ток в якоре остается неизменным, мы должны уменьшить  $U$  почти на 50% и, следовательно, почти половину мощности поглотить в реостате. Реостат при этом получается громоздким и дорогим, так как рассчитывается на длительную нагрузку большим током.

#### 4. Основные характеристики двигателей постоянного тока.

Иногда в специальных случаях применяют отдельный генератор для питания двигателя, скорость вращения которого нужно регулировать в широких пределах. Получается так называемая система "генератор — двигатель". Соответствующая схема показана на рис. 5-61. Здесь ДПТ — двигатель переменного тока (обычно асинхронный); Г — генератор постоянного тока независимого возбуждения, получающий ток возбуждения от небольшого генератора с параллельным возбуждением В; Д — регулируемый двигатель и РМ — рабочий механизм (например, прокатный стан). Регулирование скорости вращения двигателя получается достаточно экономичным, так как здесь изменение напряжения  $U$  на зажимах двигателя достигается путем изменения относительно небольшого тока в обмотке возбуждения генератора. В схеме не требуется также пусковой реостат, так как пуск производится при пониженном напряжении, которое в дальнейшем постепенно повышается.

Здесь же легко осуществляется реверсирование двигателя (изменение направления вращения), если это требуется. В этом случае изменяют направление тока в обмотке возбуждения генератора при помощи переключателя (не показанного на рис. 5-61).

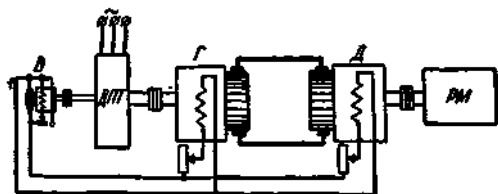


Рис. 5-61. Система генератор-двигатель.

#### г) Двигатель с последовательным возбуждением.

Схема двигателя с последовательным возбуждением приведена на рис. 5-62. Здесь ток возбуждения равен току якоря. Вследствие этого при малых насыщениях, когда можно считать  $\Phi \propto I_a$ , вращающий момент двигателя пропорционален квадрату тока [см. (5-49)]. При больших значениях тока, когда стальные участки магнитной цепи насыщаются, момент двигателя почти пропорционален току.

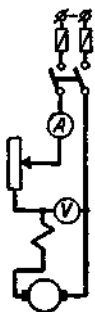


Рис. 5-62. Двигатель с последовательным возбуждением.

С увеличением нагрузки при увеличении, следовательно, тока возрастает магнитный поток, что приводит согласно (5-59) к снижению скорости вращения. При

холостом ходе и при малых нагрузках на валу ток двигателя имеет небольшое значение. Небольшое значение будет иметь и магнитный поток. Следовательно, скорость вращения согласно (5-59) при этом сильно возрастает. Она будет превышать допустимое значение в отношении механической прочности вращающихся частей машины. Поэтому нельзя допускать работу двигателя с последовательным возбуждением при холостом ходе и при малых нагрузках. Обычно для нормальных двигателей нагрузка не должна быть меньше 25—30% номинальной. Лишь малые двигатели (мощностью на десятки ватт) допускают работу при холостом ходе, так как их собственные потери достаточно велики.

На рис. 5-63 представлены рабочие характеристики двигателя с последовательным возбуждением. Пунктирные части характеристик относятся к тем нагрузкам, при которых не может быть допущена работа двигателя вследствие большой скорости вращения. Механическая характеристика двигателя с последовательным возбуждением  $n = f(M)$  при  $U = \text{const}$  представлена на рис. 5-64.

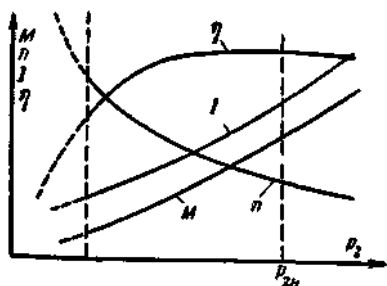


Рис. 5-63. Рабочие характеристики двигателя с последовательным возбуждением.

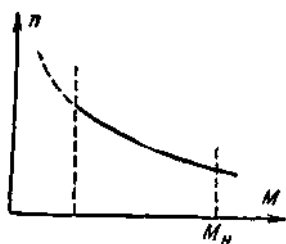


Рис. 5-64. Механическая характеристика двигателя с последовательным возбуждением.

Благодаря своим свойствам двигатель особенно пригоден для электрической тяги, для электроприводов к кранам и подъемникам. В этих случаях требуется, чтобы при больших нагрузках скорость резко уменьшалась, а вращающий момент (сила тяги) значительно увеличивался.

Скорость вращения последовательного двигателя можно регулировать путем изменения напряжения  $U$  на зажимах якоря или путем изменения магнитного потока. На рис. 5-65 показаны схемы: а) для регулирования путем изменения  $U$  при помощи реостата и б) для регулирования путем изменения потока. Так как обычно требуется понижение скорости вращения, то чаще применяют первый способ, который так же неэкономичен, как соответствующий способ регулирования скорости вращения двигателя с параллельным возбуждением.

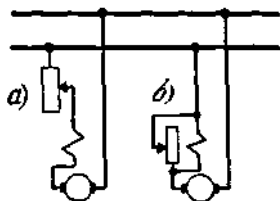


Рис. 5-65. Схемы для регулирования скорости вращения двигателя с последовательным возбуждением.

Для электрической тяги (например, для трамвая) применяются два одинаковых двигателя, установленных на одном и том же вагоне. В этом случае можно получить

необходимое число ступеней скорости вращения (7—10) путем комбинирования последовательного и параллельного соединения двигателей вместе с регулировочными сопротивлениями.

д) *Двигатель со смешанным возбуждением.*

Схема двигателя со смешанным возбуждением представлена на рис. 5-66. Обычно последовательная обмотка включается согласно с параллельной таким образом, чтобы ее н.с. складывалась с н.с. параллельной обмотки. В этом случае скорость вращения двигателя при увеличении нагрузки будет более резко падать, чем у двигателя с параллельным возбуждением и менее резко, чем у двигателя с последовательным возбуждением.

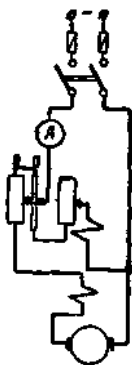


Рис. 5-66. Двигатель со смешанным возбуждением.

Двигатели с параллельным возбуждением, имеющие возрастающую скоростную характеристику (пунктирная кривая на рис. 5-58), не могут работать устойчиво, поэтому они снабжаются последовательной обмоткой с небольшим числом витков, действующей согласно с параллельной обмоткой.

Число ее витков рассчитывается таким образом, чтобы получилась падающая скоростная характеристика, при которой работа двигателя становится устойчивой. Такая последовательная обмотка называется стабилизирующей.

## 5. Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока.

Способы регулирования частоты вращения. Частота вращения двигателя постоянного тока

(8.107)

$$n = [U - Ia(\Sigma Ra + R_{доб})] / (ce\Phi).$$

Следовательно, ее можно регулировать тремя способами: 1) включением добавочного реостата  $R_{доб}$  в цепь обмотки якоря; 2) изменением магнитного потока  $\Phi$ ; 3) изменением питающего напряжения  $U$ .

На примере двигателя с параллельным возбуждением рассмотрим принципиальные особенности, свойственные этим способам регулирования.

Включение реостата в цепь якоря. При включении реостата в цепь якоря частота вращения с ростом нагрузки уменьшается более резко, чем при работе двигателя без реостата:

(8.108)

$$n = \frac{U - Ia(\Sigma Ra + R_{доб})}{ce\Phi} = \frac{U}{ce\Phi} - \frac{Ia(\Sigma Ra + R_{доб})}{ce\Phi} = n_0 - \Delta n.$$

Это показано на рис. 8.66, где приведены скоростные и механические характеристики двигателя с параллельным возбуждением: 1 — естественная (при  $R_{доб} = 0$ ); 2 — реостатная (при  $R_{доб} > 0$ ). Частоты вращения при холостом ходе для обеих характеристик равны, значения  $\Delta n$  (уменьшение частоты вращения при нагрузке) различны. При одном и том же токе якоря  $\Delta n_{ест} / \Delta n_{реост} = \Sigma R_a / (\Sigma R_a + R_{доб})$ . Чем больше добавочное сопротивление  $R_{доб}$ , тем круче с увеличением нагрузки падает частота вращения.

Механические характеристики  $n = f(M)$  двигателя с параллельным возбуждением можно получить из скоростных характеристик  $n = f(I_a)$  путем изменения масштаба по оси абсцисс, так как для двигателя этого типа  $M = cM\Phi I_a = cI_a$  (момент пропорционален току якоря).

Основным недостатком данного метода регулирования является возникновение больших потерь энергии в реостате (особенно при низких частотах вращения), что видно из соотношения

(8.109)

$$\Delta n/n_0 = I_a(\Sigma R_a + R_{доб})/U = I_a^2(\Sigma R_a + R_{доб})/(UI_a) = \Delta P_{эл} / P_1,$$

где  $\Delta P_{эл}$  — электрические потери в цепи якоря;  $P_1$  — мощность, подведенная к якорю.

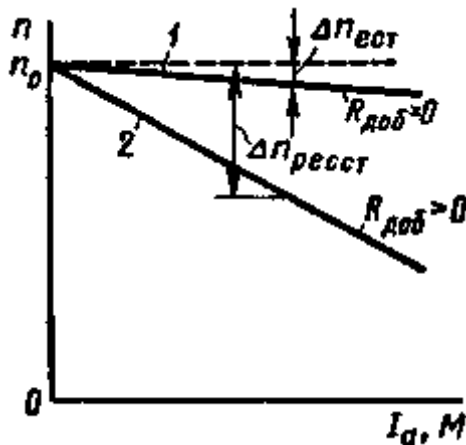


Рис. 8.66. Скоростные и механические характеристики двигателя с параллельным возбуждением при регулировании частоты вращения путем включения реостата в цепь якоря

Решая уравнение (8.109) относительно  $\Delta P_{эл}$ , получаем

(8.110)

$$\Delta P_{эл} = P_1 \Delta n/n_0 = P_1 (n_0 - n)/n_0,$$

т.е. с уменьшением частоты вращения якоря потери линейно возрастают.

Очевидно, что данный способ позволяет только уменьшать частоту вращения (по сравнению с частотой при естественной характеристике). Иногда существенным является то обстоятельство, что при включении в цепь якоря значительного сопротивления характеристики двигателя становятся крутопадающими (мягкими), вследствие чего небольшие изменения нагрузочного момента приводят к большим изменениям частоты вращения.

Изменение магнитного потока. Чтобы изменить магнитный поток, необходимо регулировать ток возбуждения двигателя. При различных магнитных потоках  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  частота вращения определяется формулами

(8.111)

$$\left. \begin{aligned} n_1 &= \frac{U - I_a \Sigma R_a}{ce\Phi_1} = \frac{U}{ce\Phi_1} - \frac{I_a \Sigma R_a}{ce\Phi_1} = n_{01} - \Delta n_1. \\ n_2 &= \frac{U - I_a \Sigma R_a}{ce\Phi_2} = \frac{U}{ce\Phi_2} - \frac{I_a \Sigma R_a}{ce\Phi_2} = n_{02} - \Delta n_2. \end{aligned} \right\}$$

В двигателе с параллельным возбуждением, например, частота вращения при холостом ходе и падение частоты вращения изменяются обратно пропорционально изменению магнитного потока:

(8.112)

$$n_{02}/n_{01} = \Delta n_2/\Delta n_1 = \Phi_1/\Phi_2.$$

Таким образом, скоростные характеристики 1 и 2 двигателя при различных магнитных потоках  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  не являются параллельными (рис. 8.67,а). Эти характеристики пересекаются в точке *A* при частоте вращения, равной нулю, так как в данном случае ток  $I_{ак}$  не зависит от потока:

(8.113)

$$I_{ак} = U/\Sigma R_a$$

и определяется значениями напряжения и сопротивления цепи якоря. Значение тока  $I_{ак}$  при  $n = 0$  называют током короткого замыкания.

Механические характеристики для двигателя с параллельным возбуждением строят на основании следующих соображений. Каждая из механических характеристик является практически линейной (если пренебречь реакцией якоря) и может быть построена по двум точкам: точке холостого хода, в которой момент равен нулю, и точке короткого замыкания, в которой момент максимален.

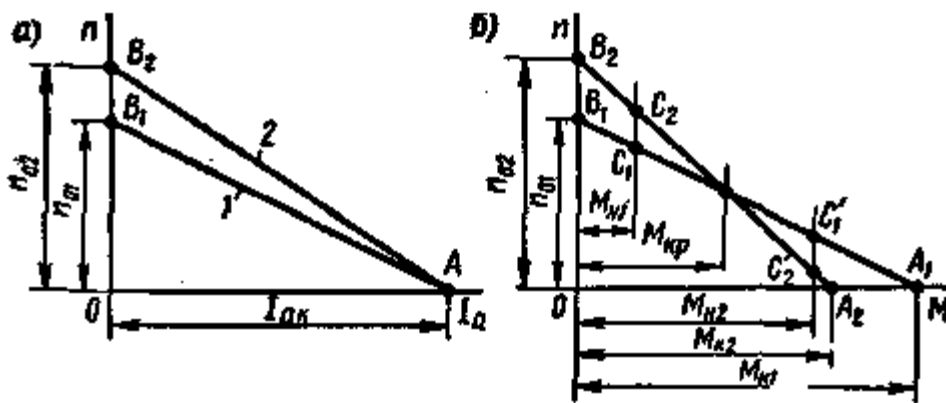


Рис. 8.67. Скоростные и механические характеристики двигателя с параллельным возбуждением при регулировании частоты вращения путем изменения магнитного потока

Сравнивая моменты при коротком замыкании, соответствующие различным значениям магнитного потока, получаем

(8.114)

$$M_{K1}/M_{K2} = cM\Phi_1 I_{ak} / (cM\Phi_2 I_{ak}) = \Phi_1/\Phi_2.$$

Таким образом, с уменьшением магнитного потока частота вращения при холостом ходе возрастает, а момент при коротком замыкании снижается. Следовательно, механические характеристики, построенные при различных значениях магнитного потока, пересекаются при некотором значении момента  $M_{кр}$  и частоте вращения, меньшей частоты вращения при холостом ходе, но большей нуля (рис. 8.67, б). Из рассмотрения механических характеристик видно, что при значениях нагрузочного момента, меньших  $M_{кр}$ , уменьшение потока ведет к увеличению частоты вращения (см. точки  $C_1$  и  $C_2$  при нагрузочном моменте  $M_{H1}$ ). При значениях нагрузочного момента, больших  $M_{кр}$ , уменьшение потока приводит к уменьшению частоты вращения (см. точки  $C'_1$  и  $C'_2$  при нагрузочном моменте  $M_{H2}$ ).

В двигателях параллельного возбуждения средней и большой мощности уменьшение потока используют для повышения частоты вращения (рис. 8.68, а). В микродвигателях, наоборот, магнитный поток уменьшают для снижения частоты вращения.

Аналогично располагаются и механические характеристики у двигателей с последовательным возбуждением; в двигателях большой и средней мощности при уменьшении магнитного потока частота вращения возрастает (рис. 8.68, б).

Уменьшение магнитного потока в двигателях последовательного возбуждения осуществляют путем включения регулировочного реостата  $R_{p.v}$  параллельно обмотке возбуждения  $OB$  (рис. 8.69), вследствие чего ток возбуждения

(8.115)

$$I_v = I_a R_{p.v} / (R_v + R_{p.v}) = \beta I_a,$$

где  $R_{p.v}$  — сопротивление регулировочного реостата, включенного параллельно обмотке возбуждения;  $\beta = I_v/I_a$  — коэффициент регулирования возбуждения.



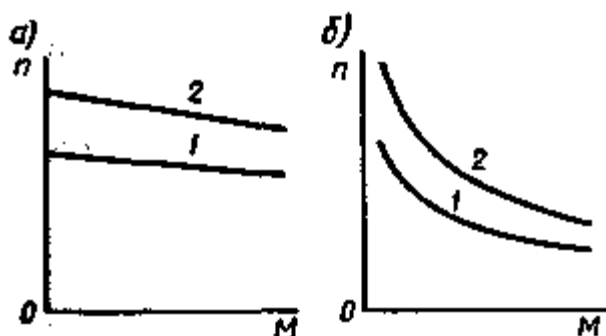


Рис. 8.68. Механические характеристики двигателей: 1 — при нормальном возбуждении; 2 — при уменьшении магнитного потока

При включении реостата  $R_{p.v}$  параллельно обмотке возбуждения требуемое распределение тока  $I_a$  между обмоткой и реостатом обеспечивается только при стационарном режиме. При переходных процессах, когда токи  $I_a$  и  $I_b$  изменяются, в обмотке возбуждения возникает значительная ЭДС самоиндукции, под действием которой ток  $I_b$  уменьшается по сравнению с его значением при стационарном режиме, а ток  $I_{p.v}$  возрастает, т. е. происходит значительное ослабление возбуждения. Наиболее опасен этот режим для двигателей электрифицированного транспорта (электровозов, электропоездов, трамваев, троллейбусов). При отключении двигателя от сети и последующем включении (при отрыве токоприемника от контактного провода) в первый момент почти весь ток  $I_a$  идет по реостату  $R_{p.v}$ , а ток  $I_b$  весьма мал. Это приводит к значительному возрастанию тока  $I_a$  из-за резкого уменьшения ЭДС  $E$ , индуцированной в обмотке якоря. Практически при этих условиях возникает резкий бросок тока  $I_a$ , сопровождающийся нарушением нормальной коммутации и образованием кругового огня.

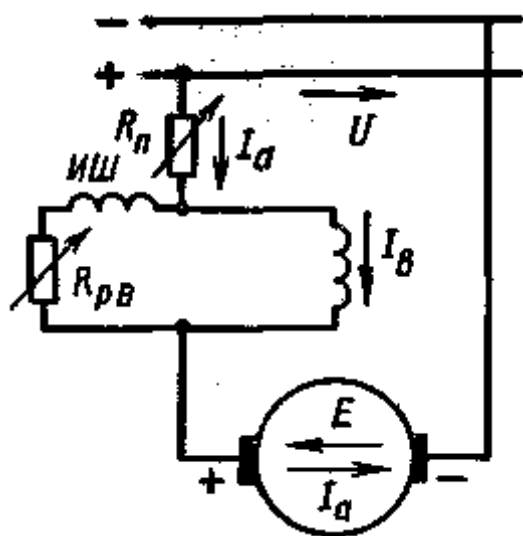


Рис. 8.69. Схема включения регулировочного реостата в двигателе с последовательным

возбуждением

Чтобы обеспечить при переходных процессах такое же распределение тока  $I_a$  между обмоткой возбуждения и реостатом  $R_{p.v}$ , как и при стационарном режиме, последовательно с реостатом включают индуктивный шунт  $ИШ$  (катушку с ферромагнитным сердечником). Индуктивность его выбирают так, чтобы отношение индуктивностей реостата и обмотки возбуждения было приблизительно равно отношению их сопротивлений.

Рассмотренный способ регулирования весьма прост и экономичен, поэтому его широко применяют на практике. Однако при этом регулирование частоты вращения можно осуществить только в сравнительно небольшом диапазоне; обычно  $n_{max}/n_{min} = 2 \div 5$ . Нижний предел  $n_{min}$  ограничивается насыщением магнитной цепи машины, которое не позволяет увеличивать в значительной степени магнитный поток. Верхний предел  $n_{max}$  определяется условиями устойчивости (при сильном уменьшении  $\Phi$  двигатель идет в «разнос»), а также тем, что при глубоком ослаблении возбуждения резко увеличивается искажающее действие реакции якоря и возрастает реактивная ЭДС, что повышает опасность возникновения искрения на коллекторе и появления кругового огня. Поэтому двигатели, предназначенные для работы в режимах глубокого ослабления возбуждения, должны иметь компенсационную обмотку и пониженное значение реактивной ЭДС при номинальном режиме.

Изменение питающего напряжения на зажимах якоря. При изменении питающего напряжения от  $U_1$  до  $U_2$  частоты вращения определяются соответственно формулами

(8.116)

$$n_1 = (U_1 - I_a \Sigma R_a) / (ce\Phi) = U_1 / (ce\Phi) - I_a \Sigma R_a / (ce\Phi) = n_{01} - \Delta n_1;$$

(8.117)

$$n_2 = (U_2 - I_a \Sigma R_a) / (ce\Phi) = U_2 / (ce\Phi) - I_a \Sigma R_a / (ce\Phi) = n_{02} - \Delta n_2.$$

В двигателе с параллельным возбуждением частота вращения при холостом ходе изменяется пропорционально изменению напряжения, т. е.  $n_{02}/n_{01} = U_2/U_1$ , а уменьшение частоты вращения, обусловленное воздействием нагрузки, при  $M_n = \text{const}$  остается неизменным:  $\Delta n_1 = \Delta n_2 = \text{const}$ . В связи с этим скоростные характеристики двигателя с параллельным возбуждением представляют собой семейство параллельных прямых 1, 2 и 3 (рис. 8.70, а). Механические характеристики  $n = f(M)$  получаются из скоростных путем изменения масштаба оси абсцисс, так как момент пропорционален току якоря.

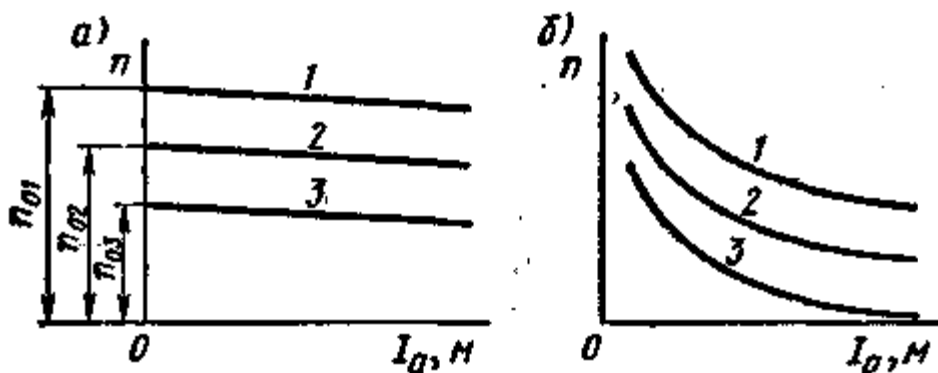


Рис. 8.70. Скоростные и механические характеристики двигателей при регулировании частоты вращения путем изменения напряжения на зажимах якоря

Скоростные и механические характеристики двигателя с последовательным возбуждением строят аналогично (рис. 8.70, б). Регулирование частоты вращения двигателя путем изменения напряжения на зажимах якоря обычно ведут «вниз», т. е. уменьшают напряжение и частоту вращения по сравнению с номинальными.

Изменение направления вращения. Чтобы изменить направление вращения двигателя, необходимо изменить направление электромагнитного момента  $M$ , действующего на якорь. Как следует из (8.84), это можно осуществить двумя способами: путем изменения направления тока  $I_a$  в обмотке якоря или изменения направления магнитного потока  $\Phi$ , т. е. тока возбуждения. Для этого переключают провода, подводящие ток к обмотке якоря или обмотке возбуждения.

### 1.3 Лекция №3 (2 часа).

**Тема: «Назначение, устройство и принцип действия трансформаторов. Рабочий процесс трансформатора»**

#### 1.3.1 Вопросы лекции:

1. Назначение, классификация и область применения.
2. Принцип действия трансформатора.
3. Устройство и конструктивное исполнение отдельных элементов трансформатора.
4. Режим холостого хода.
5. Режим работы трансформатора под нагрузкой.
6. Схемы замещения трансформатора.

#### 1.3.2 Краткое содержание вопросов

1. Назначение, классификация и область применения.

Трансформатор представляет собой статический электромагнитный аппарат с двумя (или больше) обмотками, имеющими между собой магнитную связь, осуществляемую переменным магнитным полем, и служит для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения при сохранении частоты тока неизменной.

Для усиления магнитной связи между обмотками они помещаются на стальном сердечнике (рис. 2-1). Трансформаторы, не имеющие стального сердечника, называются воздушными. Они применяются в специальных случаях при преобразовании переменных токов высокой частоты (от 10000—20000 Гц и выше). Мы будем рассматривать трансформаторы со стальным сердечником.

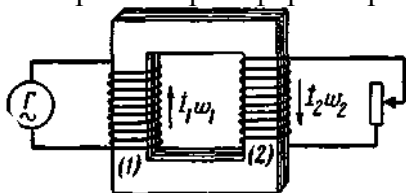


Рис. 2-1. Двухобмоточный трансформатор.  
Г — генератор переменного тока.

Трансформатор имеет не меньше двух обмоток; из них первичной обмоткой  $I$  называется обмотка, которая получает энергию преобразуемого переменного тока, вторичными обмотками  $2$  — обмотки, которые отдают энергию преобразованного переменного тока.

Трансформаторы применяются в основном для преобразования однофазного и трехфазного тока. В соответствии с этим различают однофазные и трехфазные трансформаторы.

Впервые трансформаторы получили техническое применение в схемах со свечами Яблочкова. П. Н. Яблочков разработал конструкцию однофазного трансформатора с разомкнутым сердечником и при своих опытах, а также при эксплуатации своих осветительных установок выявил основные его свойства.

Техническое применение для передачи электрической энергии на дальние расстояния трансформаторы начинают получать в конце 80-х годов прошлого столетия.

В системе электропередачи трансформаторы являются необходимыми элементами. Передача большой мощности на дальние расстояния практически может быть осуществлена только при относительно небольшом значении тока и, следовательно, при высоком напряжении.

В начале линии электропередачи устанавливаются трансформаторы, повышающие напряжение переменного тока, вырабатываемого на электрических станциях. Напряжение в начале линии электропередачи берут тем выше, чем больше длина линии и передаваемая мощность. Оно достигает 220—250 кВ при расстоянии 200—400 км и при мощности 300—200 тыс кВт. При расстоянии около 1000 км и мощности порядка 1 млн кВт (например, для электропередачи Куйбышев — Москва и Волгоград — Москва) требуется напряжение 400—500 кВ.

В конце линии электропередачи, устанавливаются понижающие напряжение трансформаторы, так как для распределения энергии по заводам, фабрикам, жилым домам и колхозам необходимы сравнительно низкие напряжения.

Впервые трехфазная линия электропередачи высокого напряжения (15000 В; из Лауфена на Неккаре до Франкфурта-на-Майне, протяженность около 175 км), положившая начало широким работам по электрификации, была построена при ближайшем участии русского инженера М.О. Доливо-Добровольского. Им же были разработаны конструкции трехфазных трансформаторов, основные черты которых сохранились до настоящего времени.

В настоящее время трансформаторы находят себе самое широкое применение. Существует очень много разнообразных типов их, различающихся как по назначению, так и по выполнению.

Прежде всего нужно выделить группу силовых трансформаторов, которым будет уделено основное внимание в последующем изложении. Это те трансформаторы, которые устанавливаются в начале и конце линий электропередачи, на заводах и фабриках, в жилых домах, при электрификации сельского хозяйства. Такие трансформаторы строятся на мощности от нескольких до десятков тысяч киловольт-ампер.

Переменный ток по пути от электрической станции, где он создается, до потребителя обычно приходится трансформировать 3—4 раза. Отсюда следует, что мощность силовых трансформаторов, необходимых для передачи и распределения электроэнергии, в 3—4 раза больше мощности установленных на электрических станциях генераторов.

Каждый трансформатор снабжается щитком, прикрепленным на видном месте, с указанными на нем номинальными величинами. Последние характеризуют режим работы, для которого трансформатор предназначен. На щитке трансформатора указываются следующие номинальные величины:

1. кажущаяся мощность, ВА или кВА;
2. линейные напряжения, В или кВ;
3. линейные токи, А, при номинальной мощности;
4. частота, Гц;
5. число фаз;
6. схема и группа соединений (§ 2-12);
7. напряжение короткого замыкания (§ 2-7);
8. режим работы (длительный или кратковременный);
9. способ охлаждения.

Кроме того, на щитке трансформатора приводятся дополнительные данные, необходимые при установке и эксплуатации трансформатора:

10. полный вес трансформатора;
  11. вес масла;
- вес выемной (внутренней, опущенной в масло) части трансформатора.

## 2. Принцип действия трансформатора.

Электромагнитная схема однофазного двухобмоточного трансформатора состоит из двух обмоток (рис. 2.1), размещенных на замкнутом магнитопроводе, который выполнен из ферромагнитного материала. Применение ферромагнитного магнитопровода позволяет усилить электромагнитную связь между обмотками, т. е. уменьшить магнитное сопротивление контура, по которому проходит магнитный поток машины. Первичную обмотку 1 подключают к источнику переменного тока — электрической сети с напряжением  $u_1$ . Ко вторичной обмотке 2 присоединяют сопротивление нагрузки  $Z_H$ .

Обмотку более высокого напряжения называют *обмоткой высшего напряжения* (ВН), а низкого напряжения — *обмоткой низшего напряжения* (НН). Начала и концы обмотки ВН обозначают буквами  $A$  и  $X$ ; обмотки НН — буквами  $a$  и  $x$ .

При подключении к сети в первичной обмотке возникает переменный ток  $i_1$ , который создает переменный магнитный поток  $\Phi$ , замыкающийся по магнитопроводу. Поток  $\Phi$  индуцирует в обеих обмотках переменные ЭДС —  $e_1$  и  $e_2$ , пропорциональные, согласно закону Максвелла, числам витков  $w_1$  и  $w_2$  соответствующей обмотки и скорости изменения потока  $d\Phi/dt$ .

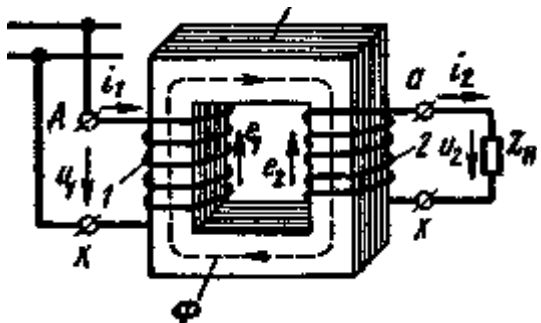


Рис. 2.1. Электромагнитная система однофазного трансформатора: 1, 2 — первичная и вторичная обмотки; 3 — магнитопровод

Таким образом, мгновенные значения ЭДС, индуцированные в каждой обмотке,

$$e_1 = -w_1 d\Phi/dt; \quad e_2 = -w_2 d\Phi/dt.$$

Следовательно, отношение мгновенных и действующих ЭДС в обмотках определяется выражением

$$E_1/E_2 = e_1/e_2 = w_1/w_2. \quad (2.1)$$

Если пренебречь падениями напряжения в обмотках трансформатора, которые обычно не превышают 3 — 5% от номинальных значений напряжений  $U_1$  и  $U_2$ , и считать  $E_1 \approx U_1$  и  $E_2 \approx U_2$ , то получим

$$U_1/U_2 \approx w_1/w_2. \quad (2.2)$$

Следовательно, подбирая соответствующим образом числа витков обмоток, при заданном напряжении  $U_1$  можно получить желаемое напряжение  $U_2$ . Если необходимо повысить вторичное напряжение, то число витков  $w_2$  берут больше числа  $w_1$ ; такой трансформатор называют *повышающим*. Если требуется уменьшить напряжение  $U_2$ , то число витков  $w_2$  берут меньшим  $w_1$ ; такой трансформатор называют *понижающим*,

Отношение ЭДС  $E_{BH}$  обмотки высшего напряжения к ЭДС  $E_{HH}$  обмотки низшего напряжения (или отношение их чисел витков) называют *коэффициентом трансформации*

$$k = E_{BH}/E_{HH} = w_{BH}/w_{HH} \quad (2.3)$$

Коэффициент  $k$  всегда больше единицы.

В системах передачи и распределения энергии в ряде случаев применяют трехобмоточные трансформаторы, а в устройствах радиоэлектроники и автоматики — многообмоточные трансформаторы. В таких трансформаторах на магнитопроводе размещают три или большее число изолированных друг от друга обмоток, что дает возможность при питании одной из обмоток получать два или большее число различных напряжений ( $U_2$ ,  $U_3$ ,  $U_4$  и т.д.) для электроснабжения двух или большего числа групп потребителей. В трехобмоточных силовых трансформаторах различают обмотки высшего, низшего и среднего (СН) напряжений.

В трансформаторе преобразуются только напряжения и токи. Мощность же остается приблизительно постоянной (она несколько уменьшается из-за внутренних потерь энергии в трансформаторе). Следовательно,

$$I_1/I_2 \approx U_2/U_1 \approx w_2/w_1. \quad (2.4)$$

При увеличении вторичного напряжения трансформатора в  $k$  раз по сравнению с первичным, ток  $i_2$  во вторичной обмотке соответственно уменьшается в  $k$  раз.

*Трансформатор может работать только в цепях переменного тока.* Если первичную обмотку трансформатора подключить к источнику постоянного тока, то в его магнитопроводе образуется магнитный поток, постоянный во времени по величине и направлению. Поэтому в первичной и вторичной обмотках в установившемся режиме не индуцируются ЭДС, а следовательно, не передается электрическая энергия из первичной цепи во вторичную. Такой режим опасен для трансформатора, так как из-за отсутствия ЭДС  $E_1$  первичной обмотке ток  $I_1 = U_1/R_1$  весьма большой.

Важным свойством трансформатора, используемым в устройствах автоматики и радиоэлектроники, является способность его преобразовывать нагрузочное сопротивление. Если к источнику переменного тока подключить сопротивление  $R$  через трансформатор с коэффициентом трансформации  $k$ , то для цепи источника

$$R' = P_1/I_1^2 \approx P_2/I_2^2 \approx I_2^2 R / I_1^2 \approx k^2 R \quad (2.5)$$

где  $P_1$  — мощность, потребляемая трансформатором от источника переменного тока, Вт;  $P_2 = I_2^2 R \approx P_1$  — мощность, потребляемая сопротивлением  $R$  от трансформатора.

Таким образом, *трансформатор изменяет значение сопротивления  $R$  в  $k^2$  раз*. Это свойство широко используют при разработке различных электрических схем для согласования сопротивлений нагрузки с внутренним сопротивлением источников электрической энергии.

### 3. Устройство и конструктивное исполнение отдельных элементов трансформатора.

Основными частями трансформатора являются его сердечник и обмотки. Сердечник для уменьшения потерь от вихревых токов собирается из листов специальной электротехнической стали с относительным содержанием кремния до 4—5%. Толщина стали берется 0,5 или 0,35 мм (еще более тонкие листы применяются при повышенной частоте тока). Листы перед сборкой сердечника покрываются с обеих сторон лаком, что дает более прочную и тонкую изоляцию между листами, чем бумага, которой иногда оклеиваются листы до нарезки их на полосы.

Сердечник состоит из стержней, на которых помещаются обмотки, и ярм, которые замыкают стержни и не имеют обмоток. Сборка листов (полос) сердечника производится, как правило, "внахлестку". Таким путем удастся свести до весьма малого значения магнитные сопротивления стыков между стержнями и ярмами.

На рис. 2-2 показаны отдельные слои листов, из которых состоит сердечник однофазного трансформатора, а на рис. 2-3 — два слоя листов сердечника трехфазного трансформатора.

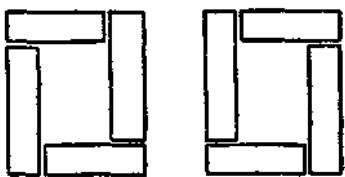


Рис. 2-2. Листы сердечника однофазного трансформатора при сборке их «внахлестку».



Рис. 2-3. Листы сердечника трехфазного трансформатора при сборке их «внахлестку».

Листы сердечника стягиваются при помощи накладок и шпилек, изолированных от листов (рис. 2-4). Листы верхнего ярма окончательно закладываются и затем стягиваются, после того как помещены обмотки на стержнях сердечника (рис. 2-5).

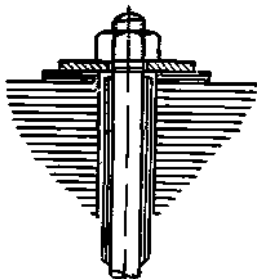


Рис. 2-4 Изоляция шпильки, стягивающей листы сердечника.

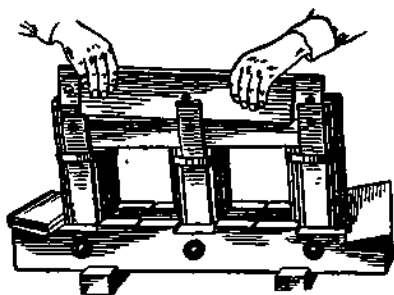


Рис. 2-5. Сборка сердечника трехфазного трансформатора.

Различные формы сечения стержня и ярма представлены на рис. 2-6 и 2-7. Сечение по рис. 2-6,а применяется лишь для небольших трансформаторов; сечения по рис 2-6,б и в применяются для трансформаторов средней и большой мощности. При большом числе ступеней сечения его периметр приближается к окружности, и, следовательно, при том же сечении стержня уменьшается средняя длина витка обмоток, а при этом и количество расходуемой обмоточной меди.



Рис. 2-6. Форма сечения стержней.

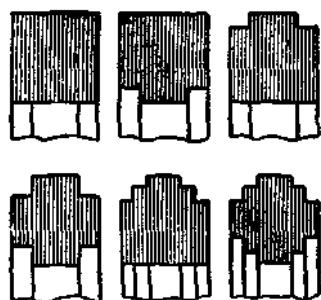


Рис. 2-7. Формы сечения ярма.

По выполнению сердечника принято различать два типа трансформаторов: стержневой и броневой. Стержневой тип трансформатора (рис. 2-5) получил преобладающее применение на практике. Однофазный броневой трансформатор показан на рис. 2-8. Из броневых трансформаторов в Советском Союзе получили некоторое распространение однофазные броневые трансформаторы малой мощности: радиотехнические, звонковые и др.



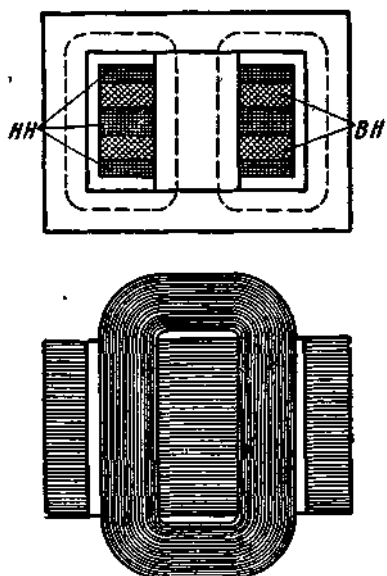


Рис. 2-8. Однофазный броневой трансформатор с дисковыми чередующимися обмотками.

Обмотки трансформаторов выполняются в виде цилиндрических катушек из проводников круглого или прямоугольного сечения, изолированных хлопчатобумажной пряжей или специальной (кабельной) бумагой.

В зависимости от номинального напряжения следует различать обмотку низшего напряжения и обмотку высшего напряжения. Обмотка низшего напряжения (НН) помещается ближе к стержню, а обмотка высшего напряжения (ВН) — снаружи; она охватывает обмотку низшего напряжения (рис. 2-9). При таком расположении обмоток уменьшается расход изоляционных материалов, так как обмотка высшего напряжения относительно стержня будет иметь собственную изоляцию и изоляцию обмотки низшего напряжения. Обмотки, показанные на рис. 2-9, называются концентрическими.

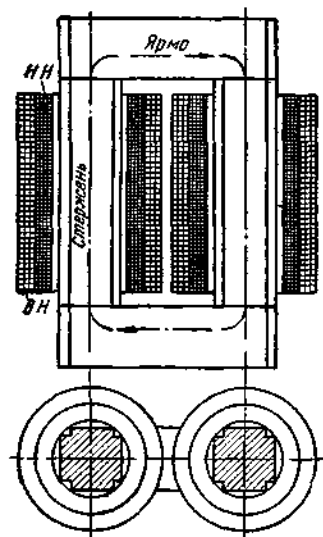


Рис. 2-9. Однофазный стержневой трансформатор с концентрическими обмотками.

Иногда каждую из обмоток разделяют на отдельные катушки и располагают их на стержне в чередующемся порядке, как показано на рис. 2-10. Такие обмотки называются дисковыми чередующимися. Они на практике встречаются редко и применяются главным образом для броневых трансформаторов (рис. 2-8).

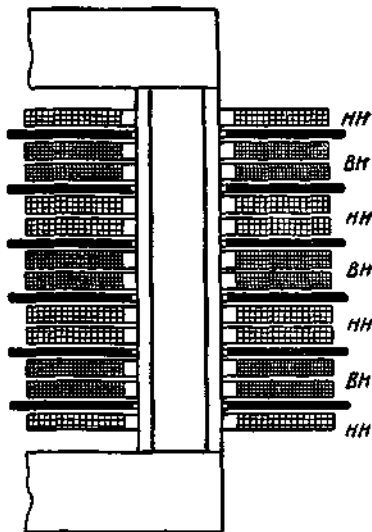


Рис.2.10. Дисковая чередующаяся обмотка.

Трансформаторы выполняются с воздушным и масляным охлаждением. Первые называются сухими, вторые — масляными. В масляных трансформаторах сердечник вместе с обмотками помещается в бак с маслом. Масляные трансформаторы более надежны в работе. Масло предохраняет изоляцию обмоток от вредного воздействия воздуха, улучшает условия охлаждения обмоток и сердечника, так как имеет большую теплопроводность, чем воздух; кроме того, вследствие большой диэлектрической прочности позволяет сократить изоляционные расстояния, т. е. расстояния от меди обмоток до стали сердечника.

#### 4. Режим холостого хода.

Под холостым ходом трансформатора понимается режим его работы при разомкнутой вторичной обмотке. В этих условиях трансформатор со стороны первичной обмотки во всем подобен катушке со стальным сердечником.

Обратимся к рис. 2-11, где схематически изображен однофазный трансформатор. Здесь первичная обмотка с числом витков  $w_1$  и вторичная обмотка с числом витков  $w_2$  расположены для наглядности на разных стержнях.

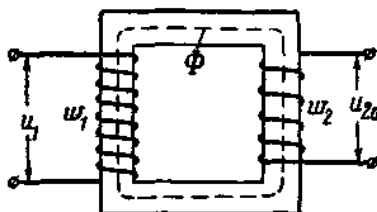


Рис. 2-11. Холостой ход трансформатора.

Пусть к первичной обмотке при разомкнутой вторичной подведено напряжение  $u_1$ . По первичной обмотке будет протекать ток  $i_0$ . В трансформаторе возникнет магнитное поле, которое будет создаваться намагничивающей силой (н.с.)  $i_0 w_1$  первичной обмотки. Магнитным полем вне сердечника можем вначале пренебречь, так как магнитная проницаемость стали во много раз больше магнитной проницаемости воздуха (или масла).

Полю в сердечнике соответствует магнитный поток  $\Phi$ , сцепляющийся со всеми витками обеих обмоток. Он будет наводить в первичной обмотке э.д.с.

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (2-1)$$

и вторичной обмотке э.д.с.

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (2-2).$$

Напряжение на зажимах первичной обмотки

$$u_1 = i_0 r_1 - e_1.$$

Активное падение напряжения  $i_0 r_1$  в первичной обмотке имеет практически ничтожное значение. Поэтому можно считать, что первичное напряжение  $u_1$  в любой момент времени уравнивается только э.д.с.  $e_1$ . Если напряжение  $u_1$  представляет собой синусоидальную функцию времени, то, следовательно, э.д.с.  $e_1$  и наводящий её поток  $\Phi$  — также синусоидальные функции времени. Подставив в (2-1) и (2-2)  $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ , где  $\Phi_m$  — амплитуда потока,  $\omega = 2\pi f$  — угловая частота тока,  $t$  — время, с, получим:

$$e_1 = -\omega w_1 \Phi_m \cos \omega t = 2\pi f w_1 \Phi_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}); \quad (2-3)$$

$$e_2 = -\omega w_2 \Phi_m \cos \omega t = 2\pi f w_2 \Phi_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}). \quad (2-4)$$

Полученные уравнения показывают, что  $e_1$  и  $e_2$  отстают по фазе от потока  $\Phi$  на угол  $\frac{\pi}{2}$ . Действующие значения обеих э.д.с. соответственно равны:

$$E_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w_1 \Phi_m = 4,44 f w_1 \Phi_m; \quad (2-5)$$

$$E_2 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w_2 \Phi_m = 4,44 f w_2 \Phi_m, \quad (2-6)$$

где  $\Phi_m$  — в В·с.

Из (2-5) и (2-6) следует:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (2-7)$$

Так как при холостом ходе  $U_{20} \approx E_2$  и  $U_1 \approx E_1$ , то можем написать:

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (2-8)$$

Отношение напряжений при холостом ходе трансформатора называется коэффициентом трансформации. Обычно берется отношение высшего напряжения к низшему. Если при холостом ходе трансформатора к его первичной обмотке подведено номинальное напряжение  $U_{1н}$ , указанное на щитке трансформатора, то на зажимах вторичной обмотки должно получиться вторичное номинальное напряжение  $U_{20} = U_{2н}$ .

Вследствие перемагничивания стали сердечника в нем возникают магнитные потери, т. е. потери от гистерезиса и вихревых токов. Можно считать, что мощность  $P_0$ , потребляемая трансформатором при холостом ходе и напряжении  $U_1 = U_{1н}$ , идет только на покрытие магнитных потерь  $P_c$ , так как при этом электрические потери  $I_0^2 r_1$  практически ничтожны. Следовательно, ток холостого хода  $I_0$  наряду с реактивной составляющей  $I_{0p}$  имеет активную составляющую  $I_{0a}$ , т. е.

$$I_0 = \sqrt{I_{0p}^2 + I_{0a}^2}. \quad (2-9)$$

Реактивная составляющая  $I_{0p}$ , которую называют также намагничивающим током, идет на создание магнитного поля в сердечнике трансформатора. Ее значение определяется из расчета магнитной цепи трансформатора (§2-14).

Активная составляющая тока холостого хода  $I_{0a}$  определяется по формуле

$$I_{0a} = \frac{P_c}{U_{1n}}. \quad (2.10)$$

Магнитные потери могут быть рассчитаны по обычным формулам (§ 2-14).

Приложенное к первичной обмотке напряжение  $u_1$ , как отмечалось, уравнивается в основном э.д.с.  $e_1$ . Поэтому при синусоидальном  $u_1$  мы можем написать векторное (комплексное) уравнение

$$\dot{U} \approx -\dot{E}_1. \quad (2-11)$$

Следовательно, векторная диаграмма трансформатора при его холостом ходе будет иметь вид, представленный на рис. 2-12.

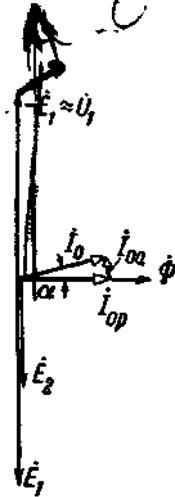


Рис. 2-12. Векторная диаграмма трансформатора при холостом ходе.

Она отличается от диаграммы для реактивной катушки со стальным сердечником только наличием вектора вторичной э.д.с. Так же как и для реактивной катушки со стальным сердечником, можно написать:

$$-\dot{E}_1 = \dot{I}_0 Z_{12} = \dot{I}_0 (r_{12} + jx_{12}); \quad (2-12)$$

здесь

$$|Z_{12}| = z_{12} = \frac{E_1}{I_0}; \quad r_{12} = \frac{P_c}{I_0^2};$$

$$x_{12} = \sqrt{z_{12}^2 - r_{12}^2}. \quad (2-13)$$

## 5. Режим работы трансформатора под нагрузкой.

### а) Первичный ток.

Работа трансформатора при нагрузке характеризуется наличием тока  $I_2$  во вторичной обмотке, увеличение которого (как будет ясно из последующего) вызывает увеличение тока  $I_1$  в первичной обмотке.

При нагрузке трансформатора магнитный поток  $\Phi$  в его сердечнике, называемый главным потоком, создается согласно закону полного тока совместным действием н.с. обеих обмоток:

$$i_1 w_1 + i_2 w_2 = i_0 w_1, \quad (2-14)$$

где  $i_1, i_2, i_0$  — мгновенные значения токов, причем в общем случае  $i_0$  отличается от мгновенного значения тока холостого хода.

Так как мы принимаем токи синусоидальными, то можем написать (рис. 2-1):

$$I_1 w_1 + I_2 w_2 = I_0 w_1. \quad (2-15)$$

Результирующая н.с.  $I_0 w_1$  должна иметь такое значение, чтобы создаваемый ею поток наводил в первичной обмотке э.д.с.  $E_1$ , почти полностью уравнивающую приложенное напряжение  $U_1$ . Поток в сердечнике трансформатора и результирующая н.с.  $I_0 w_1$  при нагрузке, не превышающей значительно номинальную, мало отличаются от тех же потока и н.с. первичной обмотки при холостом ходе, если в обоих случаях напряжение  $U_1$  сохраняет свое значение.

Разделив обе части равенства (2-15) на  $w_1$ , получим:

$$I_1 + I \frac{w_2}{w_1} = I_0, \quad (2-16)$$

или

$$I_1 + I'_2 = I_0, \quad (2-17)$$

где

$$I'_2 = I_2 \frac{w_2}{w_1} \quad (2-18)$$

— вторичный ток, приведенный к числу витков первичной обмотки.

Очевидно, что вторичная обмотка с током  $I'_2$  должна иметь число витков  $w_1$ , чтобы ее н.с.  $I'_2 w_1$  была равна н.с.  $I_2 w_2$  действительной вторичной обмотки. При этом вместо уравнения н.с. (2-15) можно пользоваться уравнением токов (2-17).

Из (2-17) получаем значение первичного тока  $I_1$

$$I_1 = I_0 - I'_2. \quad (2-19)$$

Мы видим, что первичный ток  $I_1$  имеет две составляющие: одна из них ( $I_0$ ) идет на создание потока в сердечнике трансформатора, другая ( $-I'_2$ ) компенсирует размагничивающее действие вторичного тока. Следовательно, при увеличении вторичного тока будет увеличиваться и первичный ток, чтобы поток оставался почти равным потоку при холостом ходе.

Так как ток  $I_0$  имеет относительно небольшое значение, то при токах, близких к номинальным, можно принять

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{w_2}{w_1}.$$

*б) Уравнения напряжений.*

Будем вначале считать, что потокосцепления обмоток трансформатора пропорциональны их токам и что магнитные потери в сердечнике отсутствуют (такие условия получаются в воздушном трансформаторе). При этом, так же как для двух магнитно связанных контуров, можем написать следующие уравнения напряжений первичной и вторичной обмоток трансформатора:

$$u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} + i_1 r_1; \quad (2-20)$$

$$u_2 = -L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} - i_2 r_2, \quad (2-21)$$

где  $u_1$  и  $u_2$  — мгновенные значения первичного и вторичного напряжений;  $L_1$ ,  $L_2$  и  $M$  — полные индуктивности и взаимная индуктивность обмоток;  $r_1$  и  $r_2$  — их активные сопротивления.

Первичное напряжение  $u_1$  имеет составляющие, уравнивающие э.д.с. самоиндукции  $(-L_1 \frac{di_1}{dt})$  и взаимной индукции  $(-M \frac{di_2}{dt})$ , и составляющую, равную активному падению напряжения  $i_1 r_1$ . Вторичное напряжение  $u_2$  получается после

вычитания из результирующей э.д.с. самоиндукции и взаимной индукции  $(-L_2 \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt})$  активного падения напряжения  $i_2 r_2$ .

Полагая, так же как и в предыдущем, что в сердечнике трансформатора имеет место главный поток  $\Phi$ , который создается результирующей н.с.  $i_0 w_1$  мы можем для токов  $i_1$ , и  $i_2$  согласно (2-14) написать следующие равенства:

$$i_1 = i_0 - i_2 \frac{w_2}{w_1}; \quad (2-22)$$

$$i_2 = i_0 \frac{w_1}{w_2} - i_1 \frac{w_1}{w_2} \quad (2-23)$$

Подставив (2-23) в (2-20) и (2-22) в (2-21), получим:

$$u_1 = \left( L_1 - M \frac{w_1}{w_2} \right) \frac{di_1}{dt} + M \frac{w_1}{w_2} \frac{di_0}{dt} + i_1 r_1; \quad (2-24)$$

$$u_2 = - \left( L_2 - M \frac{w_2}{w_1} \right) \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_0}{dt} + i_2 r_2 \quad (2-25)$$

или

$$u_1 = M \frac{w_1}{w_2} \frac{di_0}{dt} + L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} + i_1 r_1; \quad (2-24a)$$

$$u_2 = -M \frac{di_0}{dt} + L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt} + i_2 r_2, \quad (2-25a)$$

где  $L_1 - M \frac{w_1}{w_2} = L_{\sigma 1}$  и  $L_2 - M \frac{w_2}{w_1} = L_{\sigma 2}$  — индуктивности рассеяния первичной и вторичной обмоток; им соответствуют э.д.с. рассеяния:

$$e_{\sigma 1} = -L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt}; \quad (2-26)$$

$$e_{\sigma 2} = -L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt}. \quad (2-27)$$

Электродвижущие силы

$$e_1 = -M \frac{w_1}{w_2} \frac{di_0}{dt} = w_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad (2-28)$$

$$e_2 = -M \frac{di_0}{dt} = w_2 \frac{d\Phi}{dt}; \quad (2-29)$$

рассматриваются как э.д.с., наведенные главным потоком  $\Phi$ .

Приведем здесь уравнения, относящиеся к общей теории двух магнитно связанных обмоток. Для потокоцепления этих обмоток можем написать:

$$\Psi_1 = L_1 i_1 + M i_2; \quad (2-30)$$

$$\Psi_2 = L_2 i_2 + M i_1. \quad (2-31)$$

Вычтем и прибавим с правой стороны написанных равенств одни и те же величины:

$$\Psi_1 = L_1 i_1 + M i_2 - \lambda_1 M i_1 + \lambda_1 M i_1 = (L_1 - \lambda_1 M) i_1 + M(\lambda_1 i_1 + i_2);$$

$$\Psi_2 = L_2 i_2 + M i_1 - \lambda_2 M i_2 + \lambda_2 M i_2 = (L_2 - \lambda_2 M) i_2 + M(\lambda_2 i_2 + i_1).$$

Здесь коэффициенты  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  имеют произвольные значения.

Будем называть величины

$$M(\lambda_1 i_1 + i_2) = \Psi_{r1} \text{ и } M(i_1 + \lambda_2 i_2) = \Psi_{r2}$$

главными потокосцеплениями обмоток, а величины

$$(L_1 - \lambda_1 M) i_1 = L_{\sigma 1} i_1 \text{ и } (L_2 - \lambda_2 M) i_2 = L_{\sigma 2} i_2$$

их потокосцеплениями рассеяния.

Главными индуктивностями обмоток назовем величины

$$L_{r1} = L_1 - L_{\sigma 1} = L_1 - (L_1 - \lambda_1 M) = \lambda_1 M;$$

$$L_{r2} = L_2 - L_{\sigma 2} = L_2 - (L_2 - \lambda_2 M) = \lambda_2 M.$$

Общий коэффициент рассеяния равен:

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_1 L_2}. \quad (2-32)$$

Коэффициенты рассеяния обмоток равны отношениям индуктивностей рассеяния к главным индуктивностям:

$$\sigma_1 = \frac{L_1 - \lambda_1 M}{\lambda_1 M} \text{ и } \sigma_2 = \frac{L_2 - \lambda_2 M}{\lambda_2 M}. \quad (2-33)$$

Между произвольными значениями коэффициентов  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  можно установить простое соотношение. Для этого примем (с физической стороны это легко себе представить), что общий коэффициент рассеяния стремится к нулю ( $\sigma \rightarrow 0$ ), если при этом индуктивности рассеяния стремятся к нулю. Вводя  $L_1 = \lambda_1 M + L_{\sigma 1}$  и  $L_2 = \lambda_2 M + L_{\sigma 2}$  в (2-32) и принимая  $L_{\sigma 1}$  и  $L_{\sigma 2}$  равными нулю, получим для  $\sigma \rightarrow 0$ :

$$\lambda_1 \lambda_2 = 1. \quad (2-34)$$

Отсюда имеем:  $L_{r1} L_{r2} = M^2$ .

Мы видим, следовательно, что, хотя общий коэффициент рассеяния  $\sigma$  определяется однозначно, отдельные коэффициенты рассеяния  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  являются произвольными, так же как  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ .

Подразделяя произведение  $\lambda_1 \lambda_2$  любым образом на  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  можно потокосцепления рассеяния приписать одной или другой обмотке или обеим обмоткам. Мы не имеем также достаточно данных, чтобы однозначно определить главный поток, о котором говорилось ранее. Однако внести определенность в понятия индуктивностей рассеяния мы можем только в том случае, если допустим, что в трансформаторе существует главный поток  $\Phi$ , созданный н.с. обеих обмоток и сцепляющийся со всеми их витками. Такое допущение, очевидно, в большой степени оправдывается в применении к нормальным трансформаторам со стальным сердечником.

Мы можем теперь написать:

$$\Psi_{r1} = M(\lambda_1 i_1 + i_2) = \Phi w_1;$$

$$\Psi_{r2} = M(i_1 + \lambda_2 i_2) = \Phi w_2.$$

Отсюда получаем:

$$i_1(\lambda_1 w_2 - w_1) + i_2(w_2 - \lambda_2 w_1) = 0.$$

Так как полученное равенство должно быть справедливо при любых значениях  $t_1$  и  $t_2$ , то выражения в скобках по отдельности должны быть равны нулю; следовательно,  
 $\lambda_1 = \frac{w_1}{w_2}$  и  $\lambda_2 = \frac{w_2}{w_1}$ , что мы и получили ранее в дифференциальных уравнениях, допустив, что в трансформаторе существует главный поток  $\Phi$ , созданный результирующей н.с.  $i_0 w_1$ .

Теория электрических машин также основана, как мы покажем в дальнейшем, на допущении существования главного потока, не зависящего от полей рассеяния.

Считая, что токи и э.д.с. уравнений (2-26)—(2-29) изменяются во времени по закону синуса, мы можем эти уравнения переписать в комплексной форме:

$$\begin{aligned}\dot{E}_{\sigma 1} &= -j\omega L_{\sigma 1} \dot{I}_1 = -jx_1 \dot{I}_1; \\ \dot{E}_{\sigma 2} &= -j\omega L_{\sigma 2} \dot{I}_2 = -jx_2 \dot{I}_2; \\ \dot{E}_1 &= -j\omega M \frac{w_1}{w_2} \dot{I}_0 = -jx_{12} \dot{I}_0; \\ \dot{E}_2 &= -j\omega M \dot{I}_0 = -jx_{12} \frac{w_2}{w_1} \dot{I}_0.\end{aligned}\quad (2-35)$$

В равенствах (2-35)  $x_1 = \omega L_{\sigma 1}$  и  $x_2 = \omega L_{\sigma 2}$  — индуктивные сопротивления рассеяния обмоток, а  $x_{12} = \omega M \frac{w_1}{w_2}$  — индуктивное сопротивление взаимоиндукции обмоток.

Ранее при рассмотрении режима холостого хода мы пренебрегали полем вне сердечника трансформатора. В действительности это поле согласно закону полного тока должно существовать. Оно называется полем рассеяния. Созданные им потокосцепления обмоток малы по сравнению с потокосцеплениями обмоток, созданными главным потоком. С большим приближением к действительным условиям можно считать, что поле рассеяния и поле в сердечнике, соответствующее главному потоку, существуют независимо одно от другого.

На рис. 2-13 представлена приближенная картина поля рассеяния, которую кладут в основу расчета потокосцеплений рассеяния. Здесь пунктирной линией показан путь главного потока  $\Phi$ , сплошными линиями показаны индукционные линии поля рассеяния. Они могут быть условно разделены на две группы: сцепляющиеся с первичной обмоткой и сцепляющиеся со вторичной обмоткой. Магнитные сопротивления для потоков соответствующих индукционных трубок рассеяния определяются в основном сопротивлениями тех их частей, которые проходят вдоль обмоток и в промежутке между ними. Их можно принять постоянными, поскольку потоки трубок проходят по материалам (медь, изоляция, воздух или масло), для которых  $\mu = \text{const}$ . Магнитными сопротивлениями потоков трубок вне обмоток и промежутка между ними можно пренебречь, так как здесь они проходят в основном по стали сердечника.



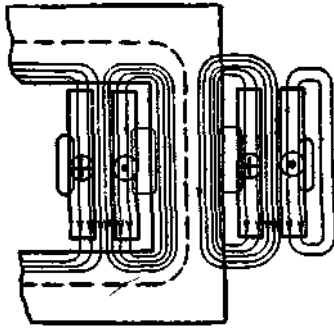


Рис. 2-13. Приближенная картина поля рассеяния трансформатора с концентрическими обмотками, где крестиками и точками условно показаны направления токов в обмотках для рассматриваемого момента времени.

Таким образом, потокосцепления рассеяния и созданные ими э.д.с. рассеяния можно принять пропорциональными н.с. или токам соответствующих обмоток и считать индуктивности  $L_{\sigma 1}$  и  $L_{\sigma 2}$ , а следовательно  $x_1$  и  $x_2$ , постоянными величинами. Индуктивное сопротивление взаимоиндукции  $x_{12}$  зависит от  $\Phi$ , однако в пределах небольшого изменения  $\Phi_m$  и, следовательно,  $E_1$  можно принять  $x_{12}$  также постоянным.

С учетом приведенных равенств (2-35) уравнения напряжений (2-24a) и (2-25a) для установившегося режима могут быть написаны в комплексной форме:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(r_1 + jx_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1; \quad (2-36)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2(r_2 + jx_2) = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2. \quad (2-37)$$

Уравнения (2-36) и (2-37) называются векторными уравнениями напряжений трансформатора (здесь имеются в виду временные векторы напряжений, э.д.с. и токов).

В реальном трансформаторе со стальным сердечником при его работе возникают магнитные потери. Для их учета мы должны считать, так же как при холостом ходе, что ток  $I_0$  имеет наряду с реактивной составляющей  $I_{0p}$  активную составляющую  $I_{0a}$  [см. уравнения (2-9) — (2-13)]; однако обе эти составляющие мы должны отнести не к  $\dot{U}_1$  а к  $\dot{E}_1$ , так как они зависят от  $\Phi_m$ .

Вследствие нелинейной связи между потоком  $\Phi$  и результирующим током  $i_0$  кривая последнего при синусоидальном потоке  $\Phi$  будет несинусоидальной (§ 2-13). Для облегчения анализа зависимостей, характеризующих работу трансформатора, ток  $i_0$  принимается синусоидальным с действующим значением, равным тому же значению действительного тока. Такое допущение не может привести к заметной ошибке из-за относительной малости тока  $I_0$ .

## 6. Схемы замещения трансформатора.

### 2-5. Схема замещения

Расчеты, связанные с исследованием работы трансформатора, можно свести к расчетам простых цепей переменного тока. Для этого заменим трансформатор некоторой схемой, сопротивление которой  $Z_{\text{эkv}}$  определим; из уравнений напряжений (2-36) и (2-38) и уравнения токов (2-17). Перепишем эти уравнения в следующем виде:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_0 Z_{12} + \dot{I}_1 Z_1; \quad (2-40)$$

$$\dot{U}_2' = -\dot{I}_0 Z_{12} - \dot{I}_2' Z_2' = \dot{I}_2' Z'; \quad (2-41)$$

$$\dot{I}_2' = \dot{I}_0 - \dot{I}_1, \quad (2-42)$$

где  $\dot{I}_0 Z_{12} = -\dot{E}_1 = -\dot{E}_2$  [см. уравнение (2-12)];  $Z_1 = r_1 + jx_1$ ;

$Z'_2 = r'_2 + jx'_2$ ;  $Z' = Z \left( \frac{w_1}{w_2} \right)^2$  — приведенное к числу витков первичной обмотки сопротивление внешней вторичной цепи, падение напряжения  $\dot{I}'_2 Z'$  в котором, очевидно, и есть  $\dot{U}'_2$ .

Подставив в (2-41) значение тока  $\dot{I}'_2$  из (2-42), найдем:

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 \frac{Z'_2 + Z'}{Z_{12} + Z'_2 + Z'}.$$

Подставив в (2-40) найденное значение  $\dot{I}_0$ , получим:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 \left[ Z_1 + \frac{Z_{12}(Z'_2 + Z')}{Z_{12} + Z'_2 + Z'} \right] = \dot{I}_1 \left( Z_1 + \frac{1}{\frac{1}{Z_{12}} + \frac{1}{Z'_2 + Z'}} \right) = \dot{I}_1 Z_{\text{экв}}. \quad (2-43)$$

Сопротивлению  $Z_{\text{экв}}$  соответствует схема, представленная на рис. 2-17. Она называется схемой замещения трансформатора. Здесь ветвь с сопротивлением  $Z_{12}$  может быть названа ветвью намагничивания. Очевидно, что уравнения напряжений и токов, составленные согласно законам Кирхгофа для этой схемы, будут такими же, как и уравнения (2-40) — (2-42).

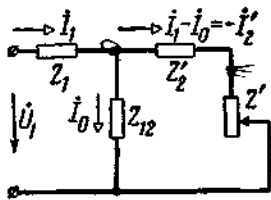


Рис. 2-17. Схема замещения трансформатора.

В схеме замещения переменным параметром является сопротивление  $Z'$ ; остальные ее параметры можно считать постоянными. Они могут быть определены путем расчета, а также опытным путем. В последнем случае обращаются к данным опытов холостого хода и короткого замыкания.

#### 2-6. Опыт холостого хода

По данным опыта холостого хода определяются коэффициент трансформации  $\frac{U_{20}}{U_1} \approx \frac{w_2}{w_1}$ , магнитные потери  $P_c$  и параметры ветви намагничивания  $Z_{12}, r_{12}, x_{12}$ . Магнитные потери  $P_c$ , как указывалось, могут быть приняты равными мощности  $P_0$ , потребляемой трансформатором при холостом ходе.

При опыте холостого хода собирается схема по рис. 2-18 для однофазного трансформатора или по рис. 2-19 для трехфазного трансформатора. При номинальном напряжении  $U_{\text{н}}$  (линейном в случае трехфазного трансформатора) измеряют  $I_0$ ,  $P_0$ , и  $U_{20}$ . Опыт холостого хода должен производиться при синусоидальном напряжении. Если напряжение заметно отличается от синусоидального, то в данные измерений необходимо внести некоторые поправки (согласно ГОСТ). При исследовании малых трансформаторов следует учитывать потери в приборах, так как они могут быть соизмеримы с потерями холостого хода.

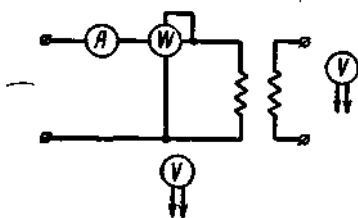


Рис. 2-18 Схема при опыте холостого хода для однофазного трансформатора.

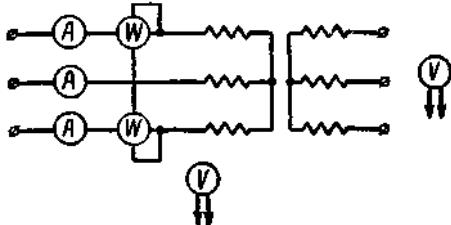


Рис. 2-19. Схема при опыте холостого хода для трехфазного трансформатора.

Измерения  $U_1$  и  $U_{20}$  производятся при помощи вольтметров или при высоком напряжении, при помощи вольтметров и измерительных трансформаторов напряжения.

По данным измерений находят коэффициент трансформации:  $U_{20}/U_1 \approx w_1/w_2$ . По амперметру и ваттметру находят ток  $I_0$  и мощность  $P_0$  в случае однофазного трансформатора. В случае трехфазного трансформатора необходимо измерить токи во всех трех фазах, так как вследствие несимметрии магнитных цепей отдельных фаз токи в них будут различны. За ток холостого хода здесь принимается среднее арифметическое токов отдельных фаз, т. е.

$$I_0 = \frac{I_{0A} + I_{0B} + I_{0C}}{3}. \quad (2-44)$$

Мощности отдельных фаз также различны; поэтому мощность, потребляемую трехфазным трансформатором при холостом ходе, следует измерять двумя ваттметрами по схеме рис. 2-19.

Для нормальных силовых трансформаторов ток холостого хода составляет (0,10—0,04)  $I_N$  при номинальных мощностях от 5 до нескольких тысяч киловольт-Ампер.

Холостому ходу будет соответствовать схема замещения рис. 2-17 при  $Z' = \infty$ . Следовательно, по данным опыта холостого хода получаем:

$$z_0 = [Z_1 + Z_{12}] = \sqrt{(r_1 + r_{12})^2 + (x_1 + x_{12})^2} = \frac{U_1}{I_0}.$$

Так как для нормальных трансформаторов  $r_{12}$  больше  $r_1$  и  $x_{12}$  больше  $x_1$  в сотни раз, то можно принять:

$$z_{12} \approx z_0; \quad r_{12} \approx r_0 = r_1 + r_{12} = \frac{P_0}{I_0^2};$$

$$x_{12} \approx x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}.$$

#### 1.4 Лекция №4 (2 часа).

**Тема: «Устройство и особенности конструктивного выполнения 3-х фазных трансформаторов. Режимы работы трёхфазных трансформаторов».**

##### 1.4.1 Вопросы лекции:

1. Трёхфазные трансформаторы.
2. Преобразование трёхфазного тока.

3. Схемы и группы соединений трёхфазных трансформаторов.
4. Регулирование вторичного напряжения трансформаторов.
5. Параллельная работа трансформаторов.

#### 1.4.2 Краткое содержание вопросов

##### 1. Трёхфазные трансформаторы.

Для трансформирования трехфазного тока применяются или трехфазные трансформаторы, или «трехфазные группы», состоящие из трех однофазных трансформаторов.

Наибольшее распространение на практике получили трехфазные строжневые трансформаторы с расположением стержней в одной плоскости.

Сердечник одного из таких трансформаторов показан на рис. 2-28.

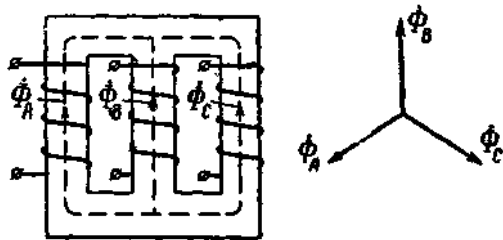


Рис. 2-28. Сердечник трехфазного стержневого трансформатора.

Здесь же указаны потоки (в соответствии с векторным уравнением потоков ( $\Phi_A + \Phi_B + \Phi_C = 0$ )), причем за положительное их направление условно принято направление снизу вверх. Очевидно, амплитуда потока в яме равна амплитуде потока в стержне.

Трехфазная группа, состоящая из трех однофазных трансформаторов, представлена на рис. 2-29.

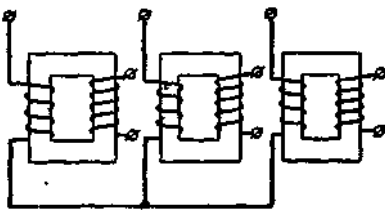


Рис. 2 29. Трехфазная группа.

Одна из ее обмоток соединена в звезду, другая, как правило, соединяется в треугольник (§ 2-13).

На рис. 2-30,а представлен трехфазный броневой трансформатор.

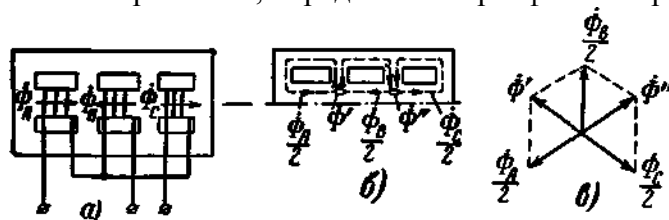


Рис. 2-30. Трехфазный броневой трансформатор и распределение потоков в его сердечнике.

Обычно его стержни располагаются горизонтально с помещенными на них дисковыми чередующимися обмотками (рис. 2-8). Здесь различают продольные яма, расположенные параллельно стержням, и поперечные яма, расположенные перпендикулярно стержням. Продольные и поперечные яма выполняются обычно с сечением, равным примерно половине сечения стержня. В трехфазном броневом трансформаторе средняя фаза первичной и вторичной обмоток должна быть соединена в обратном порядке по сравнению с крайними фазами. На рис. 2-30,а показано соединение

обмотки высшего напряжения в звезду. Здесь правый зажим средней фазы принят за начало фазы, а левый — за ее конец в противоположность тому, что принято для крайних фаз. Только в этом случае поток в промежуточных поперечных ярах равен полусумме потоков соседних стержней (рис. 2-30, б и в).

Неправильным будет соединение, при котором за начало и конец средней фазы приняты такие же зажимы, что и для крайних фаз, так как в этом случае в промежуточных поперечных ярах поток будет равен полуразности потоков в соседних стержнях, т. е. в  $\sqrt{3}$  раз больше, чем в предыдущем случае.

## 2. Преобразование трёхфазного тока.

Преобразование трехфазного тока можно осуществлять с помощью группы из трех однофазных трансформаторов или посредством одного трехстержневого трехфазного трансформатора. Обычно используют трехстержневые трансформаторы. Только при очень больших мощностях (более  $10 \text{ МВ} \cdot \text{А}$  в фазе) в ряде случаев применяют группы из трех однофазных трансформаторов, которые имеют существенные преимущества при транспортировке и монтаже (мощные высоковольтные трехфазные трансформаторы нетранспортабельны).

Трехфазная группа. На рис. 2.40 показано включение трех однофазных трансформаторов в трехфазную сеть. Первичные обмотки трансформаторов включены звездой и, следовательно, обмотка каждого трансформатора включена на фазное напряжение.

Если имеется нулевой провод, то работа трансформатора в трехфазной группе ничем не отличается от рассмотренной выше работы однофазного трансформатора. Поэтому в данном случае можно пользоваться векторной диаграммой и всеми уравнениями однофазного трансформатора.

При симметричной нагрузке необходимость в нулевом проводе отпадает; в этом случае также можно рассматривать работу только одной фазы, т. е. однофазный трансформатор;

Трехстержневой трехфазный трансформатор. Для объяснения принципа действия трехстержневого трехфазного трансформатора представим его в виде трех однофазных трансформаторов (рис. 2.41, а), у которых катушки размещены на стержнях 1, 2 и 3, а ярма 4, 5 и 6 конструктивно объединены в одно общее ярмо. Через это ярмо проходит суммарный поток  $\Phi_{\text{рез}} = \Phi_A + \Phi_B + \Phi_C$ .

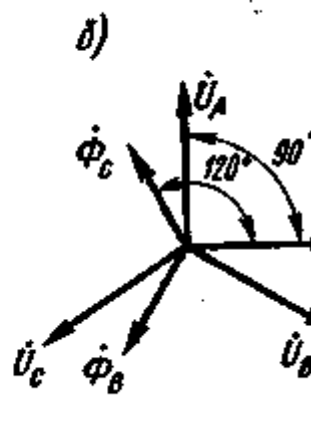
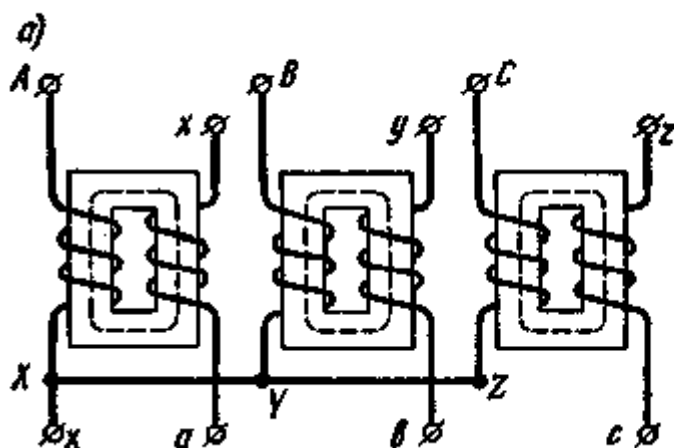


Рис. 2.40. Принципиальная схема трансформаторной группы из трех однофазных трансформаторов (а) и векторная диаграмма (б) потоков и напряжений в отдельных фазах

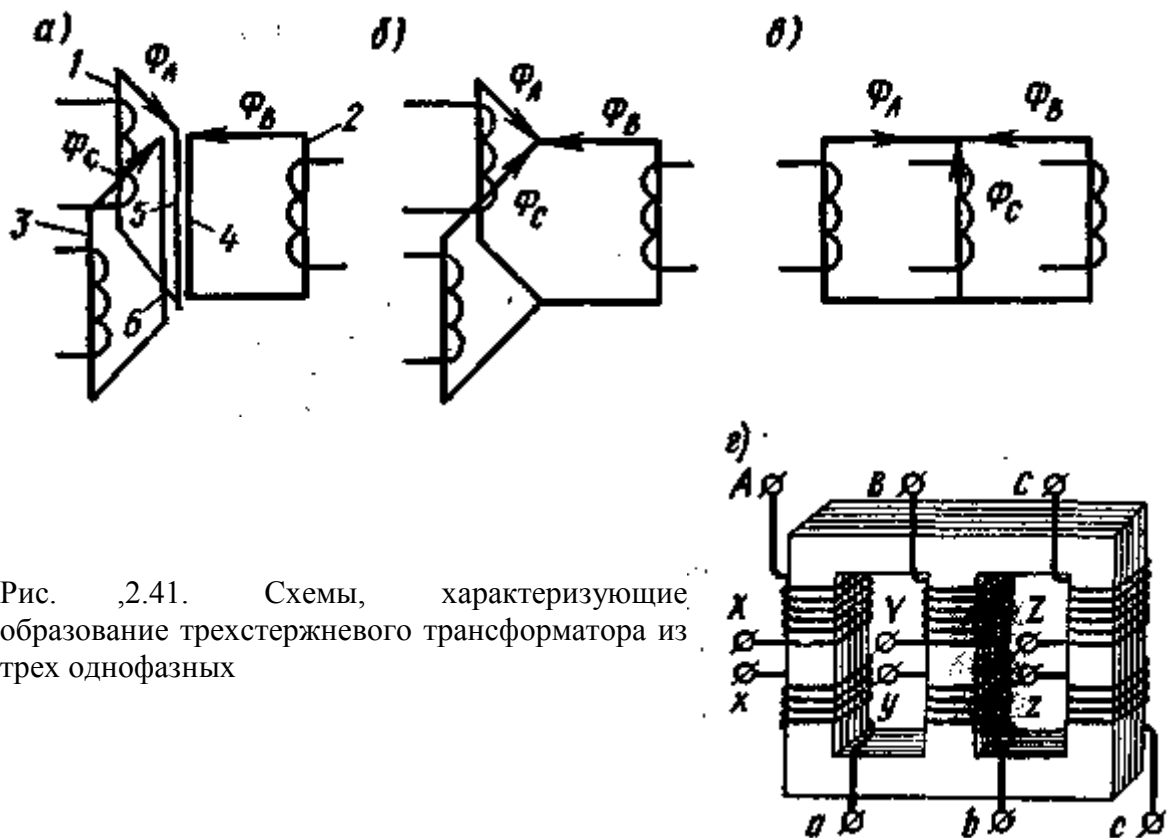


Рис. 2.41. Схемы, характеризующие образование трехстержневого трансформатора из трех однофазных

Однако если на первичные обмотки этих трансформаторов подать систему симметричных трехфазных напряжений (рис. 2.41, б), то сумма  $\Phi_A$ ,  $\Phi_B$  и  $\Phi_C$  в любой момент времени будет равна нулю. Следовательно, трехфазный трансформатор можно выполнить без объединенного ярма для замыкания потоков отдельных фаз. Полученный таким образом симметричный трехстержневой трансформатор (рис. 2.41, в) можно сделать более компактным, несколько уменьшив длину магнитной цепи, по которой замыкается поток  $\Phi_C$ , исключив из нее два ярма (рис. 2.41, г). Возникшая при этом небольшая магнитная несимметрия контуров, по которым проходят потоки отдельных фаз, вызывает несимметрию токов холостого хода этих фаз. Однако, как показано выше, при нагрузке ток холостого хода оказывает весьма малое влияние на токи в первичной и вторичной обмотках. В результате получаем трехстержневой трансформатор (рис. 2.41, г), в котором первичная и вторичная обмотки каждой фазы расположены на общем стержне. При симметричном питающем напряжении и равномерной нагрузке (являющейся наиболее распространенной) все фазы трехфазного трансформатора находятся практически в одинаковых условиях. Поэтому выведенные выше формулы и схемы замещения для однофазного трансформатора справедливы и для трехфазного трансформатора. Однако в режиме холостого хода, на который большое влияние оказывает схема соединения обмоток, имеются особенности.

Схемы соединения обмоток. Первичная и вторичная обмотки трехфазных трансформаторов могут быть соединены по схемам «звезда», «звезда с выведенной нулевой точкой», «треугольники» или «зигзаг с выведенной нулевой точкой». Обычно обмотку высшего напряжения соединяют по схеме «звезда», что позволяет при заданном линейном напряжении иметь меньшее число витков в фазе. Согласно ГОСТу схему соединения «звезда» обозначают знаком  $Y$ , русской буквой  $У$  или латинской  $Y$ ; схему «треугольник» — знаком  $\Delta$ , русской буквой  $Д$  или греческой  $\Delta$ ; схему «зигзаг» — латинской буквой  $Z$ . Если нулевая точка обмотки выведена из трансформатора, то у

буквенного обозначения ставят индекс н. Начала и концы обмотки ВН обозначают  $A, B, C$  и  $X, Y, Z$ ; для обмотки НН —  $a, b, c$  и  $x, y, z$ ; вывод нулевой точки —  $O$  (для ВН) и  $o$  (для НН). Схемы соединения обмоток силовых трансформаторов, применяемых в Советском Союзе, приведены в табл. 2.3.

Трехфазные трансформаторы характеризуются двумя коэффициентами трансформации:

а) фазным — равным отношению числа витков  $w_{ВН}$

фазы обмотки  $ВН$  к числу витков  $w_{НН}$  фазы обмотки  $НН$  или же отношению фазных напряжений этих обмоток в режиме холостого хода:

$$k_{\phi} = w_{ВН}/w_{НН} = U_{оф.вн}/U_{оф.нн} \quad (2.59)$$

б) линейным — равным отношению линейного напряжения обмотки ВН к линейному напряжению обмотки НН в режиме холостого хода:

Таблица 2.3

Схема соединения обмоток		Диаграмма векторов ЭДС		Условное обозначение
ВН	НН	ВН	НН	
				$Y/Y_0$
				$Y/D_{11}$
				$Y_n/D_{11}$
				$Y/Z_{11}$
				$D/Y_{11}$

$$k_l = U_{ол.вн}/U_{ол.нн} \quad (2.60a)$$

Для схем  $Y/Y$  и  $D/D$  коэффициенты трансформации равны:  $k_l = k_{\phi}$ ; для схемы  $Y/D$  линейный коэффициент  $k_l = \sqrt{3}k_{\phi}$ , а для схемы  $D/Y$  —  $k_l = k_{\phi}/\sqrt{3}$ .

При соединении обмотки трансформатора по схеме  $Z_n$  (рис. 2.42, а) каждая фаза состоит из двух одинаковых катушек, которые размещены на разных стержнях и соединены между собой встречно так, чтобы векторы индуцируемых в них ЭДС вычитались (рис. 2.42, б).

Схема ЗН неэкономична, так как при одном и том же фазном напряжении  $U_{\phi}$  она требует большего расхода обмоточного провода, чем при схемах У и Д. Это объясняется тем, что в рассматриваемой схеме фазное напряжение  $U_{\phi}$  в  $\sqrt{3}$  раз больше напряжения  $U_K$  на каждой катушке, а при размещении двух катушек на одном стержне и их последовательном соединении  $U_{\phi} = 2U_K$ . Поэтому обычно схему ЗН не применяют; ее используют только в трансформаторах для вентильных преобразователей (см. § 2.23).

Особенности режима холостого хода. В § 2.6 показано, что в однофазном трансформаторе из-за насыщения магнитной цепи ток холостого хода при синусоидальном магнитном потоке оказывается несинусоидальным, т. е. возникает ряд высших гармонических:

$$i_0 \approx I_{01m} \sin \omega t + I_{03m} \sin 3\omega t + \dots$$

В трехфазном трансформаторе выражения для тока холостого хода в фазах имеют вид

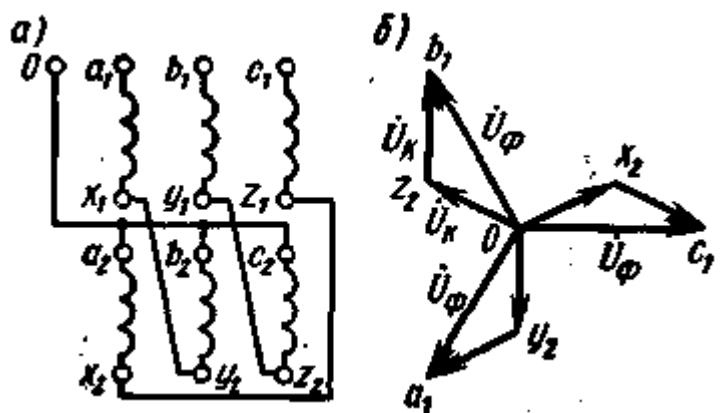
$$i_{0A} = I_{01m} \sin \omega t + I_{03m} \sin 3\omega t + \dots;$$

$$i_{0B} = I_{01m} \sin (\omega t - 2\pi/3) + I_{03m} \sin 3(\omega t - 2\pi/3) + \dots;$$

$$i_{0C} = I_{01m} \sin (\omega t - 4\pi/3) + I_{03m} \sin 3(\omega t - 4\pi/3) + \dots$$

Заметим, что третьи гармонические токов во всех фазах совпадают по времени:  $i_{03A} = i_{03B} = i_{03C} = I_{03m} \sin 3\omega t$ . При некоторых схемах включения обмоток это оказывает влияние на форму кривой магнитного потока трансформатора, а следовательно, и на форму кривой ЭДС.

Рис. 2.42. Схема «зигзаг» и ее векторная диаграмма





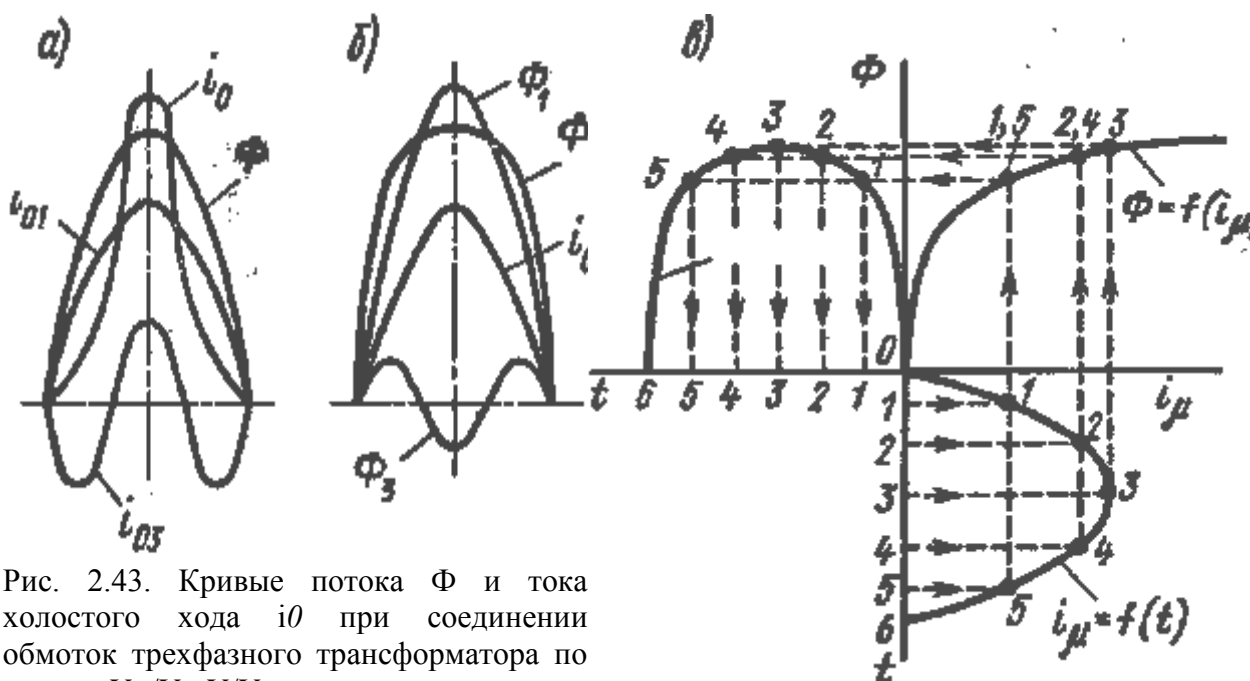


Рис. 2.43. Кривые потока  $\Phi$  и тока холостого хода  $i_0$  при соединении обмоток трехфазного трансформатора по схемам  $Y_n/Y$  и  $Y/Y$

При соединении обмоток трансформатора по схеме  $Y_{nv}/Y$  третьи гармонические фазных токов замыкаются по нулевому проводу. При этом ток холостого хода  $i_0$  в каждой фазе содержит третью гармоническую  $i_{03}$ , а поток  $\Phi$  является синусоидальным, как в однофазном трансформаторе (рис. 2.43, а).

При соединении обмоток по схеме  $Y/Y$  путь для замыкания третьих гармонических фазных токов отсутствует и ток холостого хода оказывается синусоидальным. В результате этого кривая магнитного потока  $\Phi$  искажается (рис. 2.43, б) и приобретает плоскую форму; при этом поток содержит третью гармоническую  $\Phi_3$ . Несинусоидальными являются и ЭДС, индуцированные в фазах, — они имеют заостренную форму. Построение кривой изменения магнитного потока  $\Phi$  при синусоидальном изменении тока  $i_\mu$  выполняется так же (рис. 2.43, в), как и построение кривой  $i_\mu = f(t)$  (см. рис. 2.28, б), но в обратном порядке. Следует, однако, отметить, что в трехстержневом трансформаторе возникающие третьи гармонические потоки фаз  $\Phi_{A3}$ ,  $\Phi_{B3}$ ,  $\Phi_{C3}$  не могут замыкаться по стальному магнитопроводу, так как они аналогично третьим гармоническим токам совпадают по времени и, следовательно, в любой момент времени направлены по контуру магнитопровода встречно (рис. 2.44, а). Поэтому эти гармонические выходят из стержней и замыкаются от ярма к ярму через воздух, т. е. по пути, имеющему большое магнитное сопротивление. Вследствие этого третьи гармонические потоки малы и потоки фаз  $\Phi_A$ ,  $\Phi_B$  и  $\Phi_C$  в трехстержневом трансформаторе мало отличаются от синусоидальных.

Обычно амплитуды потоков фаз отличаются на 5—10% от амплитуд их первых гармонических, что вызывает соответствующее небольшое искажение формы кривой фазных ЭДС.

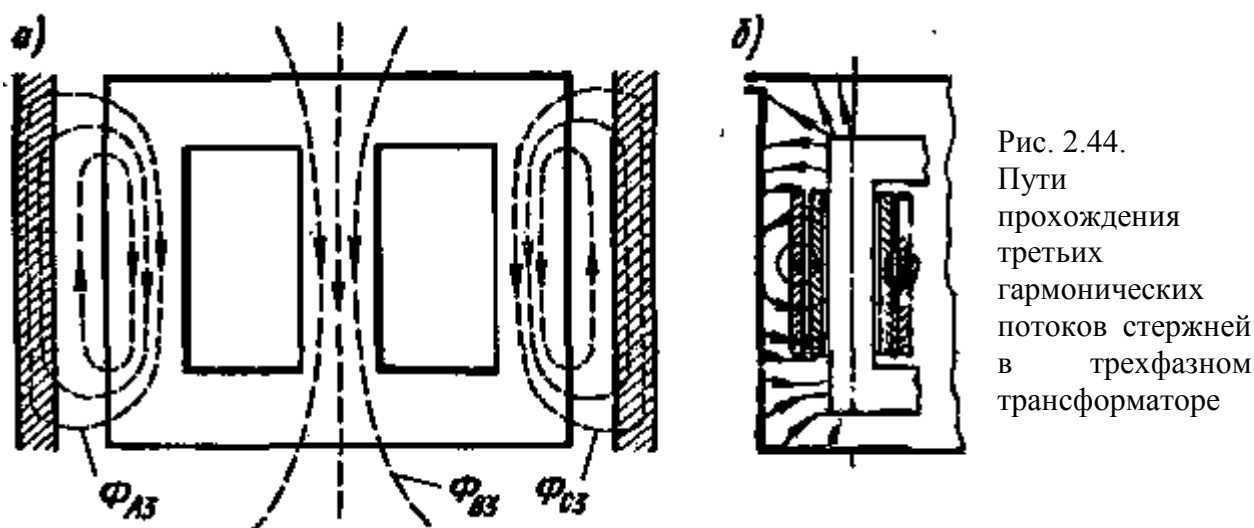


Рис. 2.44.  
Пути  
прохождения  
третьих  
гармонических  
потокос стержней  
в трехфазном  
трансформаторе

Еще одним отрицательным последствием возникновения третьих гармонических потоков фаз является увеличение потерь мощности. Эти потоки в трехстержневом трансформаторе замыкаются главным образом по стенкам бака, стяжным болтам и другим металлическим конструктивным деталям, окружающим магнитопровод (рис. 2.44, б). При этом в них индуцируются вихревые токи, создающие дополнительные потери мощности и местный нагрев соответствующих деталей. Отметим, что дополнительные потери достигают значительной величины только в трансформаторах мощностью свыше 1000 кВ · А. В трансформаторах меньшей мощности их практически можно не учитывать.

В группах, состоящих из трех однофазных трансформаторов, третьи гармонические потоки фаз могут замыкаться по тому же пути, что и основная гармоническая, и вследствие этого достигать недопустимой величины. Поэтому для таких групп схему У/Уне применяют.

Если одна из обмоток трансформатора соединена треугольником, то фазные потоки трансформатора становятся практически синусоидальными. Это объясняется тем, что в обмотке, соединенной треугольником, совпадающие по времени третьи гармонические ЭДС вызывают ток тройной частоты  $I_{23}$ , который циркулирует по фазным обмоткам (рис. 2.45, а) и уменьшает третьи гармонические потоки. Упрощенно можно считать, что результирующий поток тройной частоты является суммой третьих гармонических потоков, создаваемых первичной и вторичной обмотками  $\Phi_{рез3} = \Phi_{13} + \Phi_{23}$ .

Как показывает векторная диаграмма (рис. 2.45, б), результирующий поток  $\Phi_{рез3}$  незначителен, так как для токов тройной частоты обмотка, соединенная треугольником, является корот-козамкнутой и даже небольшая ЭДС  $\dot{E}_{23}$  вызывает значительный ток  $\dot{I}_{23}$ .

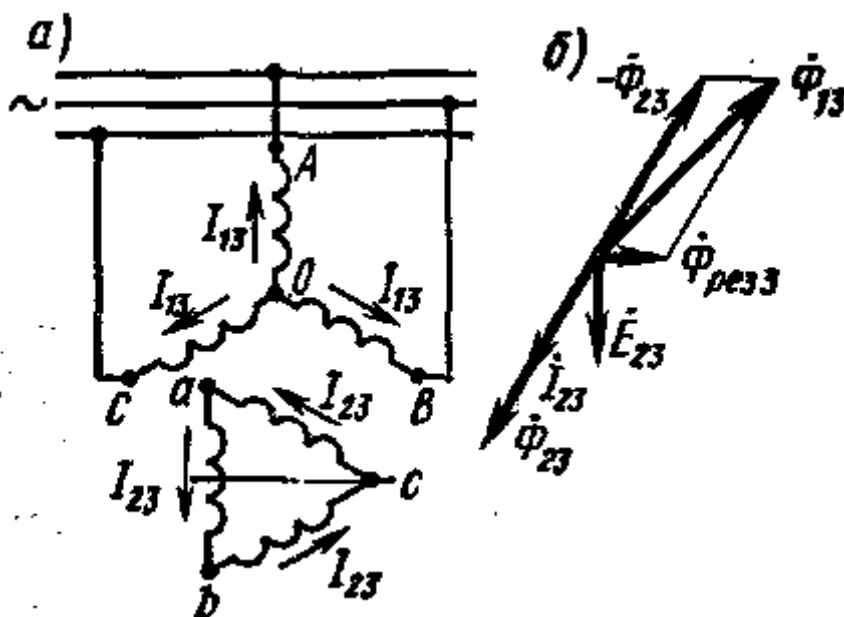


Рис. 2.45. Схема прохождения третьих гармонических тока по фазам трансформатора (а) и векторная диаграмма (б) созданных ими потоков и ЭДС

Таким образом, обмотки трехстержневых трансформаторов лучше всего соединять по схемам  $Y/\Delta$  и  $Y_n/\Delta$ , которые позволяют практически устранить третьи гармонические в кривых потока и в ЭДС. Силовые трансформаторы средней мощности при вторичных напряжениях не более 400 В можно соединять и по схемам  $Y/Y$  и  $\Delta/Y$ , так как это позволяет получать от вторичной обмотки не только линейное напряжение 380 В, используемое в силовых цепях, но и фазное напряжение 220 В, требуемое для осветительных установок.

#### 5. Схемы и группы соединений трёхфазных трансформаторов.

Обратимся к однофазному трансформатору, обмотки которого показаны на рис. 2-31.



Рис. 2-31. Обозначения зажимов обмоток однофазного трансформатора.

Согласно ГОСТ зажимы обмоток обозначаются так, как указано на этом рисунке. Начало и конец обмотки высшего напряжения обозначаются соответственно прописными буквами  $A$  и  $X$ . Для обмотки низшего напряжения берутся строчные буквы:  $a$  — начало и  $x$  — конец обмотки.

Зажимы обмоток трехфазных трансформаторов обозначаются, как указано на рис. 2-32.

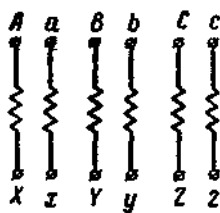


Рис. 2-32. Обозначения зажимов обмоток трех фазного трансформатора.

Зная обозначения зажимов обмоток, мы можем правильно соединить обмотки трехфазного трансформатора и трехфазной группы в звезду или треугольник. Их необходимо также знать при включении трансформаторов на параллельную работу.

Соединение обмотки, например, высшего напряжения в звезду показано на рис. 2-33.

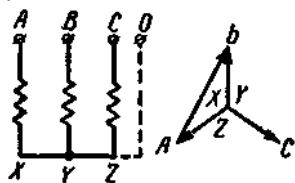


Рис. 2-33. Соединение обмотки в звезду.

Напомним, что в этом случае линейное напряжение в  $\sqrt{3}$  раз больше фазного, а линейный ток равен фазному.

На рис. 2-34 показано соединение обмотки в треугольник.

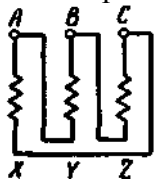


Рис. 2-34. Соединение обмотки в треугольник.

Здесь линейное напряжение равно фазному, а линейный ток в  $\sqrt{3}$  раз больше фазного.

Соединение обмоток в звезду и звезду обозначают Y/Y и называют "звезда — звезда" или "игрек — игрек". Соединение обмоток в звезду и треугольник обозначают Y/Δ и называют "звезда — треугольник" или "игрек — дельта". Если от обмотки, соединенной в звезду, выводится нулевая точка, то такое соединение обозначают Y<sub>0</sub> и называют «звезда с нулем» или «игрек нулевое».

Следует иметь в виду, что отношение линейных напряжений  $U_{л1}$  и  $U_{л2}$  трансформатора зависит не только от чисел витков обмоток  $w_1$  и  $w_2$  (на фазу), но и от способов их соединения:

$$\begin{aligned} \text{при Y/Y} \quad & \frac{U_{л1}}{U_{л2}} = \frac{w_1}{w_2}; \\ \text{при Y/Δ} \quad & \frac{U_{л1}}{U_{л2}} = \frac{\sqrt{3}w_1}{w_2}; \\ \text{при Δ/Y} \quad & \frac{U_{л1}}{U_{л2}} = \frac{w_1}{\sqrt{3}w_2}. \end{aligned}$$

## 2-11. Группы соединений

В зависимости от сдвига по фазе между линейными первичной и вторичной э.д.с. на одноименных зажимах трансформаторы разделяются на группы соединений, причем каждую группу составляют трансформаторы с одинаковым сдвигом по фазе между указанными э.д.с.

Для обозначения группы соединений выбирается ряд целых чисел от 1 до 12; здесь условно принято, что единица соответствует  $30^\circ$  по аналогии с углами между минутной и часовой стрелками часов в 1, 2, ..., 12 ч. При определении группы соединений с вектором э.д.с. обмотки высшего напряжения нужно совместить минутную стрелку, а с вектором э.д.с. обмотки низшего напряжения — часовую стрелку. Отсчет угла производится от минутной стрелки к часовой по направлению их вращения.

Обратимся к однофазному трансформатору, обмотки которого представлены на рис. 2-35.

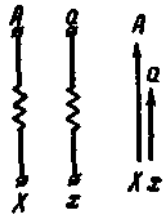


Рис. 2-35. Однофазный трансформатор 1/1-12.

Если они выполнены при одинаковом направлении намотки (например, по часовой стрелке, если смотреть от  $A$  к  $X$  и от  $a$  к  $x$ ), то наведенные в них э.д.с. изобразятся векторами, направленными в одну и ту же сторону (рис. 2-35). Такой трансформатор принадлежит к группе соединений, обозначаемой числом 12. Его условное обозначение: 1/1-12.

Если тот же трансформатор будет иметь обмотку, например, низшего напряжения, у которой будут переставлены обозначения зажимов по сравнению с предыдущим случаем, то сдвиг между э.д.с. будет равен  $180^\circ$  (рис. 2-36).

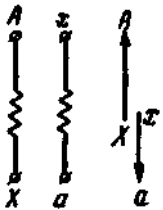


Рис. 2-36. Однофазный трансформатор 1/1-6.

Такой трансформатор принадлежит к группе соединений, обозначаемой числом 6. Обратимся к трехфазному трансформатору, представленному на рис. 2-37.

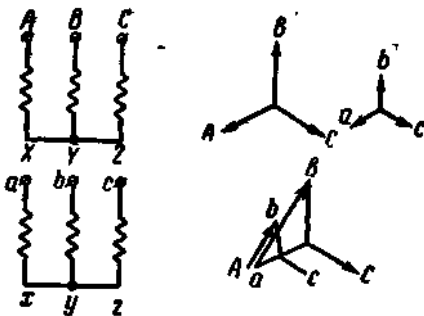


Рис. 2-37. Трехфазный трансформатор Y/Y-12.

Здесь обе обмотки соединены в звезду и намотаны в одинаковом направлении от начал к концам фаз. Векторные диаграммы э.д.с. показывают, что сдвиг между линейными э.д.с.  $AB$  и  $ab$  в данном случае равен  $0^\circ$ . В этом мы убеждаемся, совместив при наложении диаграмм точки  $A$  и  $a$ . Следовательно, рассматриваемый трансформатор принадлежит к группе 12. Его полное обозначение: Y/Y-12.

Если у трехфазного трансформатора группы 12 поменять местами начала и концы фаз, например обмотки низшего напряжения, то получается трансформатор группы 6 (рис. 2-38). Его обозначают: Y/Y-6.

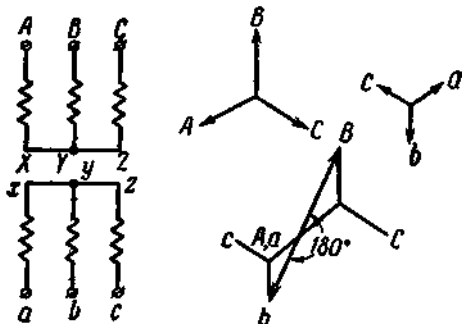


Рис. 2-38. Трехфазный трансформатор Y/Y-6.

Трехфазные трансформаторы с соединением обмоток  $Y/Y$  принадлежат к группам 6 и 12, если на каждом стержне сердечника помещены одноименные фазы. Если же у одной из обмоток сделать круговое перемещение обозначений зажимов, например вместо  $a-b-c$  сделать  $c-a-b$  и затем  $b-c-a$ , то при каждом перемещении будем поворачивать звезду вторичных э. д. с. на  $120^\circ$  и, следовательно, переходить от группы 12 к группам 4 и 8, а от группы  $b$  — к группам 10 и 2. Таким образом, при соединении обмоток  $Y/Y$  можем получить все четные группы соединений 2, 4, 6, 8, 10, 12.

Обратимся к трехфазному трансформатору с соединением обмоток  $Y/\Delta$  представленному на рис. 2-39.

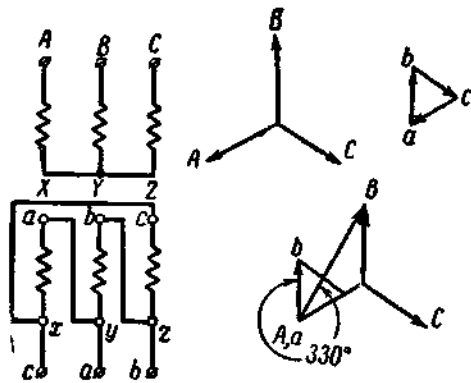


Рис. 2-39. Трехфазный трансформатор  $Y/\Delta$ -5.

Векторные диаграммы э. д. с., приведенные на этом же рисунке, показывают, что сдвиг между линейными э. д. с. здесь равен  $330^\circ$ . Следовательно, трансформатор принадлежит к группе 11. Он обозначается:  $Y/\Delta$ -11.

Если у рассмотренного трансформатора (рис. 2-39) поменять местами начала и концы фаз обмотки низшего напряжения, то получается трансформатор группы 5 (рис. 2-40) со сдвигом между линейными э. д. с., равным  $150^\circ$ . Такой трансформатор обозначается  $Y/\Delta$ -5.

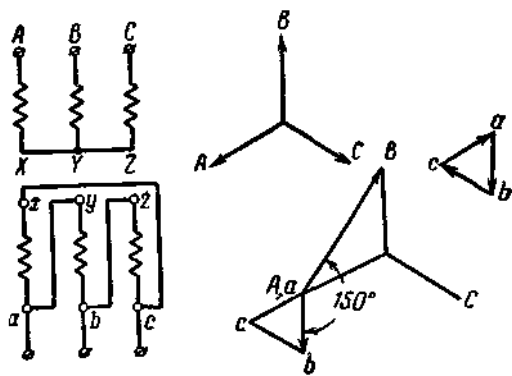


Рис. 2-40. Трехфазный трансформатор  $Y/\Delta$ -5.

Если сделать круговое перемещение обозначений зажимов для обмотки низшего напряжения трансформаторов, представленных на рис. 2-39 и 2-40, то перейдем соответственно от группы 11 к группам 3 и 7 и от группы 5 к группам 9 и 1. Следовательно, при соединении обмоток  $Y/\Delta$  (или  $\Delta/Y$ ) можем получить все нечетные группы 1, 3, 5, 7, 9, 11.

Такое большое разнообразие групп соединений трансформаторов не только не требуется, но вызывало бы большие затруднения на практике, например при осуществлении параллельной работы трансформаторов (§ 2-17).

В СССР стандартизованы только две группы соединений: 12 и 11. Все выпускаемые советскими заводами нормальные однофазные трансформаторы и трехфазные с соединением обмоток  $Y/Y$  принадлежат к группе 12, а трехфазные трансформаторы с соединением обмоток  $Y/\Delta$  — к группе 11. 1. Регулирование вторичного напряжения трансформаторов.

Принципы регулирования. При эксплуатации трансформаторов довольно часто возникает необходимость регулирования вторичного напряжения. При этом различают два основных случая:

- 1) стабилизация вторичного напряжения при незначительном (на 5 — 10%) изменении первичного напряжения, что происходит обычно из-за падения напряжения в линии;
- 2) регулирование вторичного напряжения (из-за особенностей технологического процесса) в широких пределах при неизменном (или мало изменяющемся) первичном напряжении.

В обоих случаях вторичное напряжение регулируется путем изменения коэффициента трансформации, т. е. соотношения между числами витков первичной и вторичной обмоток.

В первом случае при небольших изменениях первичного напряжения можно изменять число витков либо первичной, либо вторичной обмотки. Например, при снижении первичного напряжения соответственно уменьшают число витков первичной обмотки так, чтобы ЭДС витка осталась неизменной. Поскольку число витков вторичной обмотки не изменяется, неизменной останется и ЭДС вторичной обмотки. При возрастании первичного напряжения соответственно увеличивают число витков первичной обмотки.

Во втором случае, когда требуется регулировать вторичное напряжение при неизменном первичном, изменяют число витков вторичной обмотки. Изменять число витков первичной обмотки в этом случае нельзя, так как это приведет к изменению магнитного потока трансформатора и, как следствие, к его перегреву или плохому использованию. Кроме того, очевидно, что получить малое выходное напряжение  $U_2 = U_1 w_2 / w_1$  при неизменном числе витков вторичной обмотки практически невозможно, так как при этом необходимо иметь большое число регулировочных витков\*.

Переключение ответвлений обмоток  $w_1$  и  $w_2$  может осуществляться при отключении трансформатора от первичной и вторичной сетей (переключение без возбуждения) или под нагрузкой (регулирование под нагрузкой). Существуют также трансформаторы с плавным регулированием напряжения, в которых плавно изменяют число витков  $w_2$  или магнитный поток  $\Phi_2$ , охватываемый этой обмоткой.

---

\* При очень больших мощностях иногда применяют регулирование по высоковольтной первичной стороне (чтобы избежать применения регулирующей аппаратуры на большие токи), используя специальные автотрансформаторные схемы.

---

Переключение ответвлений без возбуждения. Регулирование напряжения этим способом применяют в масляных и сухих силовых трансформаторах общепромышленного назначения, а также в трансформаторах, предназначенных для вентильных преобразователей. Напряжение регулируют на  $\pm 5\%$  от  $U_{ном}$  ступенями по 2,5 %, т. е. трансформатор имеет пять ступеней регулирования напряжения. В трансформаторах сравнительно небольшой мощности используют три ступени регулирования напряжения (+ 5; 0; —5%). В силовых трансформаторах большой мощности обычно напряжение

регулируют на стороне ВН. Это позволяет упростить конструкцию переключателя ответвлений, так как токи в обмотке ВН меньше, чем в обмотке НН. Кроме того, число витков обмотки ВН больше, чем обмотки НН, вследствие чего изменение числа витков на 1,25 — 2,5 % можно осуществлять с большей точностью. В трансформаторах, предназначенных для вентильных преобразователей, часто напряжение регулируют на стороне НН; при этом переключающую аппаратуру выполняют на большие токи, что сильно усложняет ее конструкцию.

При регулировании напряжения отключают часть витков только одной (первичной или вторичной) обмотки, что нарушает равномерность распределения МДС по высоте обмотки. Это приводит к искажению магнитного поля рассеяния и возникновению поперечной составляющей потока рассеяния, которая, взаимодействуя с током обмоток, создает электромагнитные силы, действующие на обмотку в осевом направлении (см. § 2.19). При аварийных режимах (короткое замыкание) эти силы могут достигать больших значений и вызывать разрушение обмотки. Поэтому стремятся равномерно распределить отключаемые витки обмотки по высоте или расположить их по возможности в середине высоты обмотки симметрично относительно обоих ярм. В трехфазных трансформаторах сравнительно небольшой мощности, где электромагнитные силы при коротких замыканиях невелики, для упрощения конструкции переключателя ответвлений целесообразно выполнять ответвления вблизи заземленной нулевой точки обмотки, так как при этом уменьшается напряжение, на которое должна быть рассчитана изоляция переключателя. Если ответвления располагать в средней части обмотки (в мощных трансформаторах), то переключающую аппаратуру необходимо выполнять с усиленной изоляцией и с высокой степенью точности, так как несогласованность работы ее элементов при высоком напряжении может привести к серьезным авариям.

В трансформаторах с многослойной цилиндрической обмоткой отключаемые витки обычно размещают в конце обмотки во внешнем ее слое и располагают симметрично по высоте относительно обоих ярм. При переходе с одного ответвления  $X1$  -  $X5$  на другое (рис. 2.56, *а*) отключается равное число витков. В обмотках других конструкций ответвления  $A2$  —  $A7$  располагают в средней части обмотки (рис. 2.56, *б*). При номинальном напряжении обмотки ВН до 35 кВ часто применяют обратную схему (рис. 2.56, *в*), которая позволяет расположить ответвления  $X1$  —  $X5$  около нулевой точки и в то же время в середине обмотки (по высоте). При обратной схеме одна половина обмотки имеет правую, а другая — левую намотку.

В масляных трансформаторах переключение ответвлений осуществляют контактным переключателем, встроенным в трансформатор, рукоятка которого выведена из бака. В сухих трансформаторах ответвления выводят на контактную панель и переключение производят путем перестановки контактной пластины на различные выводные шпильки.



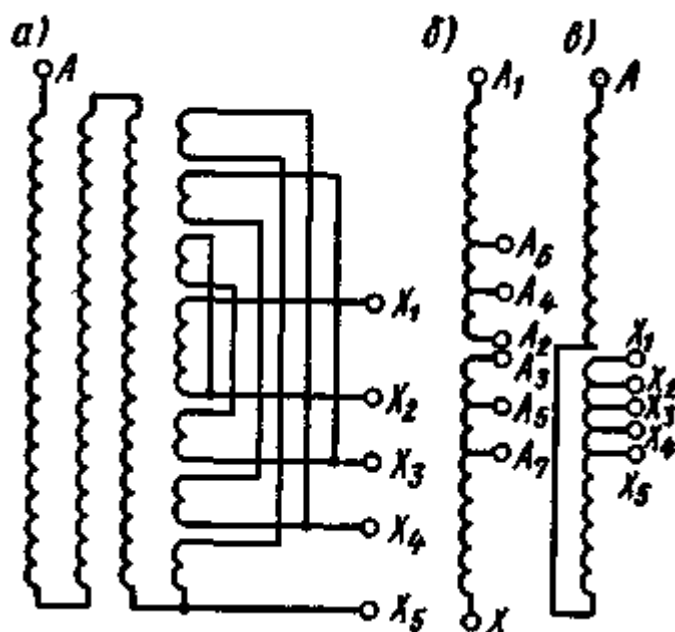
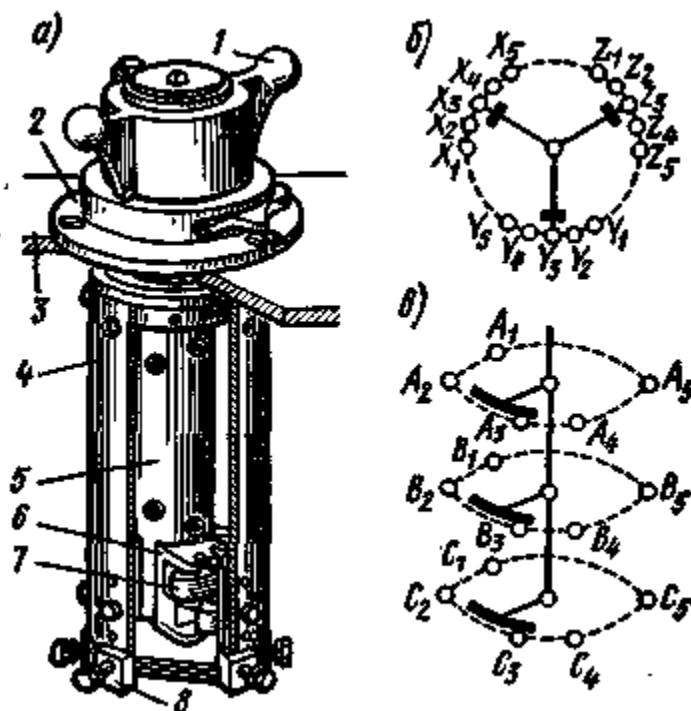


Рис. 2.56. Расположение регулировочных ответвлений в силовых трансформаторах: а — в многослойных цилиндрических обмотках; б — в средней части обмоток (прямая схема); в — в средней части обмотки (оборотная схема)

Рис. 2.57. Трехфазный переключатель ответвлений (а) и схемы расположения его контактных элементов (б, в): 1 — привод, 2 — фланец колпака; 3 — крышка бака трансформатора; 4 — бумажно-бакелитовый цилиндр; 5 — бумажно-бакелитовая изоляция вала; б — коленчатый вал; 7 — подвижные контакты; 8 — неподвижные контакты



Контактный переключатель (рис. 2.57, а) имеет систему неподвижных контактов, соединенных с ответвлениями обмотки, и систему подвижных контактов, замыкающихся с неподвижными и обеспечивающих требуемую схему соединения между собой обмоток отдельных фаз. При выполнении ответвлений  $X_1 — X_5$ ,  $Y_1 — Y_5$  и  $Z_1 — Z_5$  у нулевой точки можно применить общий переключатель для всех трех фаз (рис. 2.57, б), так как рабочее напряжение между отдельными частями переключателя не превышает 10% от линейного напряжения трансформатора. Если ответвления  $A_1 — A_5$ ;  $B_1 — B_5$ ;  $C_1 — C_5$  расположены в середине обмотки (см. рис. 2.56, б), то каждая фаза должна иметь переключатель (рис. 2.57, в), так как между ответвлениями разных фаз действует напряжение, равное приблизительно  $0,5U_{ном}$ .

Переключение ответвлений под нагрузкой. Для повышения гибкости и удобства управления крупными электрическими сетями и системами большое значение имеет возможность регулирования напряжения трансформаторов без перерыва нагрузки. Потребность в таких трансформаторах быстро возрастает. В соответствии с этим промышленность выпускает трансформаторы с регулированием напряжения под нагрузкой для всех мощностей от 63 до 200000 кВ · А с пределами регулирования  $\pm(10 \div 16)\%$ .

При использовании этого способа регулирования необходимо:

- 1) обеспечить переход с одного ответвления на другое без разрыва тока, для чего в некоторый момент времени должны быть включены два соседних ответвления;
- 2) ограничить ток короткого замыкания (ток к. з.) в части обмотки трансформатора, расположенной между этими ответвлениями при одновременном их включении.

Для этого применяют переключающие устройства с дистанционным управлением и с токоограничивающими реакторами и резисторами, а в трансформаторах, предназначенных для вентильных преобразователей,—устройства с вентильным переходом.

На рис. 2.58 приведена схема переключающего устройства с токоограничивающим реактором в трех положениях его переключающих элементов. Устройство состоит из реактора  $P$ , двух контакторов  $K1$  и  $K2$ , предназначенных для разрыва тока, проходящего по двум параллельным ветвям реактора, и двух переключателей  $\Pi1$  и  $\Pi2$ , осуществляющих переключения этих ветвей при отсутствии тока.

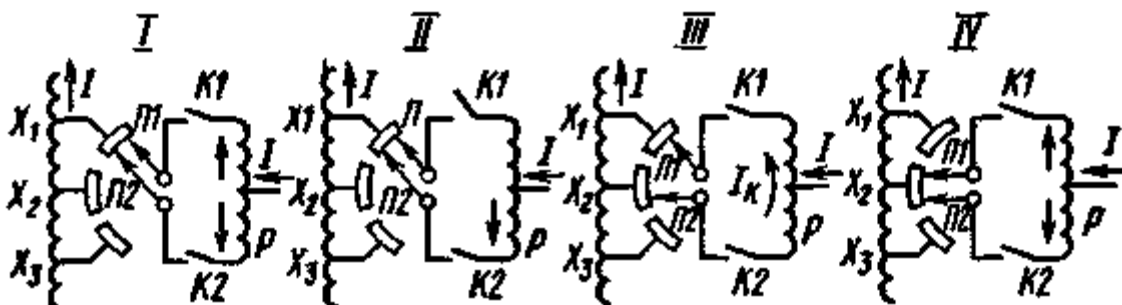


Рис. 2.58. Схемы переключающего устройства с токоограничивающим реактором

Переключающее устройство действует следующим образом. В *первом рабочем положении I*, когда переключающее устройство подключено к ответвлению  $X1$ , контакторы  $K1$  и  $K2$  замкнуты и ток проходит по параллельным ветвям реактора в разных направлениях, не намагничивая его. Поэтому индуктивное сопротивление реактора весьма мало. При переходе с ответвления  $X1$  на ответвление  $X2$  сначала отключается контактор  $K1$ , но цепь тока не прерывается, так как он продолжает проходить через контактор  $K2$  (промежуточное положение II). Затем переключатель  $\Pi2$  без тока переводится на ответвление  $X2$ , после чего вновь включается контактор  $K1$  {промежуточное положение III}. В этом положении через обе половины реактора проходит ток одного направления, его индуктивное сопротивление резко возрастает и он эффективно ограничивает ток  $I_k$  в замкнутом контуре, образованном частью обмотки трансформатора, которая расположена между ответвлениями  $X1$  и  $X2$ . После этого размыкается контактор  $K2$ , переключатель  $\Pi1$  переводится без тока на ответвление  $X2$  и снова замыкается контактор  $K2$ , т. е. на этом

заканчивается переход во *второе рабочее положение IV*, при котором переключающее устройство подключено к ответвлению *X2*.

Реактор и переключатели помещают внутри масляного бака трансформатора, а контакторы — в специальном баке (рис. 2.59), расположенном на боковой стенке основного бака. Находящееся в нем масло, которое загрязняется при разрыве контакторами тока, не соединяется с маслом основного бака.

В переключающем устройстве с токоограничивающими резисторами (рис. 2.60, *a*) имеются три переключателя — *П1*, *П2* и *П3*. При работе трансформатора на ответвлении *X2* переключатели *П2* и *П3* занимают показанное на рисунке 2.60 положение. Чтобы перейти на соседнее ответвление *X1*, сначала на это ответвление следует провести без тока переключатель *П1*. Затем быстродействующий переключатель *П3* быстро перебрасывается по часовой стрелке в положение, при котором он замыкает контакты *1* и *2*. Процесс размыкания контактов *3,4* изымаения контактов *1, 2* происходит таким образом, что цепь тока не прерывается, а в промежуточном положении, когда переключатель *П3* замыкает одновременно контакты *1* и *4*, ток в части обмотки трансформатора, расположенной между ответвлениями *X1* и *X2*, ограничивается резисторами *R1* и *R2*. Во избежание перегрева этих резисторов переключатель *П3* переводится из одного рабочего положения в другое в течение сотых долей секунды.

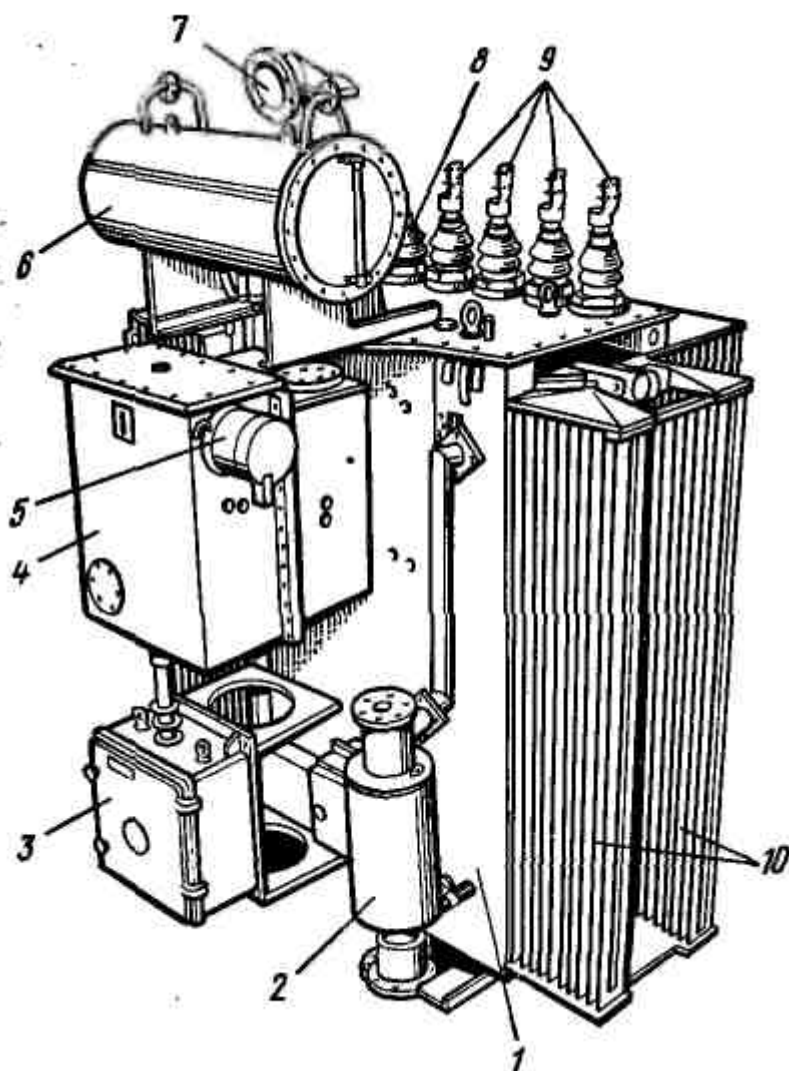
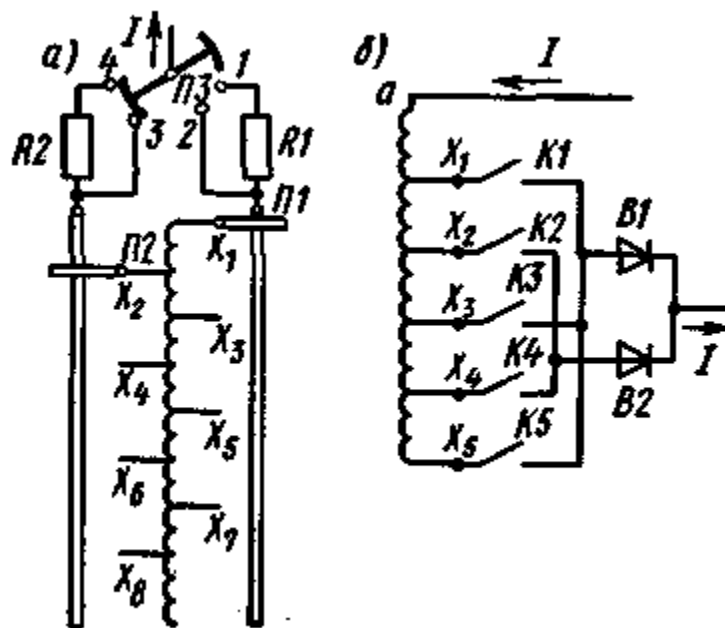


Рис. 2.59.  
Трансформатор с регулированием напряжения под нагрузкой:

1 — бак; 2 — термосифонный фильтр; 3 — приводной механизм; 4 — бак с контакторами; 5 — муфта; 6 — расширитель; 7 — выхлопная труба; 8 — вводы НН;

9 — вводы ВН; 10 — радиаторы

Рис. 2.60. Схемы переключающего устройства с токоограничивающими активными сопротивлениями (а) и с вентильным переходом (б)



При питании от трансформатора преобразовательных устройств для переключения ответвлений на вторичной обмотке к которой подключаются вентили преобразователя, широко используют схему вентильного перехода (рис. 2.60, б). В этой схеме последовательно с нечетными контакторами  $K1 — K5$  включен вентиль  $B1$ , а последовательно с четными контакторами  $K2 — K4$  — вентиль  $B2$ . При переходе, например, с ответвления  $X1$  на  $X2$  они позволяют осуществлять замыкание контактора  $K2$  до отключения  $K1$ , так как вентили  $B1$  и  $B2$  предотвращают возникновение тока к. з. в части обмотки между  $X1$  и  $X2$  при одновременном включении обоих контакторов. В дальнейшем контактор  $K1$  может быть отключен, так как цепь тока будет замкнута через контактор  $K2$ .

##### 5. Параллельная работа трансформаторов.

Параллельное соединение трансформаторов необходимо для обеспечения бесперебойного энергоснабжения при выключении трансформаторов для ремонта. Далее оно целесообразно в тех случаях, когда мощность нагрузки сильно изменяется в течение суток; тогда можно в зависимости от общей нагрузки оставлять в работе столько трансформаторов, чтобы потери в них были наименьшими. При расширении подстанций, а также на мощных подстанциях устанавливается несколько трансформаторов, которые включаются на параллельную работу. При такой работе обмотки трансформаторов с первичной и вторичной стороны присоединяются к общим шинам, как показано на рис. 2-56.

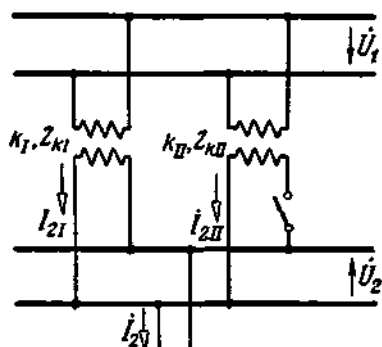


Рис. 2-56. Схема включения на параллельную работу трансформаторов.

Здесь обмотки высшего напряжения служат в качестве первичных.

На параллельную работу трансформаторы могут быть включены только при соблюдении определенных условий. Эти условия практически сводятся к следующим:

1. равенство номинальных напряжений — первичных и вторичных (равенство коэффициентов трансформации);
2. трансформаторы должны принадлежать к одной и той же группе соединений;
3. равенство номинальных напряжений короткого замыкания.

При соблюдении первых двух условий напряжение между зажимами рубильника (рис. 2-56) до его замыкания равно нулю. В этом случае после включения рубильника никакого уравнивающего тока в обмотках трансформаторов не получится.

Можно допустить различие в коэффициентах трансформации трансформаторов, включаемых на параллельную работу, не больше 0,5% от их среднего значения.

Недопустимо включение на параллельную работу трансформаторов, принадлежащих к разным группам соединений, так как результирующая э.д.с. в контуре вторичных обмоток вызовет при этом большой ток, который быстро приведет к чрезмерному нагреванию обмоток трансформаторов.

Соблюдение третьего условия необходимо для того, чтобы общая нагрузка распределялась пропорционально номинальным мощностям параллельно работающих трансформаторов.

Пренебрегая токами холостого хода, можем написать следующие уравнения напряжений:

$$-\dot{U}_2 = k_I \dot{U}_1 - \dot{I}_{2I} Z_{\kappa I}; \quad (2-132)$$

$$-\dot{U}_2 = k_{II} \dot{U}_1 - \dot{I}_{2II} Z_{\kappa II}, \quad (2-133)$$

где  $k_I = \frac{w_{2I}}{w_{1I}}$  и  $k_{II} = \frac{w_{2II}}{w_{1II}}$  — коэффициенты трансформации;

$Z_{\kappa I} = (r'_{1I} + r_{2I}) + j(x'_{1I} + x_{2I})$  и  $Z_{\kappa II} = (r'_{1II} + r_{2II}) + j(x'_{1II} + x_{2II})$

— сопротивления короткого замыкания со стороны вторичных обмоток.

Так как  $I_2 = I_{2I} + I_{2II}$ , то вместо (2-132) и (2-133) можно написать:

$$-\dot{U}_2 = k_{II} \dot{U}_1 - \dot{I}_2 Z_{\kappa II} + \dot{I}_{2I} Z_{\kappa II}; \quad (2-132a)$$

$$-\dot{U}_2 = k_I \dot{U}_1 - \dot{I}_2 Z_{\kappa I} + \dot{I}_{2II} Z_{\kappa I}, \quad (2-133a)$$

Решая (2-132) и (2-132a) в отношении  $I_{2I}$ , а (2-133) и (2-133a) в отношении  $I_{2II}$ , получим:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{2I} &= \frac{(k_I - k_{II}) \dot{U}_1}{Z_{\kappa I} + Z_{\kappa II}} + \dot{I}_2 \frac{Z_{\kappa II}}{Z_{\kappa I} + Z_{\kappa II}}; \\ \dot{I}_{2II} &= -\frac{(k_I - k_{II}) \dot{U}_1}{Z_{\kappa I} + Z_{\kappa II}} + \dot{I}_2 \frac{Z_{\kappa I}}{Z_{\kappa I} + Z_{\kappa II}}. \end{aligned} \quad (2-134)$$

Полученные равенства показывают, что ток каждого трансформатора состоит из уравнивающего тока, обусловленного различием коэффициентов трансформации, и тока нагрузки. Очевидно, что уравнивающий ток будет меть место и при отсутствии нагрузки (при  $I_2 = 0$ ).

Из (2-134) также видно, что при  $k_I = k_{II}$  токи распределяются обратно пропорционально сопротивлениям короткого замыкания. В этом случае мы можем написать в соответствии со схемой, представленной на рис. 2-57,

$$\frac{\dot{I}_I}{\dot{I}_{II}} = \frac{Z_{\kappa II}}{Z_{\kappa I}} = \frac{z_{\kappa II} e^{j\varphi_{\kappa II}}}{z_{\kappa I} e^{j\varphi_{\kappa I}}} = \frac{z_{\kappa II}}{z_{\kappa I}} e^{j(\varphi_{\kappa II} - \varphi_{\kappa I})}.$$

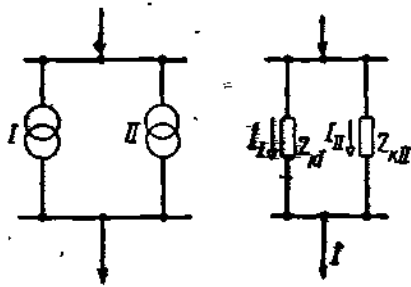


Рис. 2-57. Схема для определения токов параллельно работающим трансформаторов.

Значение разности углов ( $\varphi_{кII} - \varphi_{кI}$ ) в обычных случаях (если мощности параллельно работающих трансформаторов не сильно отличаются одна от другой) близко к нулю.

Переходя от отношения комплексов к отношению их модулей, имеем:

$$\frac{I_I}{I_{II}} = \frac{z_{кII}}{z_{кI}}.$$

Если обе части равенства умножить на  $\frac{I_{II}}{I_I} \times \frac{U_n}{U_n}$  и левую часть, кроме того, на  $\frac{U_n}{U_n}$ , то получим:

$$\frac{S_I}{S_{In}} : \frac{S_{II}}{S_{In}} = \frac{u_{кII}}{u_{кI}} = \frac{1}{u_{кI}} : \frac{1}{u_{кII}}.$$

Из полученного соотношения следует, что мощности параллельно работающих трансформаторов, выраженные в долях их номинальных мощностей, относятся друг к другу, как обратные значения номинальных напряжений короткого замыкания. Если  $u_{кI} \neq u_{кII}$ , то относительная нагрузка будет больше у того трансформатора, у которого  $u_{кI}$  меньше. Практически допускается различие между номинальными напряжениями короткого замыкания трансформаторов, включаемых на параллельную работу, в  $\pm 10\%$  от их среднего значения.

Приведенные выводы могут быть распространены на любое число параллельно работающих трансформаторов.

При включении на параллельную работу трехобмоточных трансформаторов необходимо соблюдение указанных условий для соответствующих пар обмоток обоих трансформаторов и, кроме того, необходимо, чтобы оба трансформатора имели одинаковое расположение вторичных обмоток относительно первичной. При включении двухобмоточного трансформатора на параллельную работу с трехобмоточным должны быть соблюдены те же условия для двухобмоточного трансформатора и соответствующих двух обмоток трехобмоточного трансформатора и, кроме того, последний должен иметь двустороннее расположение вторичных обмоток относительно первичной.

## 1.5 Лекция №5 (2 часа).

**Тема: «Устройство и принцип действия асинхронных машин»**

### 1.5.1 Вопросы лекции:

1. Назначение и принцип действия.
2. Устройство асинхронных двигателей.
3. Серии асинхронных двигателей.

## 1.5.2 Краткое содержание вопросов

### 1. Назначение и принцип действия.

Асинхронные машины применяются на практике главным образом как двигатели. Наибольшее распространение имеют трехфазные асинхронные двигатели. Они находят себе самое широкое применение на заводах, фабриках, в сельском хозяйстве, на строительных работах, для вспомогательных механизмов электрических станций. Особенно много требуется трехфазных двигателей мощностью от 0,4 до 100 кВт. Такие двигатели массового применения электромашиностроительными заводами СССР выпускаются ежегодно на миллионы киловатт. Большое количество двигателей выпускается также на мощности свыше 100 кВт.

Однофазные асинхронные двигатели в настоящее время выполняются, как правило, в виде малых машин обычно на мощности не свыше 0,5 кВт.

Обмотки статора и ротора асинхронных машин между собой электрически не связаны; между ними существует только магнитная (трансформаторная) связь, называемая также индуктивной, что дало повод называть асинхронные машины индукционными. Однако это название в Советском Союзе почти не применяется.

Обмотка статора обычно является первичной обмоткой при работе машины двигателем, так как к ней в этом случае подводится электрическая энергия. Токи обмотки статора совместно с токами обмотки ротора создают в двигателе вращающееся магнитное поле. Обмотка ротора при этом служит в качестве вторичной. Токи, наведенные в ней вращающимся полем, взаимодействуя с ним, создают электромагнитные силы, заставляющие ротор вращаться.

Асинхронные двигатели выполняются или с короткозамкнутой обмоткой на роторе, или с обмоткой на роторе (обычно трехфазной), соединенной с контактными кольцами. В соответствии с этим различают короткозамкнутые двигатели и двигатели с контактными кольцами. Последние условие называются также двигателями с фазным ротором.

На щитке асинхронного двигателя указываются следующие номинальные величины его:

1. мощность (на валу), кВт или Вт;
2. линейное напряжение обмотки статора, В;
3. линейный ток, А;
4. частота тока, Гц;
5. частота вращения ротора (число оборотов в минуту);
6. коэффициент полезного действия;
7. коэффициент мощности (косинус угла сдвига фаз между напряжением и током фазы обмотки статора);
8. напряжение на контактных кольцах (при неподвижном роторе) и ток обмотки ротора (при номинальном режиме) для двигателя с контактными кольцами.

Кроме того, на щитке указываются схема соединений обмотки статора, режим работы (продолжительный, кратковременный или повторно-кратковременный), для которого предназначен двигатель, и полный вес его в килограммах.

### 2. Устройство асинхронных двигателей.

Основными частями машины являются статор и ротор. Их сердечники собираются из листов электротехнической стали (рис. 3-1), которые до сборки обычно покрываются с обеих сторон специальным лаком.

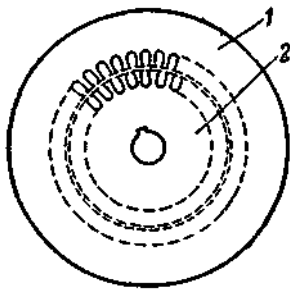


Рис. 3-1. Листы сердечников статора (1) и ротора (2).

Тем самым предотвращается образование больших вихревых токов в стали сердечников. Иногда для небольших двигателей их сердечники собирают из листов без покрытия последних лаком, так как окалина на внешних поверхностях листов создает достаточную изоляцию между ними.

На рис. 3-1 показаны листы, из которых собираются статор и ротор машин небольшой и средней мощностей. Они обычно штампуются при помощи штампа, позволяющего одним ударом получить необходимую форму листа со всеми отверстиями. Отверстия на внутренней окружности листов статора и на внешней окружности листов ротора после сборки их образуют пазы статора и ротора, в которые закладываются проводники обмоток.

На рис. 3-2 и 3-3 показаны в разобранном виде двигатели — короткозамкнутый и с контактными кольцами.

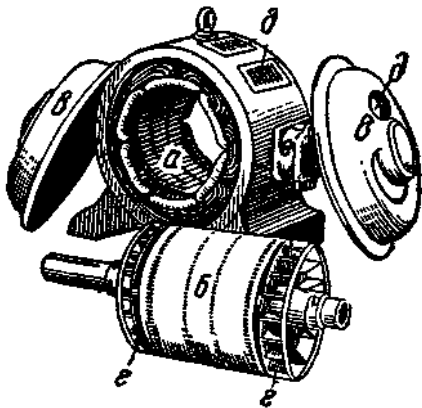


Рис. 3-2. Асинхронный двигатель короткозамкнутым ротором в разобранном виде. *а* — статор; *б* — ротор; *в* — подшипниковые щиты; *г* — вентилятор; *д* — отверстия для входа и выхода охлаждающего воздуха; *е* — коробка, прикрывающая клеммы.

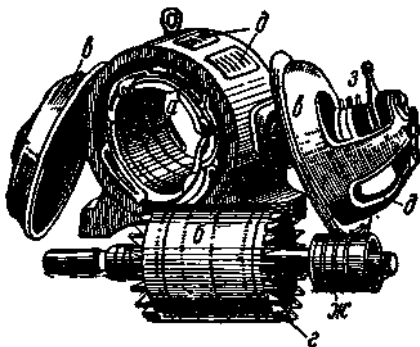


Рис. 3-3. Асинхронный двигатель с контактными кольцами в разобранном виде. *а* — статор; *б* — ротор; *в* — подшипниковые щиты; *г* — вентилятор; *д* — отверстия для входа и выхода охлаждающего воздуха; *е* — коробка, прикрывающая клеммы; *жс* — контактные кольца, *з* — щеткодержатели и щетки.



Сердечник статора помещается в корпусе, который служит его внешней частью. Сердечник ротора укрепляется непосредственно на валу двигателя или на втулке (в форме крестовины), надетой на вал двигателя.

Вал вращается в подшипниках, укрепленных в боковых щитах, называемых подшипниковыми щитами. Машины мощностью до 500—600 кВт (иногда и выше) снабжаются подшипниками качения (шариковыми и роликовыми), при большей мощности — подшипниками скольжения. При внешнем диаметре сердечника статора свыше 1 м обычно применяют стояковые подшипники (рис. 3-4).

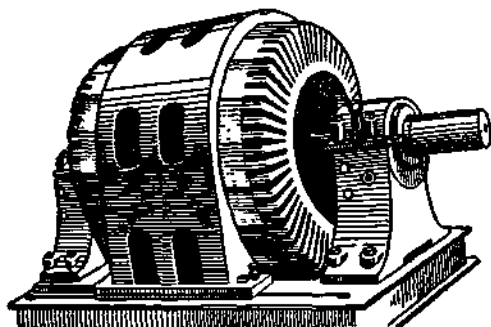


Рис. 3-4. Асинхронный двигатель большой мощности со стояковыми подшипниками.

Подшипниковые щиты прикрепляются к корпусу статора при помощи болтов или шпилек. Щиты и корпус статора обычно выполняются литыми из чугуна. Для малых машин их часто выполняют литыми из сплава с большим содержанием алюминия, что уменьшает вес машины.

### 3. Серии асинхронных двигателей.

В двигателях серий А, АО, А2, АО2 и А3 буква А означает брызгозащищенное исполнение, АО — закрытое обдуваемое, первая цифра после букв — номер серии. Число после первого дефиса характеризует типоразмер; первая цифра в нем указывает габарит (условный номер наружного диаметра сердечника статора), вторая — условный номер длины. Цифра после второго дефиса соответствует числу полюсов. Например, АО2-62-4 — асинхронный трехфазный электродвигатель в закрытом обдуваемом исполнении, второй единой серии, шестого габарита, второй длины, четырехполюсный. Электродвигатели 1—5-го габаритов во второй серии выпускают только в закрытом обдуваемом исполнении, что повышает их надежность: срок службы закрытой машины малой мощности увеличивается в 1,5—2 раза по сравнению с защищенной.

Двигатели единых серий А, АО и А2, АО2 основного исполнения имеют короткозамкнутый ротор с литой алюминиевой обмоткой. На их базе был создан ряд модификаций двигателей. При обозначении модификаций к буквенной части добавляется буква для электродвигателей: с повышенным пусковым моментом — П (например, АОП2-62-4); с повышенным скольжением — С, для текстильной промышленности — Т, с фазным ротором — К.

Асинхронные двигатели с повышенным пусковым моментом предназначены для привода механизмов с большими нагрузками в период пуска. Двигатели с повышенным скольжением применяются для механизмов с неравномерным ударным характером нагрузки и механизмов с большой частотой пусков и реверсов.

Для двигателей общего назначения с алюминиевой обмоткой статора в конце обозначения добавляется буква А (например, АО2-42-4А). В двигателях на несколько частот вращения в цифры, характеризующие числа полюсов, вносят все их значения,

разделенные косыми линиями: например АО-94-12/8/6/4 — трехфазный асинхронный двигатель серии АО 9 габарита, 4-й длины на 12, 8, 6 и 4 полюсов.

Буква Л (например, АОЛ2-21-6) обозначает, что корпус и щиты отлиты из алюминиевого сплава.

Обозначение типоразмера двигателя серии 4А, например 4АН280М2УЗ, расшифровывается следующим образом: 4 — порядковый номер серии, А — вид двигателя (асинхронный), Н — защищенный (отсутствие данного знака означает закрытое обдуваемое исполнение), 280 — высота оси вращения (три или две цифры), мм, S, М или L - установочный размер по длине станины, 2 (или 4, 6, 8, 10, 12) — число полюсов, УЗ — климатическое исполнение (У) и кате азмещения (З).

После первой буквы А может стоять вторая А (например, 4АА63), которая означает, что станина и щиты выполнены из алюминиевого сплава, или Х—станина алюминиевая, щиты чугунные; отсутствие этих знаков свидетельствует о том, что станина и щиты чугунные или стальные.

В обозначении двигателей с фазным ротором ставится буква К, например 4АНК.

При одних и тех же размерах станины сердечник статора может иметь разные длины. В этом случае в обозначении типоразмера после букв S, М, JL и непосредственно после высоты вращения, если эти буквы отсутствуют, ставятся знаки А (меньшая длина сердечника) или В (большая длина), например 4А90LА8, 4А90LВ8, 4А71А6, 4А71В6.

Климатические исполнения двигателей обозначаются следующими буквами: У — для умеренного климата, ХЛ — для холодного климата, ТВ — для влажного тропического климата, ТС — для тропического сухого климата, Т — для тропического как сухого, так и влажного климата, О — для всех районов на суше (общеклиматическое исполнение), М — для морского умеренного холодного климата, ТМ — для тропического морского климата, . ОМ — для неограниченного района плавания, В — для всех районов на суше и море.

Категории размещения обозначаются цифрами: 1 — для работы на открытом воздухе, 2 — для помещений со сравнительно свободным доступом воздуха, 3 — для закрытых помещений, где колебания температуры, влажности, а также воздействие песка и пыли существенно меньше, чем на открытом воздухе, 4 — для помещений с искусственно регулируемые климатическими условиями (например, закрытые отапливаемые и вентилируемые производственные помещения), 5 — для работы в помещениях с повышенной влажностью (например, невентилируемые и неотапливаемые подземные помещения, помещения, в которых возможно длительное наличие воды или частая конденсация влаги на стенах и потолке).

ГОСТ 17494—72 на электрические машины устанавливают степени защиты персонала от соприкосновения с токопроводящими или движущимися частями, находящимися внутри машины и, кроме того, от попадания твердых посторонних тел и воды.

Электродвигатели общего применения в основном изготавливают двух степеней защиты: IP23 (или IP22 для двигателей постоянного тока) и IP44: первая из них характеризует машины в защищенном исполнении, вторая — в закрытом.

Буквенно-цифровое обозначение степени защиты состоит из латинских букв IP и двух цифр. Первая из этих цифр характеризует степень защиты персонала от соприкосновения с токопроводящими и вращающимися частями, находящимися внутри машины, а также степень защиты самой машины от попадания в нее твердых посторонних тел; вторая цифра — от проникновения воды внутрь машины.

В обозначении IP23 первая цифра 2 указывает, что в машине обеспечена защита от возможного соприкосновения пальцев человека с токопроводящими и движущимися частями и попадания внутрь твердых посторонних тел диаметром не менее 12,5 мм. Цифра 3 указывает на обеспечение защиты от дождя, падающего на машину под углом не более 60° к вертикали, а в обозначении IP22 вторая цифра — от капель воды, падающих под углом не более 15° к вертикали.

В обозначении IP44 первая цифра 4 указывает на обеспечение защиты от соприкосновения инструмента, проволоки и других подобных предметов толщиной более 1 мм с токопроводящими частями внутри машины, а также от попадания внутрь предметов размерами не менее 1 мм. Вторая цифра 4 обозначает защиту от водяных брызг любого направления.

## **1.6 Лекция №6 (2 часа).**

### **Тема: «Пуск АД и регулирование частоты вращения»**

#### **1.6.1 Вопросы лекции:**

1. Пуск в ход трёхфазных асинхронных двигателей.
2. Короткозамкнутые асинхронные двигатели с повышенным пусковым моментом.
3. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей.

#### **1.6.2 Краткое содержание вопросов**

1. Пуск в ход трёхфазных асинхронных двигателей.

Выше было показано, что условия работы асинхронного двигателя в режиме пуска значительно отличаются от условий его работы в нормальном режиме. В режиме пуска в обмотках ротора и статора проходят токи, значительно превышающие токи, протекающие в этих обмотках в номинальном режиме. Длительный ток приводит к перегреву обмоток двигателя и может вызвать сгорание обмоток и аварию двигателя.

Для того чтобы исключить такие явления, необходимо, с одной стороны, обеспечить ограничение пускового тока двигателя, а с другой стороны, по возможности уменьшить время его разгона. Время разгона двигателя от момента его включения до момента, когда ротор достигает номинальной частоты вращения, определяется ускорением ротора во время пуска

(49)

$$t_{\text{пуск}} = \frac{\omega_n}{a_{\text{ср}}}.$$

где  $\omega_n$  — номинальная угловая скорость двигателя, с-1;  $a_{\text{ср}}$  — среднее угловое ускорение во время пуска, с-2.

В свою очередь ускорение зависит от разности вращающего момента двигателя и момента сопротивления на его валу при постоянстве момента инерции:

(50)

$$Ja = M_{вр} - M_c ,$$

где  $M_{вр}$  — вращающий момент двигателя, Н·м;  $M_c$  — статический момент сопротивления на валу двигателя, Н·м;  $J$  — момент инерции всех вращающихся частей, кг·м<sup>2</sup>;  $a$  — угловое ускорение ротора, с<sup>-2</sup>.

Пуск может быть успешно проведен, если в течение всего времени разгона  $M_{вр} > M_c$ .

Из выражения (50) следует также, что при заданной величине момента сопротивления ускорение будет тем больше, чем больше величина вращающего момента двигателя. Соответственно при увеличении вращающего момента двигателя в режиме пуска сократится время его разгона. Таким образом, второе требование, которое должно выполняться во время пуска асинхронного двигателя, заключается в создании достаточно большого вращающего момента в этом режиме.

Необходимо, кроме того, иметь в виду, что в тяжелых условиях пуска при недостаточно большом вращающем моменте разгон двигателя вообще невозможно осуществить. Это произойдет в том случае, если момент сопротивления на валу окажется большим, чем вращающий момент двигателя.

Рассмотрим теперь, каким образом выполняются эти два основных требования, предъявляемых к пусковому режиму асинхронного двигателя. Прежде всего отметим, что характеристики асинхронных двигателей в режиме пуска в большой степени зависят от его конструкции. В двигателях с фазным ротором имеются хорошие возможности для регулирования величины пускового тока и пускового момента введением сопротивлений в цепь ротора двигателя. Однако они являются более дорогими и сложными в эксплуатации. Более дешевые и надежные двигатели с короткозамкнутым ротором не позволяют осуществлять такого регулирования и их пусковые характеристики значительно хуже.

Наиболее часто применяются следующие способы пуска асинхронных двигателей: прямое включение двигателей с короткозамкнутой обмоткой ротора; включение двигателя с понижением напряжения, подаваемого на обмотку статора; пуск в ход с введением сопротивления в фазную обмотку ротора.

*Прямое включение* асинхронного двигателя в сеть является наиболее простым способом пуска двигателя. В то же время в этом случае обмотки статора и ротора двигателя обтекаются большим пусковым током (током короткого замыкания), равным 4—7-кратному значению номинального. Поэтому очень важно, чтобы время пуска двигателя было при этом как можно меньшим.

Из всех способов пуска асинхронных двигателей с короткозамкнутой обмоткой ротора при данном способе пуска создается наибольший вращающий момент. Пусковой вращающий момент двигателя определяется при этом по формуле (48). Поскольку он все же относительно невелик, данный способ пуска применяется для приводов со средними и легкими условиями пуска. Отметим, что в настоящее время все большее распространение получают двигатели

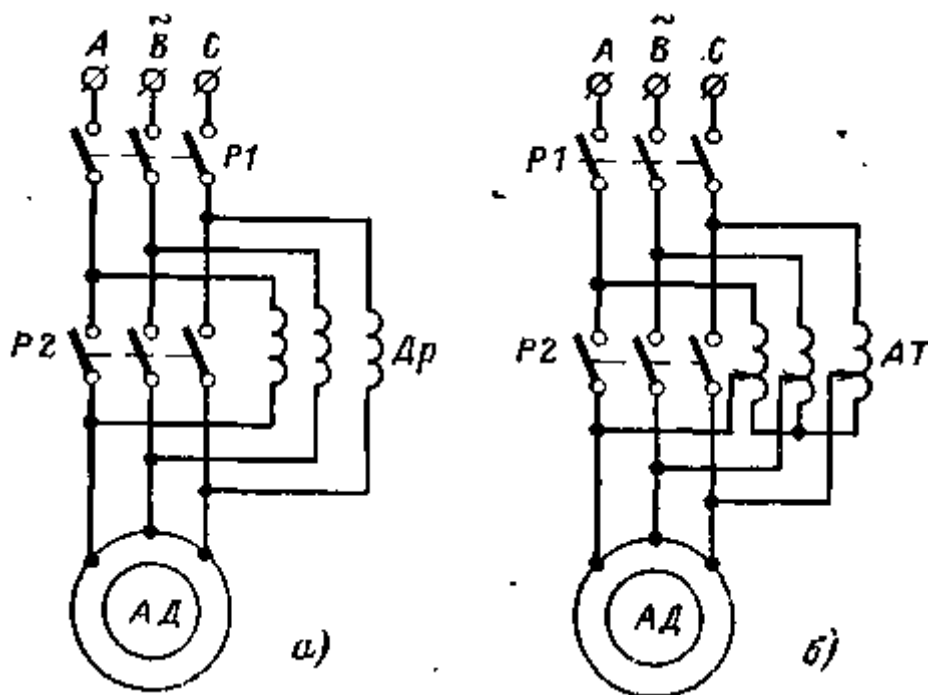


Рис. 22. Схемы пуска асинхронного двигателя.

а — при последовательном включении индуктивного сопротивления  $Др$ ;

б — при включении двигателя через автотрансформатор  $АТ$ .

с глубоким пазом, которые имеют улучшенные пусковые характеристики. Обладая всеми преимуществами двигателей с короткозамкнутым ротором, они развивают больший пусковой момент при меньшем пусковом токе по сравнению с двигателями обычного исполнения. Это позволяет применять такие двигатели для приводов с более тяжелыми условиями пуска, т. е. со значительными статическими моментами при малых частотах вращения ротора. Необходимо также иметь в виду, что большой ток, потребляемый двигателем, проходит не только по его обмоткам, но и по проводам сети и трансформатору. Поэтому в питающей сети создается падение напряжения, которое в случае пуска мощного двигателя может оказаться весьма значительным. В результате напряжение, подводимое к двигателю в этом режиме, сильно понизится и это вызовет дополнительное снижение вращающего момента двигателя. Поэтому прямое включение при пуске мощных Двигателей допустимо при наличии достаточно мощной сети, выдерживающей прохождение больших токов без значительного падения напряжения. В современных мощных системах производится прямое включение на сеть двигателей с номинальной мощностью в несколько сотен киловатт.

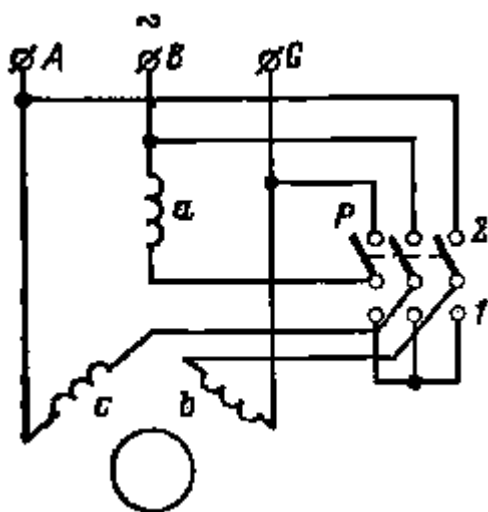


Рис. 23. Схема пуска двигателя с переключением обмоток со звезды на треугольник.

Включение двигателя при пониженном напряжении питающей сети позволяет уменьшить пусковой ток, потребляемый двигателем. Однако в этом случае снижается и вращающий момент, развиваемый двигателем при пуске, причем это уменьшение происходит пропорционально квадрату подводимого к двигателю напряжения. Такой способ применяется для приводов с легкими условиями пуска.

Практически понижение напряжения достигается включением индуктивного сопротивления последовательно с обмоткой статора двигателя (рис. 22,а) или включением двигателя через автотрансформатор (рис. 22,б). При пуске по схеме на рис. 22,а вначале замыкают рубильник  $P1$ , а затем, когда ротор достигает достаточной частоты вращения, замыкают рубильник  $P2$ , включая двигатель на полное напряжение сети. При пуске с помощью автотрансформатора (рис. 22,б) вначале замыкается рубильник  $P1$ , а затем рубильник  $P2$ . Применение автотрансформатора позволяет ограничивать пусковой ток в питающей сети при меньшем снижении напряжения питающего двигателя, чем в случае включения индуктивного сопротивления. Следовательно, при этом в меньшей степени понижается пусковой момент двигателя.

К способам пуска с понижением напряжения можно отнести также пуск с переключением обмоток статора со звезды на треугольник (рис. 23). В режиме пуска переключатель  $P$  находится в положении 1, причем обмотка статора включена по схеме звезды. После того как ротор достигает установившейся частоты вращения, переключатель необходимо перевести в положение 2 и обмотки статора будут включены по схеме треугольника.

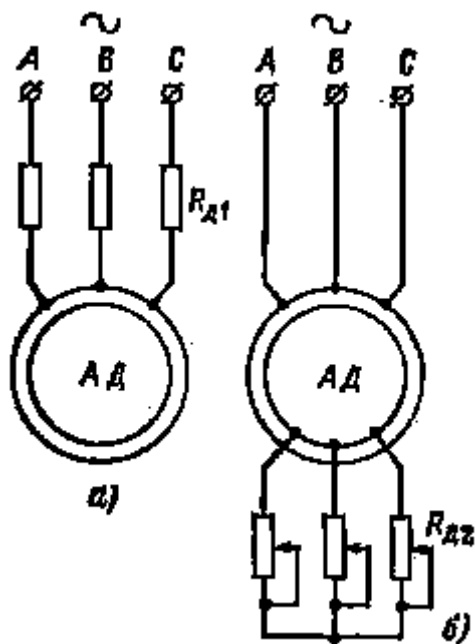


Рис. 24. Схемы асинхронных двигателей с введением сопротивлений-резисторов в цепь

статора (а) и в цепь ротора (б).

При данном способе пуска фактически понижается величина напряжения, подводимого к каждой фазе двигателя, поскольку при одинаковом напряжении в линии напряжение на фазу в схеме звезды в  $\sqrt{3}$  раз меньше, чем в схеме треугольника. Пусковой ток в сети при соединении обмотки статора звездой понижается в 3 раза по сравнению с соединением статора треугольником. Однако в 3 раза понижается также пусковой момент.

Для приводов с наиболее тяжелыми условиями пуска следует использовать двигатели с фазной обмоткой ротора. *Введение сопротивления в цепь ротора* позволяет, с одной стороны, ограничить пусковой ток двигателя, а с другой стороны — повысить пусковой момент. Схема включения сопротивлений (резисторов) в цепь ротора двигателя изображена на рис. 24,б.

Подставляя  $s_{\max} = 1$  в формулу (45), можно найти величину дополнительного сопротивления в цепи ротора, при котором пусковой момент для данной характеристики оказывается равным максимальному моменту,

(51)

$$r'_{\text{д}} = x_1 - r'^2 + x'^2.$$

Последовательно изменяя по мере увеличения частоты вращения двигателя сопротивление в цепи ротора, можно добиться того, чтобы весь процесс пуска проходил при вращающем моменте, близком к максимальному. Это позволяет получить возможно меньшее время пуска двигателя.

## 2. Короткозамкнутые асинхронные двигатели с повышенным пусковым моментом.

Типы двигателей. Стремление повысить пусковой момент короткозамкнутых асинхронных двигателей без увеличения активного сопротивления обмотки ротора (а следовательно, и потерь энергии в нем) привело к появлению специальных конструкций двигателей, называемых двигателями с повышенным пусковым моментом. К ним относятся двигатели с двойной беличьей клеткой и с ротором, имеющим глубокие пазы (глубокопазные двигатели).

Двигатель с двойной беличьей клеткой (рис. 4.32, а). Ротор этого двигателя имеет две короткозамкнутые обмотки. Наружная клетка является пусковой; она выполнена из стержней малого поперечного сечения и поэтому обладает повышенным активным сопротивлением  $R_{2\text{п}}$ . Внутренняя клетка является основной рабочей обмоткой двигателя; она выполнена из стержней сравнительно большого поперечного сечения и обладает малым активным сопротивлением  $R_{2\text{р}}$ .

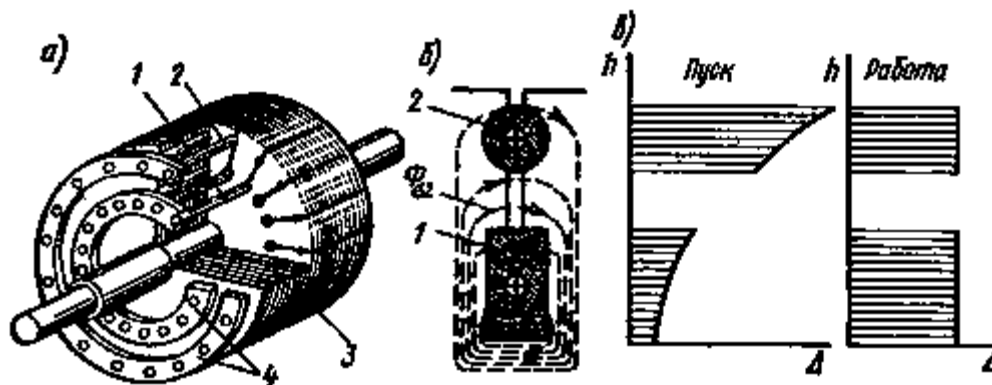


Рис. 4.32. Общий вид (с), разрез паза (б) ротора двигателя с двойной беличьей клеткой и распределение плотности тока  $\Delta$  по высоте  $h$  в клетках при пуске и работе двигателя (в): 1 - рабочая клетка; 2 - пусковая клетка; 3 - сердечник ротора; 4 - короткозамыкающие кольца

Индуктивные сопротивления клеток определяются значениями потоков рассеяния  $\Phi_{\sigma 2}$ , сцепленных с их стержнями. Так как пусковая клетка расположена близко к поверхности ротора, то сцепленные с ее стержнями потоки рассеяния  $\Phi_{\sigma 2}$  (рис. 4.32,б) сравнительно невелики, и она обладает малым реактивным сопротивлением  $X_{2п}$ . Рабочая клетка, наоборот, удалена от поверхности ротора, поэтому она имеет большое реактивное сопротивление  $X_{2р}$ . Увеличение реактивного сопротивления рабочей клетки обеспечивается благодаря соответствующему выбору ширины и высоты паза ротора, а также выбору щели между стержнями обеих клеток. Для повышения активного сопротивления пусковой клетки стержни обычно изготавливают из марганцовистой латуни или бронзы. Стержни рабочей клетки выполняют из меди. Торцовые короткозамыкающие кольца делают медными. В некоторых случаях обе обмотки объединяют и выполняют литыми из алюминия. В электрическом отношении обе клетки включены параллельно, вследствие чего ток ротора распределяется между ними обратно пропорционально их полным сопротивлениям  $z_{2п}$  и  $z_{2р}$ :

(4.60)

$$I_{2п} / I_{2р} = Z_{2р} / Z_{2п} = \sqrt{R_{22р}^2 + X_{22р}^2} / \sqrt{R_{22п}^2 + X_{22п}^2}.$$

В начальный момент пуска, когда  $s = 1$  и частота тока в роторе  $f_2$  максимальна, индуктивные сопротивления клеток во много раз больше их активных сопротивлений, поэтому

(4.61а)

$$I_{2п} / I_{2р} \approx X_{2р} / X_{2п},$$



т. е. ток ротора проходит в основном через пусковую клетку (рис. 4.32, в), у которой  $X_{2п} < X_{2р}$ . В то же время эта клетка обладает сравнительно большим активным сопротивлением, а следовательно, создает повышенный пусковой момент.

По мере разгона ротора уменьшается скольжение  $s$  и частота  $f_2$ , а поэтому изменяются индуктивные сопротивления  $X_{2р}$  и  $X_{2п}$  и распределение тока между клетками. Из (4.60) следует, что ток начинает постепенно переходить из пусковой клетки в рабочую. По окончании процесса разгона величина  $s$  становится малой и роль реактивных сопротивлений в токораспределении оказывается незначительной. В этом случае распределение токов определяется отношением

$$(4.61б)$$

$$I_{2п} / I_{2р} \approx R_{2р} / R_{2п},$$

т. е. ток начинает проходить в основном по рабочей клетке, где  $R_{2р} < R_{2п}$ . Таким образом, в рассматриваемом двигателе ток в начальный момент пуска вытесняется в наружную

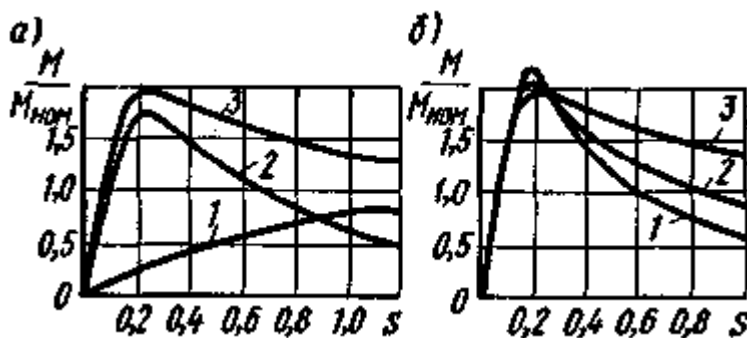


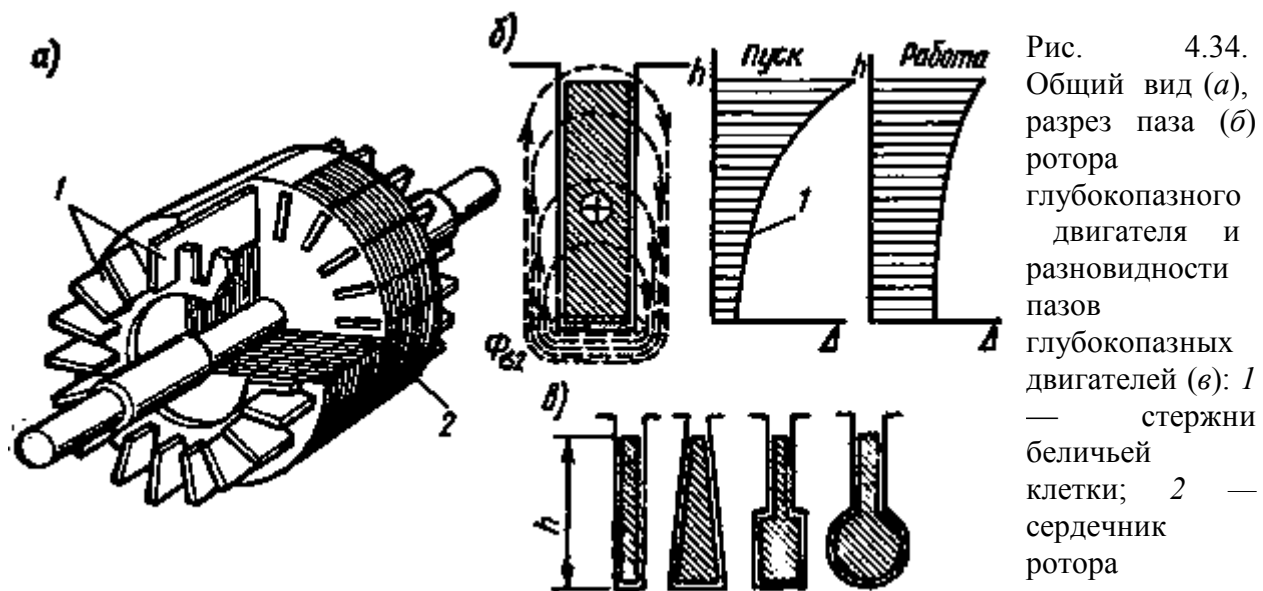
Рис. 4.33. Зависимости  $M=f(s)$  асинхронных двигателей с различными конструктивными исполнениями ротора

пусковую клетку, создающую большой пусковой момент, а по окончании процесса пуска проходит по рабочей клетке с малым активным сопротивлением, вследствие чего двигатель работает с высоким КПД. Поэтому двигатели с повышенным пусковым моментом часто называют двигателями с вытеснением тока.

Зависимость  $M = f(s)$  для двигателей с двойной беличьей клеткой можно построить, рассматривая действие пусковой и рабочей обмоток отдельно. Поскольку пусковая обмотка имеет повышенное сопротивление, максимум образуемого ею момента смещен в область больших скольжений (рис. 4.33, а, кривая 1). Характеристика  $M = f(s)$ , создаваемая рабочей обмоткой (кривая 2), имеет такую же форму, как и характеристика короткозамкнутого двигателя нормального исполнения; у нее максимум момента соответствует скольжению  $s_{кр} = 0,1 \div 0,2$ . Результирующую характеристику двигателя (кривая 3) можно получить путем суммирования ординат кривых 1 и 2. У двигателя с двойной беличьей клеткой пусковой момент значительно больше, чем у короткозамкнутого двигателя нормального исполнения. Кратность пускового момента этого двигателя  $M_{п} / M_{ном} = 1,3 \div 1,7$ , а кратность пускового тока  $I_{п} / I_{ном} = 4 \div 6$ .

Глубокопазный двигатель. Принцип действия этого двигателя основан также на явлении вытеснения тока. Беличья клетка выполнена из узких медных или алюминиевых стержней (рис. 4.34, а), заложенных в глубокие пазы ротора, высота которых в 6—12 раз больше ширины. Такие стержни можно рассматривать как проводники, разделенные на большое

число слоев. Из рис. 4.34,б видно, что «нижние» слои проводников сцеплены с большей частью потока рассеяния  $\Phi_{\sigma 2}$ , чем «верхние», и имеют соответственно большую индуктивность. В начальный момент пуска при  $s = 1$  частота изменения тока в роторе большая и распределение тока по параллельным слоям определяется в основном их индуктивным сопротивлением. Поэтому при пуске происходит вытеснение тока в



«верхние» слои (плотность тока  $\Delta$  по высоте проводника распределяется согласно кривой 1, рис. 4.34,б), что равносильно увеличению активного сопротивления стержня. В результате происходит повышение пускового момента двигателя. При  $s \approx s_{ном}$  частота тока в роторе мала (например, при  $f = 50$  Гц и  $s \approx 0,02$ , частота  $f_2 \approx 1$  Гц) и соответственно меньше его индуктивное сопротивление. Вытеснения тока в этом случае не происходит; распределение его происходит приблизительно равномерно по высоте стержня (рис. 4.34,б, кривая 2). При этом резко уменьшается активное сопротивление ротора и потери мощности  $\Delta P_{эл2}$ ; одновременно увеличивается поток рассеяния  $\Phi_{\sigma 2}$ , а следовательно, и сопротивление  $X'2$ .

Изменение параметров  $R'2$  и  $X'2$  глубокопазного двигателя в зависимости от скольжения приводит к тому, что характеристика  $M = f(s)$  (см. рис. 4.33,б, кривая 2) близка к соответствующей характеристике двигателя с двойной беличьей клеткой (кривая 3). Здесь для сравнения показана характеристика  $M = f(s)$  для двигателя с короткозамкнутым ротором нормального исполнения (кривая 1). Существуют разновидности глубокопазных двигателей с трапецидальной, двухступенчатой и колбообразной формой стержней (рис. 4.34, в).

Магнитный поток рассеяния ротора двигателя с повышенным пусковым моментом по сравнению с магнитным потоком рассеяния ротора двигателя нормального исполнения увеличен, а поэтому он имеет несколько уменьшенный  $\cos \phi_1$  при номинальном режиме и обладает пониженной перегрузочной способностью  $k_m$ .

Явление вытеснения тока при пуске и связанное с этим увеличение активного и уменьшение индуктивного сопротивлений встречается (в меньшей степени) и у двигателей с короткозамкнутым ротором нормального исполнения. Чтобы усилить эффект вытеснения тока в короткозамкнутых двигателях мощностью до 100 кВт, пазам ротора и стержням придают специальную, сильно вытянутую в радиальном направлении форму

(см. рис. 4.4, з). В микродвигателях размеры пазов ротора обычно настолько малы, что использование эффекта вытеснения тока оказывается невозможным.

### 3. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей.

Регулирование частоты вращения двигателей определяется в соответствии с требованиями технологических процессов и тех производственных механизмов, в которых они используются. Оно характеризуется следующими основными показателями:

*Диапазон регулирования  $D$*  (предел изменения частоты вращения). Под этой величиной понимается отношение максимальной частоты вращения двигателя  $n_{\text{макс}}$  к его минимальной частоте  $n_{\text{мин}}$ :

(52)

$$D = n_{\text{макс}} / n_{\text{мин}}.$$

*Плавность регулирования*, которая характеризуется минимальным скачком частоты вращения двигателя при переходе с одной механической характеристики на другую.

*Направление возможного изменения частоты вращения двигателя (зона регулирования)*. При номинальных условиях работы (напряжении и частоте питающей сети) двигатель имеет естественную механическую характеристику. При регулировании частоты вращения соответствующие им характеристики будут отличаться от естественной. Эти характеристики носят название искусственных. Таким образом, асинхронный двигатель помимо естественной может иметь множество искусственных (регулируемых) характеристик. С помощью одних методов регулирования удастся получить искусственные характеристики, располагающиеся только ниже естественной. Другие методы обеспечивают регулирование частоты вращения выше и ниже естественной характеристики.

*Экономичность регулирования* определяется по дополнительным капитальным затратам, необходимым при создании регулировочных устройств, а также по потерям электроэнергии при регулировании.

Следует отметить, что в ряде случаев, например, для механизмов, работающих сравнительно малое время на искусственных характеристиках, потери электроэнергии даже при неэкономичных способах регулирования будут невелики (работа на низких доводочных скоростях лифтов, кранов и др.). При этом более рационально применение простых и дешевых способов регулирования частоты вращения двигателей, даже и неэкономичных с точки зрения потребления энергии.

*Допустимая нагрузка* двигателя при работе его на регулировочных характеристиках ограничивается величинами токов в статорной и роторных цепях. Эта нагрузка определяется допустимым нагревом двигателя и во многом определяется механическими характеристиками производственных механизмов, моментом сопротивления на валу, условиями нормального пуска двигателя и др.

Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей может производиться способом воздействия на него со стороны статора или со стороны ротора.

При воздействии со стороны статора существуют следующие основные способы регулирования частоты вращения:

введением и регулировкой сопротивления (резисторов) в цепи статора (реостатное регулирование);

изменением числа пар полюсов;

изменением частоты питающего напряжения.

При воздействии со стороны ротора регулирование частоты вращения производится: введением и регулировкой активного сопротивления (резисторов) в цепи ротора (реостатное регулирование); введением в цепь ротора добавочной э. д. с. с частотой, равной основной э. д. с. ротора.

Из указанных практическое применение нашли способы регулировки: реостатный, изменением полусности обмотки статора и изменением частоты в питающей сети.

Реостатное регулирование частоты вращения асинхронных двигателей является одним из наиболее простых способов регулирования и может осуществляться введением добавочных активных сопротивлений (резисторов) в цепь статора  $R_{д1}$  (рис. 24.а) или ротора  $R_{д2}$  (рис. 24,б).

Однако первый способ не нашел широкого практического распространения из-за ряда существенных недостатков— снижения максимального (критического) момента и перегрузочной способности при увеличении сопротивления, малого диапазона регулирования частоты вращения и др. Данный способ регулирования применяется для ограничения пускового момента асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, используемых, например, в приводах металлорежущих станков. Это необходимо для предотвращения ударов в механических передачах станков.

Для регулирования в широких пределах частоты вращения асинхронных двигателей с контактными кольцами используется введение дополнительных активных сопротивлений (резисторов) в роторную цепь (рис. 24,б). Эти резисторы  $R_{д2}$  подсоединяются к выводам щеток контактных колец. При этом ток в роторной цепи снижается по мере увеличения сопротивления, что вызывает уменьшение электромагнитного момента. При снижении момента до величины, меньшей чем статический момент сопротивления на валу,  $M < M_c$  происходит уменьшение частоты вращения двигателя меньше первоначальной  $n < n_E$ , т. е. увеличение скольжения  $s$ . В свою очередь это вызовет увеличение э. д. с. ротора  $E_2$  [см. уравнение (13)], а значит, возрастут ток ротора  $I_2$  [см. формулу (25)] и электромагнитный момент двигателя  $M$  [см. формулу (43)]. Когда момент возрастет до  $M = M_c$ , изменение частоты вращения закончится и асинхронный двигатель станет работать в установившемся режиме с новой частотой  $n_1 < n_E$ .

При этом важно заметить, то изменение в широких пределах частоты вращения двигателя при данном способе регулирования не повлечет за собой изменения максимального (критического) момента  $M_{\max}$  (см. рис. 21). Таким образом, перегрузочная способность двигателя при регулировании не снижается.

Если двигатель работает с некоторым приводимым механизмом на валу с статическим моментом сопротивления  $M_c$  (см. рис. 21), то на естественной характеристике установившемся режиму его работы будет соответствовать точка  $E$ . При введении

добавочных сопротивлений—резисторов  $R'_{д2}$ ,  $R''_{д2}$ ,  $R'''_{д2}$ — в цепь ротора произойдет соответствующий переход двигателя в новые режимы работы (точки 1, 2, 3) с меньшими величинами частот вращения  $n_E > n_1 > n_2 > n_3$ . Характеристики двигателя по мере увеличения сопротивления резисторов в цепи ротора  $R_{д2}$  становятся более мягкими. Наиболее жесткой характеристикой в данном случае будет естественная характеристика.

Работа двигателя на естественной характеристике в данном случае будет наиболее стабильной и устойчивой. Это означает, что при изменении момента сопротивления  $M_c$  в процессе работы производственного механизма отклонения частоты вращения двигателя будут минимальными.

Технические показатели данного способа регулирования следующие.

Диапазон регулирования сравнительно небольшой — порядка 2:1 и ограничивается вероятностью неустойчивости работы двигателя при больших значениях сопротивлений резисторов  $R_{д2}$ .

Плавность регулирования при реостатном регулировании небольшая и определяется числом ступеней регулирования. Переключение ступеней осуществляется, как правило, с помощью магнитных контроллеров, контакторов и реле.

Изменение частоты вращения при реостатном регулировании возможно лишь вниз от основной.

Данный способ регулирования не экономичен, однако прост и удобен в эксплуатации.

Регулирование частоты вращения изменением числа полюсов в обмотке статора обеспечивается благодаря изменению частоты вращения магнитного поля статора.

Как следует из формулы (7), при неизменной частоте в питающей сети частота вращения магнитного поля и определяемая ею частота вращения ротора изменяются обратно пропорционально числу полюсов. Так как число полюсов, фиксированное ступенями, может быть равно 2, 4, 6, 8, 10 и т. д., что при частоте в питающей сети, равной 60 Гц, соответствует синхронной частоте вращения 3000, 1500, 1000, 750, 600 об/мин и т. д., то указанным способом может быть обеспечено только *ступенчатое* регулирование.

Изменение числа пар полюсов обычно достигается следующими способами:

1. На статоре двигателя укладываются две не связанные между собой обмотки, имеющие разное число пар полюсов, например  $p_1$  и  $p_2$ . При подключении одной из обмоток к сети переменного тока, например, с числом полюсов  $p_2$  двигатель будет иметь синхронную частоту вращения, соответствующую данному числу полюсов (см. рис. 25, а):

$$n_2 = \frac{60f}{p_2}.$$

Другая обмотка при этом обесточена. При необходимости получения другой частоты вращения  $n_1$  обмотка с числом полюсов  $p_2$  отключается и включается с числом полюсов  $p_1$ . Такие асинхронные двигатели получили название *двухобмоточных*.

2. На статоре укладывается одна обмотка, допускающая переключение на разное число полюсов. Наиболее широко распространены две схемы переключения статорной обмотки

двухскоростных двигателей: с треугольника на двойную звезду  $\Delta/YY$  и со звезды на двойную звезду  $Y/YY$  (звезду с двумя параллельными ветвями).

Схемы соединения обмоток  $\Delta/YY$  применяются для получения примерно одинакового вращающего момента при обеих частотах вращения (рис. 25,а). Такие схемы применяются, например, у асинхронных двигателей привода компрессоров, металлорежущих станков и др. Схемы соединения обмоток  $Y/YY$  используются для приводов вентиляторов (рис. 25,б).

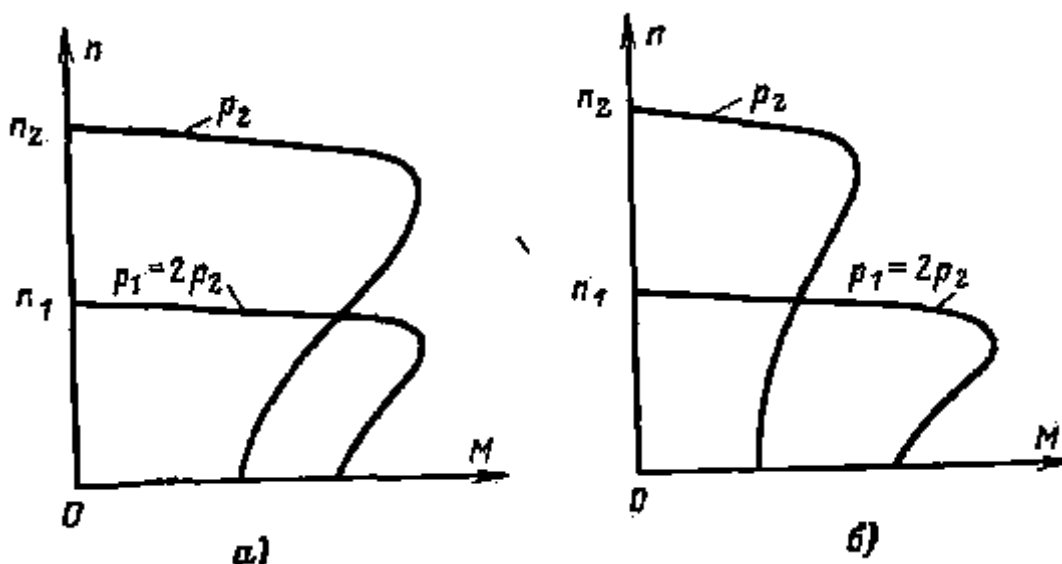


Рис. 25. Механические характеристики при регулировании частоты вращения асинхронных двигателей изменением числа пар полюсов при переключении статорной обмотки.

а — треугольник (число пар полюсов  $2p = p_1$ ) — двойная звезда ( $2p = p_2$ ); б — звезда ( $2p = p_1$ ) — двойная звезда ( $2p = p_2$ ).

Кроме рассмотренных вариантов двухскоростных асинхронных двигателей нашли применение трехскоростные и четырехскоростные двигатели. В трехскоростных двигателях размещаются одна переключаемая и одна непереключаемая обмотки, а в четырехскоростных две переключаемые обмотки, позволяющие получить четыре синхронные частоты вращения, например 3000/1500/1000/500 об/мин.

Двигатели с переключением числа пар полюсов, как правило, имеют короткозамкнутый ротор с обмоткой типа беличьей клетки. Такой ротор обеспечивает возможность работы без дополнительных пересоединений в его цепи. В случае фазного ротора в многоскоростных двигателях потребовалось бы производить переключения одновременно на статоре и роторе, что усложнило бы конструкцию ротора и эксплуатацию таких машин.

Электродвигатели с короткозамкнутым ротором могут иметь ряд специфических ненормальностей из-за неправильного соотношения числа пазов статора  $Z_1$ , ротора  $Z_2$  и числа полюсов  $2p$ .

Ненормальности заключаются в том, что двигатель может «прилипнуть», т. е. не приходить во вращение при подключении к сети, или «застрять», т. е., начавши вращаться, останавливается на некоторой скорости, или при вращении сильно гудит.

Во избежание указанных явлений должны быть выдержаны следующие соотношения:

$$\begin{array}{lcl}
 Z_2 \neq Z_1, & & \\
 Z_2 \neq 0,5Z_1, & \left\{ \begin{array}{l} Z_2 = Z_1 + 2p, \\ Z_2 = 0,5Z_1 \pm p, \\ Z_2 = 2Z_1 + 2p, \\ Z_2 = 6pk \pm 1, \\ Z_2 = 6pk \pm (2p \pm 1), \end{array} \right. & \\
 Z_2 \neq 2Z_1, & & \\
 Z_2 \neq 6pk, & & \\
 Z_2 \neq 6pk + 2p, & & \\
 Z_2 \neq Z_1 \pm p, & & 
 \end{array}$$

где  $k$  — любое целое число от одного до четырех. Здесь же следует заметить, что изменение числа полюсов может иметь место не только при регулировании частоты вращения способом изменения его полюсности, но и при ремонте, связанном с изменением номинальной частоты вращения.

К положительным показателям многоскоростных асинхронных двигателей следует отнести экономичность регулирования частоты вращения ротора. Недостатком данного способа регулирования является указанная выше невозможность плавного изменения частоты вращения.

Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей изменением частоты в питающей сети является наиболее экономичным способом регулирования и позволяет получить хорошие механические характеристики электропривода (рис. 26). При изменении частоты питающей сети обеспечивается изменение частоты вращения магнитного поля асинхронного двигателя, что также следует из формулы (7).

Источник питания двигателя должен осуществлять преобразование напряжения стандартной частоты сети  $f_H = 50$  Гц в напряжение с требуемой частотой. Одновременно с изменением частоты должна регулироваться по определенному закону и величина подводимого к двигателю напряжения  $U_{рег}$ , чтобы обеспечить высокую жесткость механической характеристики.

При регулировании частоты вращения асинхронных двигателей за счет изменения частоты в питающей сети возможны обеспечения различных режимов работы: с постоянным вращающим моментом  $M = \text{const}$ ;

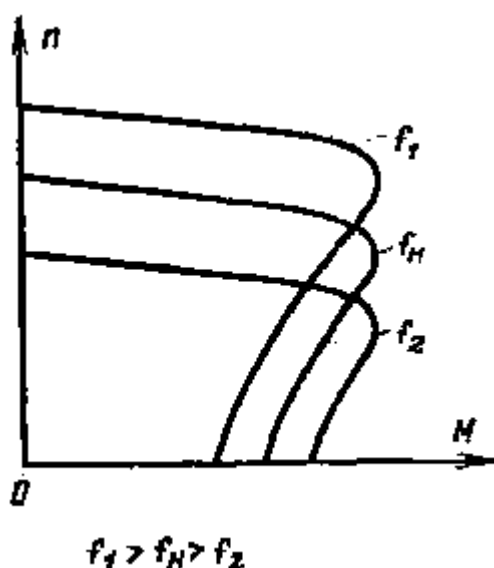


Рис. 26. Механические характеристики при регулировании частоты вращения асинхронных двигателей с помощью изменения частоты питающего напряжения (с учетом влияния активного сопротивления статора).

с постоянной мощностью на валу  $P = \text{const}$ ;

с моментом, пропорциональным квадрату частоты,  
 $M \propto f^2$ .

Зависимости между регулируемым напряжением и частотой с учетом влияния активного сопротивления статора, изменения жесткости механических характеристик, насыщения стали, ухудшения теплоотдачи на низких частотах вращения ротора двигателя имеют довольно сложный характер.

В качестве источника питания могут применяться электромашинные вращающиеся преобразователи, использующие электрические машины, или статические преобразователи, постоянные с использованием полупроводниковых и магнитных приборов (более подробно см. [Л. 2,4]). Положительным свойством частотного регулирования является возможность плавного регулирования в широком диапазоне, в обе стороны от естественной характеристики (в том числе возможно вращение двигателя с частотой, большей номинальной). При регулировании обеспечиваются жесткость характеристик и высокая перегрузочная способность.

Недостатками данного способа регулирования можно считать большую сложность преобразовательного устройства, сравнительно высокую стоимость оборудования и др.

Однако в ряде случаев в приводах металлообрабатывающих и деревообрабатывающих станков, электроверетен, вентиляторов аэродинамических труб частотное регулирование является единственно возможным.

Кроме описанных существуют другие способы регулирования частоты вращения двигателей: каскадные схемы включения, несимметричное включение статорных и роторных обмоток, изменение питающего напряжения двигателя с помощью магнитных усилителей и тиристоров и другие, которые имеют меньшее распространение по сравнению с описанными выше.



## **2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

### **2.1 Лабораторная работа №1 (2 часа).**

**Тема: «Генератор постоянного тока»**

#### **2.1.1 Цель работы:**

Ознакомиться с устройством и принципом действия генератора постоянного тока. Освоить в режиме самовозбуждения практические методы проведения опытов холостого хода и под нагрузкой. Выяснить влияние схемы соединения обмоток возбуждения на основные характеристики ГПТ.

#### **2.1.2 Задачи работы:**

1. Снять и построить характеристику холостого хода ( $U_0=f(I_v)$  при  $n=\text{const}$ )

Примечание: (характеристика одна и та же для всех способов возбуждения, но снимать её проще при независимом возбуждении генератора).

2. Снять и построить регулировочную характеристику для всех способов возбуждения ( $I_v=f(I_n)$  при  $U=\text{Const}=50\text{В}$ ,  $n=\text{const}$ ).

3. Снять и построить внешнюю характеристику для всех способов возбуждения ( $U=f(I_n)$  при  $n=\text{const}$ ,  $I_v=\text{Const}$  для независимого возбуждения и  $R_v=\text{const}=0$  для самовозбуждения)

#### **2.1.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:**

Универсальный фронтальный стенд в лаборатории электрических машин и электрооборудования №208

#### **2.1.4 Описание (ход) работы:**

1. Знакомимся с основными техническими данными используемого в схеме оборудования и его размещением на стенде

2. Собираем схему экспериментальной установки (рис. 1)

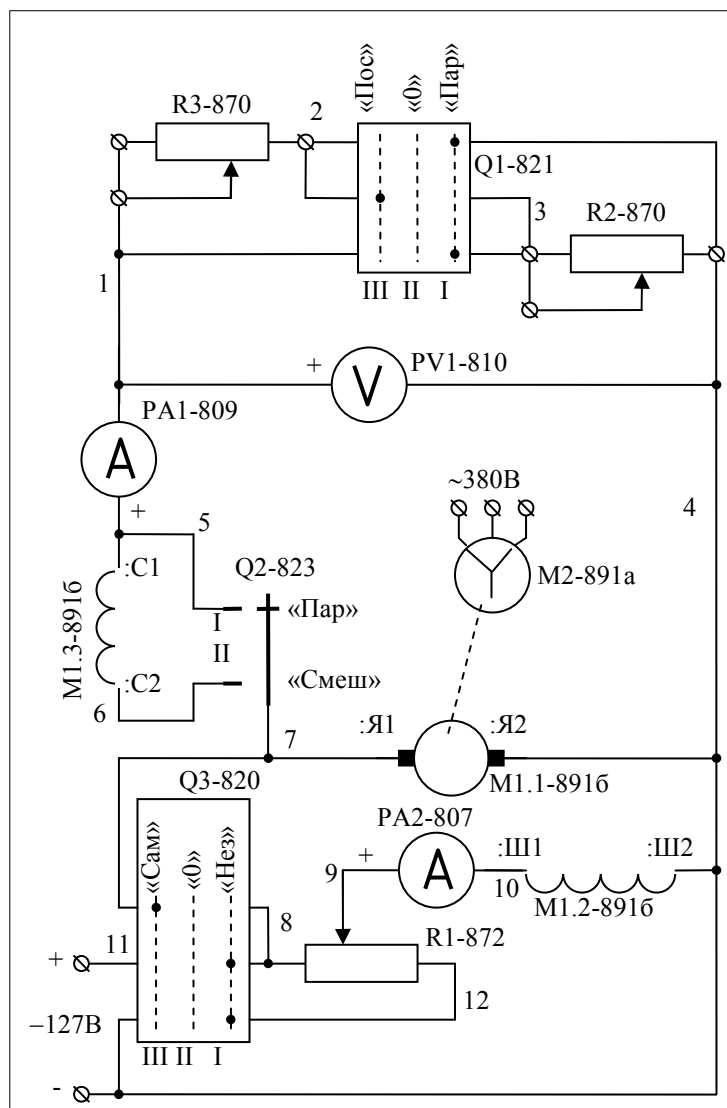


Рис. 1. Схема испытания генератора постоянного тока при параллельном, смешанном и независимом возбуждении

### 3. Снимаем характеристику холостого хода

Зависимость напряжения от тока возбуждения при отсутствии нагрузки ( $R_H = \infty$ ) и постоянной, равной номинальной, частоте вращения ( $\omega = \omega_n = \text{Const}$ ).

### 4. Заготавливаем таблицу записи наблюдений

Таблица 1

$R_H$	$I_B$ , A (807)	$I_H$ , A (809)	$U$ , B (810)
$\infty$	0	0	4,5
$\infty$	0,05	0	13
$\infty$	0,1	0	21
$\infty$	0,15	0	27
$\infty$	0,2	0	35
$\infty$	0,3	0	48
$\infty$	0,4	0	56
$\infty$	0,5	0	64,25
$\infty$	0,6	0	69,5

$\infty$	0,7	0	72,5
$\infty$	0,8	0	75
$\infty$	0,7	0	73
$\infty$	0,6	0	69
$\infty$	0,5	0	65
$\infty$	0,4	0	59
$\infty$	0,3	0	50,5
$\infty$	0,2	0	36,25
$\infty$	0,15	0	29,5
$\infty$	0,1	0	23
$\infty$	0,05	0	14,25
$\infty$	0	0	4

5. Устанавливаем аппараты в исходное состояние:

- переключатель Q1 в положение «0»(821, II)
- переключатель Q2 - в положение «Пар»(823, I)
- переключатель Q3 – в положение «Нез» (820, I)

6. Выполняем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики:

- Запускаем установку;
- Устанавливаем заданную величину тока возбуждения, предусмотренного первой и далее последующими строками таблицы;
- Снимаем и записываем в таблицу на доске показания электроизмерительных приборов.

7. Снимаем внешнюю характеристику при независимом возбуждении

Зависимость напряжения от тока нагрузки при постоянных частоте вращения и токе возбуждения

8. Заготавливаем таблицу записи наблюдений

Таблица 2

Q1	R <sub>H</sub>	I <sub>B</sub> , А (807)	I <sub>H</sub> , А (809)	U, В (810)
0	$\infty$	0,8	0	75
Пос	2RP	0,8	2,4	71
Пос	1,5RP	0,8	3	70
Пос	RP	0,8	4,4	68
Пар	0,5RP	0,8	7,8	60
Пар	0,375RP	0,8	8,6	57,25
Пар	0,25RP	0,56	10	45

9. Устанавливаем аппараты в исходное состояние:

- переключатель Q1 в положение «0» (821, II)
- переключатель Q2 - в положение «Пар»(823, I)
- переключатель Q3 – в положение «Нез» (820, I)

10. Выполняем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики:

- Запускаем установку;
- Реостатом R1 устанавливаем ток возбуждения, при котором на выходе генератора номинальное напряжение ( $I=0,8A$ ,  $U=75V$ );

- Устанавливаем заданное вторым столбцом сопротивление нагрузки (ток возбуждения должен поддерживаться таким же, как и в первом опыте при сопротивлении нагрузки, равном бесконечности);
- Снимаем и записываем в таблицу на доске показания электроизмерительных приборов.

11. Снимаем внешнюю характеристику при параллельном возбуждении

Зависимость напряжения от тока возбуждения при постоянном, равном нулю, сопротивлении в цепи обмотки возбуждения и постоянной частоте вращения вала генератора.

12. Заготавливаем таблицу записи наблюдений

Таблица 3

Q1	R <sub>н</sub>	I <sub>в</sub> , А (807)	I <sub>н</sub> , А (809)	U, В (810)
0	$\infty$	0,56	0	66
Пос	2RP	0,51	2	60
Пос	1,5RP	0,48	2,6	58
Пос	RP	0,46	3,6	54,5
Пар	0,5RP	0,35	5,4	41
Пар	0,375RP	0,31	5,9	37,5
Пар	0,25RP	0,25	6,6	29,5
Пар	0,125RP	0,1	5,9	14
Пар	0	0	2,5	0

13. Устанавливаем аппараты в исходное состояние:

- переключатель Q1 в положение «0»(821, II)
- переключатель Q2 - в положение «Пар»(823, I)
- переключатель Q3 – в положение «Сам» (820, III)

14. Выполняем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики:

- Запускаем установку;
- Реостат R1 полностью выводим (сопротивление реостата равно нулю);
- Устанавливаем заданное вторым столбцом сопротивление нагрузки;
- Снимаем и записываем в таблицу на доске показания электроизмерительных приборов.

15. Снимаем внешнюю характеристику при смешанном возбуждении

16. Заготавливаем таблицу записи наблюдений

Таблица 4

R <sub>н</sub>	I <sub>в</sub> , А (807)	I <sub>н</sub> , А (809)	U, В (810)
$\infty$	0,55	0	66
2RP	0,54	2	62
1,5RP	0,53	2,6	60
RP	0,51	3,8	59,5
0,5RP	0,5	7	59,5
0,375RP	0,47	8,2	51
025RP	0,42	9,9	45

17. Устанавливаем аппараты в исходное состояние:

- переключатель Q1 в положение «0»(821, II)
- переключатель Q2 - в положение «Смеш»(823, II)
- переключатель Q3 – в положение «Сам» (820, III)

18. Выполняем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики:

- Запускаем установку;
- Реостат R1 полностью выводим (сопротивление реостата равно нулю);
- Устанавливаем заданное вторым столбцом сопротивление нагрузки;
- Снимаем и записываем в таблицу на доске показания электроизмерительных приборов.

19. Снимаем регулировочную характеристику при независимом возбуждении

Зависимость тока возбуждения, необходимого для поддержания номинального напряжения на выходе генератора, от тока нагрузки при номинальной частоте вращения.

Примечание: регулировочная характеристика при параллельном возбуждении будет точно такой же.

20. Заготавливаем таблицу записи наблюдений

Таблица 5

R <sub>H</sub>	I <sub>B</sub> , А (807)	I <sub>H</sub> , А (809)	U, В (810)
∞	0,37	0	75
2RP	0,4	1,9	75
1,5RP	0,41	2,4	75
RP	0,46	3,6	75
0,5RP	0,6	7,2	75
0,375RP	0,7	8,8	75
025RP	0,55	10	75

21. Устанавливаем аппараты в исходное состояние:

- переключатель Q1 в положение «0» (821 II)
- переключатель Q2 - в положение «Пар»(823 I)
- переключатель Q3 – в положение «Нез» (820 I)

22. Выполняем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики:

- Запускаем установку;
- Потенциометром R1 устанавливаем ток возбуждения, при котором напряжение на выходе генератора равно номинальному;
- Устанавливаем заданное вторым столбцом сопротивление нагрузки;
- Снимаем и записываем в таблицу на доске показания электроизмерительных приборов.

23. Снимаем регулировочную характеристику при смешанном возбуждении

24. Заготавливаем таблицу записи наблюдений

Таблица 6

R <sub>H</sub>	I <sub>B</sub> , А (807)	I <sub>H</sub> , А (809)	U, В (810)
∞	0,38	0	75
2RP	0,4	1,9	75

1,5RP	0,4	2,5	75
RP	0,43	3,7	75
0,5RP	0,5	7,2	75
0,375RP	0,54	8,5	75
025RP	0,42	10	75

25. Устанавливаем аппараты в исходное состояние:

- переключатель Q1 в положение «0»(821, II)
- переключатель Q2 - в положение «Смеш»(823, II)
- переключатель Q3 – в положение «Нез» (820, I)

26. Выполняем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики:

- Запускаем установку;
- Потенциометром R1 устанавливаем ток возбуждения, при котором напряжение на выходе генератора равно номинальному;
- Устанавливаем заданное вторым столбцом сопротивление нагрузки;
- Снимаем и записываем в таблицу на доске показания электроизмерительных приборов.

27. Строим графики экспериментальных зависимостей, предусмотренных в заданиях

28. Осуществляем оценку полученных результатов

29. Сделать и записать заключение, насколько экспериментальные характеристики подтверждают теоретические предположения.

## **2.2 Лабораторная работа №2 (2 часа).**

**Тема: «Двигатель постоянного тока»**

### **2.2.1 Цель работы:**

Ознакомиться с конструкцией и принципом действия двигателя с параллельным возбуждением, научиться пускать двигатель и изменять направление его вращения, оценить влияние нагрузки на характеристики двигателя, изучить способы регулирования частоты вращения.

### **2.2.2 Задачи работы:**

1. Снять и построить рабочие характеристики  $I, M, \omega, \eta, P_1 = f(P_2)$  при  $I_b = \text{const}$ ;  $U = \text{const}$
2. Снять и построить регулировочную характеристику  $I_b = f(M)$  при  $U = \text{const}$  и  $\omega = \text{const}$ .

### **2.2.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:**

Универсальный фронтальный стенд в лаборатории электрических машин и электрооборудования №208

### **2.2.4 Описание (ход) работы:**

1. Знакомимся с основными техническими данными используемого в схеме оборудования и его размещением на стенде

2. Собираем схему экспериментальной установки (рис. 1).

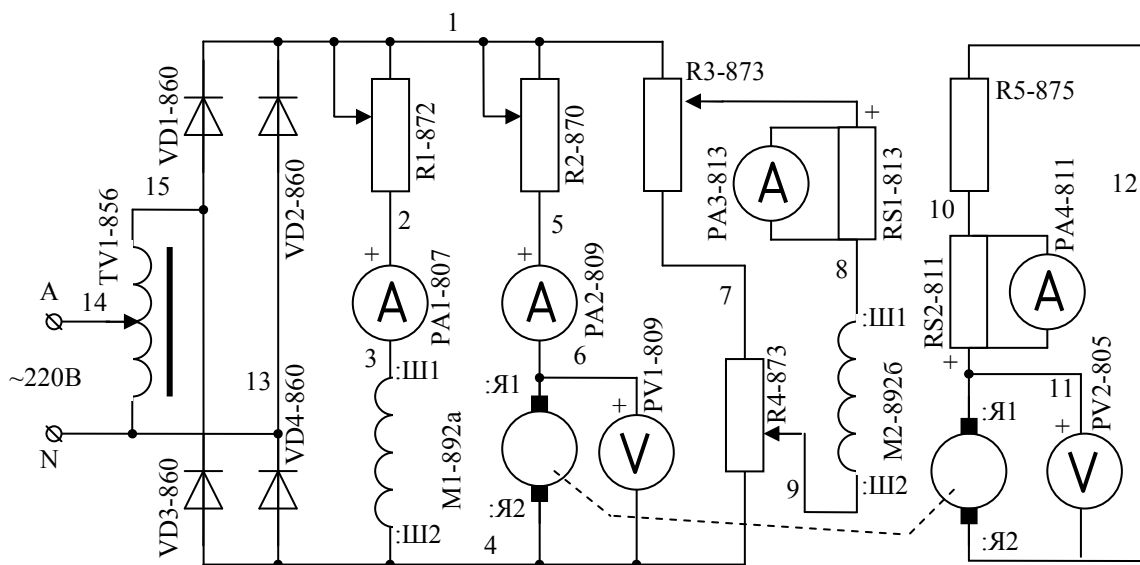


Рис. 1. Схема испытания электродвигателя.

### 3. Снимаем рабочие характеристики

#### 4. Заготовливаем таблицу записи наблюдений

Таблица 1

[illegible]

5. Выполняем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики:

- Устанавливаем R1 на нуль (движок до отказа вниз), пусковой реостат R2 на максимум (движок до отказа вверх), движки реостатов R3 и R4 сводим так, чтобы сопротивление между ними было равно нулю; движок автотрансформатора TV1 поворачиваем по часовой стрелке до упора.

— Подаём напряжение и постепенно по мере разгона М1 выводим пусковой реостат на нуль;

- Движком автотрансформатора осторожно устанавливаем и поддерживаем неизменным напряжение на якоре электродвигателя равное 220 вольт.
- Устанавливаем заданные в таблице для данной точки независимые величины
- Снимаем и записываем в таблицу на доске показания электроизмерительных приборов.
- Поддерживаем неизменным на протяжении всех опытов напряжение на якоре ( $U_2$ ).

6. Снимаем регулировочную характеристику

7. Заготавливаем таблицу записи

Таблица 2

Опытные данные									
$U_{яд}(U_1)$ , В	220	220	220	220	220	220	220	220	220
$I_{вг}(I_3)$ , А	0	0,16	0,4	0,64	0,88	1,36	1,68	2,0	2,32
$I_{вд}(I_1)$ , А									
$n$ , об/мин	1700	1700	1700	1700	1700	1700	1700	1700	1700
$I_{яд}(I_2)$ , А									
$U_{яг}(U_2)$ , В									
$I_{яг}(I_4)$ , А									
РАСЧЕТНЫЕ ДАННЫЕ									
$\omega$ , 1/с									
$P_{1яд} = U_{яд} \cdot I_{яд}$ , Вт									
$P_{2г} = U_{яг} \cdot I_{яг}$ , Вт									
$\Delta P_{эмг} = I_{яг}^2 R_{яг}$ , Вт									
$\Delta P_{эщг} = I_{яг} \cdot \Delta U_{щг}$ , Вт									
$\Delta P_{добг} = 0,01 U_{яг} \cdot I_{яг} \cdot (I_{яг} / I_{янг})^2$ , Вт									
$\Delta P_{мг} + \Delta P_{мехг} = 0,03 P_{2г}$ , Вт									
$P_{1г} = P_{2д} = P_{2г} + \Sigma \Delta P_{г}$ , Вт									
$M_{г} = M_{д} = M = P_{1г} / \omega$ , Нм									
$\eta_{д} = P_{2д} / (P_{1яд} + U_{вд} \cdot I_{вд})$									

8. Выполняем действия по снятию параметров каждой из точек регулировочной характеристики:

- То же что и по пункту 5. Частоту вращения поддерживаем неизменной, регулируя ток возбуждения электродвигателя реостатом R1.

9. Строим графики экспериментальных зависимостей, предусмотренных в задании

10. Осуществляем оценку полученных результатов

11. Сделать и записать заключение, насколько экспериментальные характеристики подтверждают теоретические предположения.

## 2.3 Лабораторная работа №3 (2 часа).

**Тема: «Регулирование частоты вращения ДПТ»**

### 2.3.1 Цель работы:

Научиться определять параметры схемы замещения трансформатора по результатам опытов холостого хода и короткого замыкания. Освоить методику



построения внешней характеристики трансформатора. Научиться определять оптимальный коэффициент загрузки трансформатора.

### 2.3.2 Задачи работы:

Провести опыты холостого хода и короткого замыкания, построить характеристики и определить параметры схемы замещения.

### 2.3.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

Универсальный фронтальный стенд в лаборатории электрических машин и электрооборудования №208

### 2.3.4 Описание (ход) работы:

1. Знакомимся с основными техническими данными используемого в схеме оборудования и его размещением на стенде
2. Собираем схему экспериментальной установки

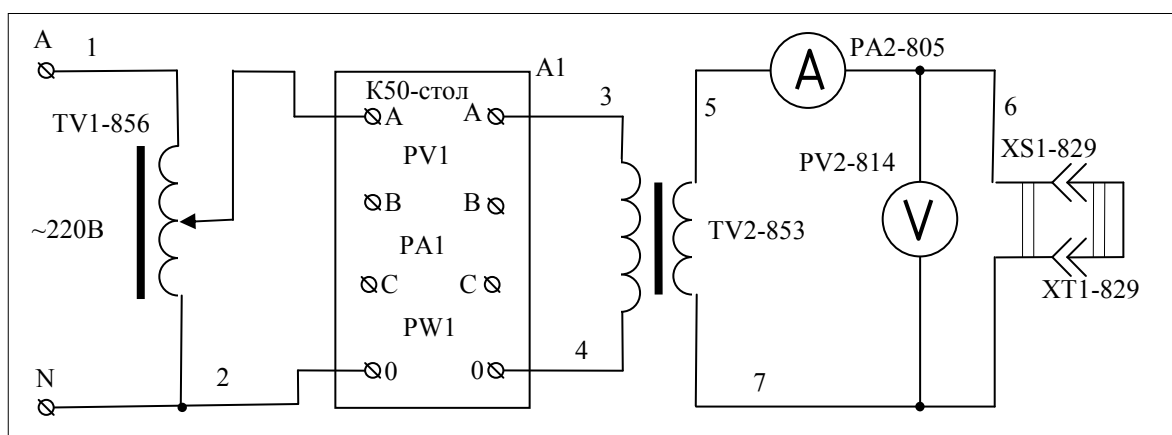


Рис. 1. Принципиальная схема установки для проведения опытов

### 3. Проводим опыт холостого хода

- Устанавливаем движок автотрансформатора в нулевое положение (против часовой стрелки до упора);
- Убираем короткозамкнутую вилку;
- Подаём напряжение на вход автотрансформатора.
- Изучаем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики:
- Устанавливаем заданную в таблице величину напряжения(показания прибора PV1 необходимо умножать на 0,876) ;
- Снимаем и записываем в таблицу показания остальных электроизмерительных приборов.
- Определяем и заносим в таблицу результаты расчёта

4. Заготавливаем таблицу записи наблюдений и обработки экспериментальных данных.

Таблица 1

Результаты: $\Rightarrow$	опыта;				расчёта	
	$U_{10}, В$	$I_{10}, А$	$P_{10}, Вт$	$U_{20}, В$	$S_{10}, ВА$	$\cos\varphi_{10}$
	170					
	180					
	190					
	205					
	$U_{10НОМ} = 220$	$I_{10НОМ} =$	$P_{10НОМ} =$	$U_{20НОМ} =$	$S_{10НОМ} =$	$\cos\varphi_{10НОМ}$

	240				
	$Z_m = \frac{U_{10HOM}}{I_{10HOM}} =$	$R_m = \frac{P_{10HOM}}{I_{10HOM}^2} =$	$X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2} =$		

Старший по работе проецирует таблицу на экран, а все остальные переносят её в тетради. Распределяются исполнители.

Запускаем установку и осуществляем измерения

Старший по работе выполняет действия по пункту 4.3.1, а каждый из ответственных за точку производит действия по пункту 4.3.2. Все остальные студенты заносят результаты измерений и расчётов в свои отчёты.

Проводим опыт короткого замыкания

Знакомимся с порядком запуска установки:

Устанавливаем движок автотрансформатора в нулевое положение (против часовой стрелки до упора);

Устанавливаем короткозамкнутую вилку;

Подаём напряжение на вход автотрансформатора.

Изучаем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики:

Устанавливаем заданную величину тока;

Снимаем и записываем в таблицу на доске показания электроизмерительных приборов.

Определяем и заносим в таблицу результаты расчёта

Заготавливаем таблицу записи наблюдений и обработки экспериментальных данных.

Таблица 2

Результаты:	опыта;				расчёта	
Исполнитель:	I1K, А	U1K, В	P1K, Вт	I2K, А	S1K, ВА	Cosφ1K
Сидоров	1					
Козлов	1,5					
И т. д.	2					
	2,5					
	3					
	3,5					
	4					
	4,5					
	5					
	$R_K = R_1 + R'_2 = \frac{P_{1K.HOM}}{I_{1K.HOM}^2}$			$R_{K75} = R_K \frac{310}{235+t} =$		
	$Z_K = Z_1 + Z'_2 = \frac{U_{1K.HOM}}{I_{1K.HOM}}$			$X_K = X_1 + X_2 = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} =$		
	$Z_{K75} = \sqrt{R_{K75}^2 + X_K^2} =$			$U_K \% = \frac{I_{1HOM} Z_{K75}}{U_{1HOM}} 100 =$		
	$u_{Ka} \% = \frac{I_{1HOM} R_{K75}}{U_{1HOM}} 100 =$			$u_{Kp} \% = \frac{I_{1HOM} X_K}{U_{1HOM}} 100 =$		

Старший по работе спроецировал таблицу на экран, а все остальные переносят её в свои отчёты. Распределяются исполнители.

Запускаем установку и осуществляем измерения

5. Строим характеристики

- Холостого хода:  $S_0, P_0, \cos \varphi_0 = f(U_{10})$
- Короткого замыкания:  $P_K, I_K, \cos \varphi_K = f(U_K)$
- Теоретических зависимостей  $U_2 = f(\beta)$  и  $\eta = f(\beta)$

6. Рассчитываем и заносим в таблицу  $U_2$  и  $\eta$  при  $\cos \varphi_2 = 0.85$

$\beta$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_K}{\beta S_{НОМ} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_K}$						
$\Delta U \% = \beta (u_{Ka} \% \cos \varphi_2 + u_{Kp} \% \sin \varphi_2)$						
$U'_2 = U_{НОМ} (1 - \frac{\Delta U \%}{100})$						

7. Строим графики

Оба графика в одной системе координат.

$$\beta_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_K}}$$

8. Определяем оптимальное значение  $\beta$

9. Осуществляем сравнение опытных и теоретических зависимостей.

## 2.4 Лабораторная работа №4 (2 часа).

### Тема: «Однофазные трансформатор и автотрансформатор»

#### 2.4.1 Цель работы:

Сравнить характеристики однофазных трансформатора и автотрансформатора.  
Уяснить достоинства и недостатки автотрансформатора и трансформатора.

#### 2.4.2 Задачи работы:

Снять внешние характеристики трансформатора и автотрансформатора и определить процентное изменение напряжения при номинальной нагрузке по сравнению с

$$\Delta U_2 = \frac{U_{20} - U_{2H}}{U_{20}} 100\%$$

ХОЛОСТЫМ ХОДОМ

#### 2.4.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

Универсальный фронтальный стенд в лаборатории электрических машин и электрооборудования №208

#### 2.4.4 Описание (ход) работы:

1. Осуществляем испытание трансформатора
2. Знакомимся с основными техническими данными используемого в схеме оборудования и его размещением на стенде
3. Собираем схему экспериментальной установки

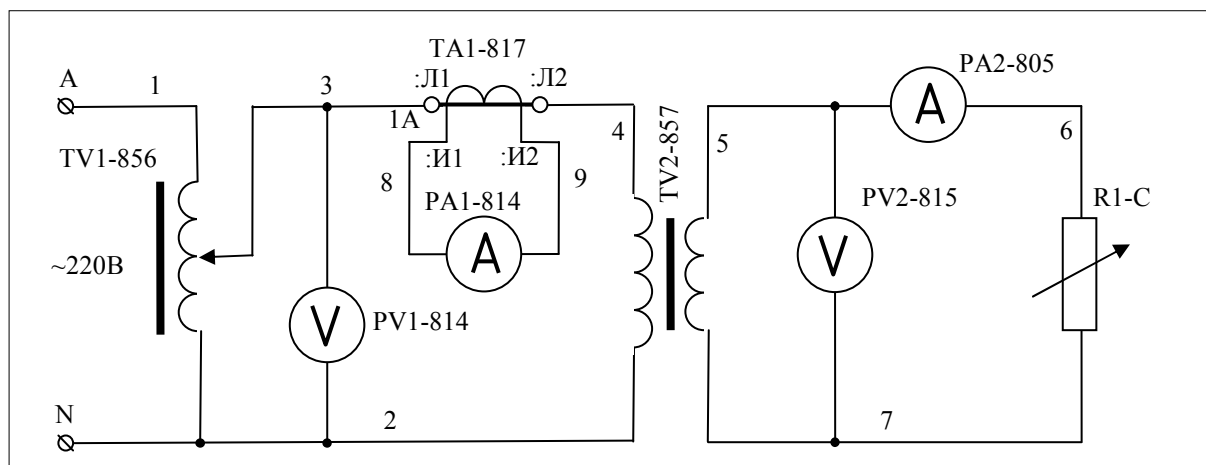


Рис. 1. Принципиальная схема установки для испытания трансформатора

4. Порядок запуска установки:

- Устанавливаем движок автотрансформатора в нулевое положение (против часовой стрелки до упора);
- Устанавливаем минимальную нагрузку (движок реостата против часовой стрелки до упора);
- Подаём напряжение на вход автотрансформатора.

5. Действия по снятию параметров каждой из точек характеристики:

- С помощью автотрансформатора устанавливаем напряжение  $U_1$ , (PV1), равное 220 В;
- Устанавливаем заданную величину тока нагрузки (PA2) с помощью реостата R1;
- Снимаем и записываем в таблицу на доске показания электроизмерительных приборов.

6. Заполняем таблицу записи наблюдений и обработки экспериментальных данных.

Таблица 1

Опытные данные							
$I_1$ , А							
$I_2$ , А	0	≈3	≈4	≈5	≈6	≈7	≈7,5
$U_1$ В	220	220	220	220	220	220	220
$U_2$ , В							
Расчётные данные							
Степень загрузки трансформатора $\beta = I_2/I_{2н}$							
Абсолютное изменение напряжения $\Delta U = U_{20} - U_2$ , В	0						
Относительное изменение напр-я $\delta U = 100\Delta U/U_{20}, \%$							
Полная мощность на входе тр-ра $S_1 = I_1 U_1$ , ВА							
Полная мощность на выходе тр-ра $S_2 = I_2 U_2$ , ВА							

7. Осуществляем испытание автотрансформатора

8. Знакомимся с основными техническими данными используемого в схеме оборудования и его размещением на стенде

9. Корректируем схему экспериментальной установки

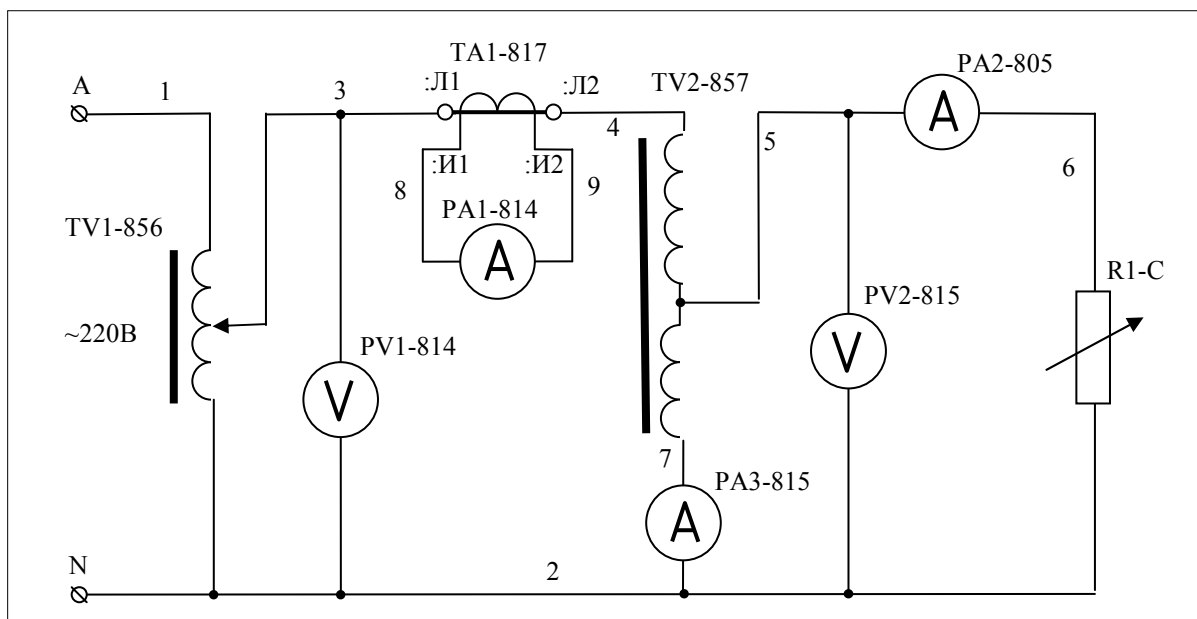


Рис. 2. Принципиальная схема установки для испытания автотрансформатора

10. Порядок запуска установки и снятия опытных данных

— Что и при испытании трансформатора.

11. Заполняем таблицу записи наблюдений и обработки экспериментальных данных.

Таблица 2

Опытные данные							
I <sub>1</sub> , A							
I <sub>2</sub> , A	0	≈2,7	≈4	≈5	≈6	≈7	≈7,5
I <sub>3</sub> , A							
U <sub>1</sub> B	220	220	220	220	220	220	220
U <sub>2</sub> , B							
Расчётные данные							
Степень загрузки трансформатора $\beta = I_2/I_{2н}$							
Абсолютное изменение напряжения $\Delta U = U_{20} - U_2$ , B	0						
Относительное изменение напр-я $\delta U = 100\Delta U/U_{20}, \%$							
Полная мощность на входе тр-ра $S_1 = I_1 U_1$ , BA							
Полная мощность на выходе тр-ра $S_2 = I_2 U_2$ , BA							

12. Строим графики экспериментальных зависимостей  $U_2 = f(\beta)$  и  $\delta U_2 = f(\beta)$  для трансформатора и для автотрансформатора

Все графики построить в одной системе координат.

13. Осуществляем сравнение опытных данных

14. Сделать и записать заключение, насколько экспериментальные характеристики подтверждают теоретические предположения.



- Если измеренные напряжения близки к нулю, фазировка произведена верно, короткозамкнутые вилки вставляем в розетки, тем самым включаем трансформаторы на параллельную работу;

#### 4. Заготавливаем таблицу результатов измерения уравнильных токов

Таблица 1

Фаза →	А (ХТ1)	В (ХТ2)	С (ХТ3)
Разность потенциалов на разъединённой фазе $\Delta U$ , В			
Опытное значение уравнильного тока $I_{УР.О}$ , А			
Сопротивление цепи замыкания уравнильного тока, Ом $(Z_{KI} + Z_{KI}) = \Delta U / I_{УР.О}$			

#### 5. Записываем действия при измерении уравнильных токов.

- Вынимаем вилку ХТ1;
- Измеряем и записываем в таблицу напряжение  $\Delta U$ ;
- Измеряем и записываем уравнильный ток;
- То же самое проделываем с фазами В и С.

#### 6. Заготавливаем таблицу для фиксации распределения нагрузки между трансформаторами

Таблица 2

Объект →			Тр-р I	Тр-р II	Нагрузка
Фазные напряжения UФ	В		UN2-a1=	UN4-a2=	UN5-A6=
			UN2-b1=	UN4-b2=	UN5-B6=
			UN2-c1=	UN4-c2=	UN5-C6=
Линейный ток $I_L$ (равен при соединении звездой фазному току $I_F$ )	А		$I_1=$	$I_4=$	$I_7=$
			$I_2=$	$I_5=$	$I_8=$
			$I_3=$	$I_6=$	$I_9=$
Полная мощность в фазах (опытное значение) $S_F = U_F I_F$	ВА	SФА			
		SФВ			
		SФС			
Полная мощность всех трёх фаз $S = S_{ФА} + S_{ФВ} + S_{ФС}$	ВА		$S_I=$	$S_{II}=$	$S_{НАГР}=$
Абсолютная погрешность $\Delta S = (S_I + S_{II}) - S_{НАГР}$	ВА				
Относительная погрешность $\delta S \% = 100 \% \Delta S / S_{СРЕДНЕЕ}$	%				

#### 7. Записываем действия при определении распределения нагрузки между трансформаторами:

- Включаем автоматический выключатель QF1.
- Подаём напряжение;
- Измеряем напряжения и токи;
- Рассчитываем мощности.

#### 8. Проверяем баланс мощностей

Должно быть  $S_I + S_{II} = S_{HAГР}$ . Если есть расхождение, определить абсолютную погрешность  $\Delta S = (S_I + S_{II}) - S_{HAГР}$  и относительную  $\delta S \% = 100\% \Delta S / S_{СРЕДНЕЕ}$ .  $S_{СРЕДНЕЕ} = [(S_I + S_{II}) + S_{HAГР}] / 2$

#### 9. Записываем выводы по работе

### 2.6 Лабораторная работа №6 (2 часа).

#### Тема: «Несимметричные режимы работы трёхфазного трансформатора»

##### 2.6.1 Цель работы:

Провести сравнительный анализ влияния схемы соединения трёхфазного двухобмоточного трансформатора на искажение симметрии первичных и вторичных линейных и фазных напряжений. Овладеть методикой определения сопротивления нулевой последовательности трансформаторов со схемами соединения  $Y/Y_n$   $\Delta/Y_n$ .

##### 2.6.2 Задачи работы:

Собрать на лабораторном стенде, поочерёдно, схемы соединения трансформатора  $Y/Y_n$  и  $\Delta/Y_n$ , нагрузить однофазной нагрузкой, измерить распределение токов в первичных обмотках, линейные и фазные напряжения, для той и другой схем измерить сопротивления нулевой последовательности и построить векторные диаграммы, сравнить опытные и теоретические данные.

##### 2.6.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

Универсальный фронтальный стенд в лаборатории электрических машин и электрооборудования №208

##### 2.6.4 Описание (ход) работы:

1. Исследуем распределение токов и напряжений
2. Заготавливаем таблицу записи наблюдений и обработки экспериментальных данных

Таблица 1

Схема	У/УН	Д/УН
Опытные данные		
ИНАГР, А	4	4
UAB, В		
UBC, В		
UCA, В		
IA, А		
IB, А		
IC, А		
Uab, В		
Ubc, В		
Uca, В		
Ua, В		
Ub, В		
Uc, В		
IA, А	$= 2K I_{нагр} / 3$	$= K I_{нагр}$



$I_B, A$	$= K I_{нагр} / 3$	$= 0 - 0 = 0$
$I_C, A$	$= K I_{нагр} / 3$	$= K I_{нагр}$

$K=W2/W1$ – коэффициент трансформации исследуемого трансформатора, равный для используемого трансформатора 0,577.

3. Исследуем распределение токов и напряжений при соединении обмоток трансформатора по схеме У/Ун

4. Знакомимся с основными техническими данными используемого в схеме оборудования и его размещением на стенде.

5. Собираем схему экспериментальной установки

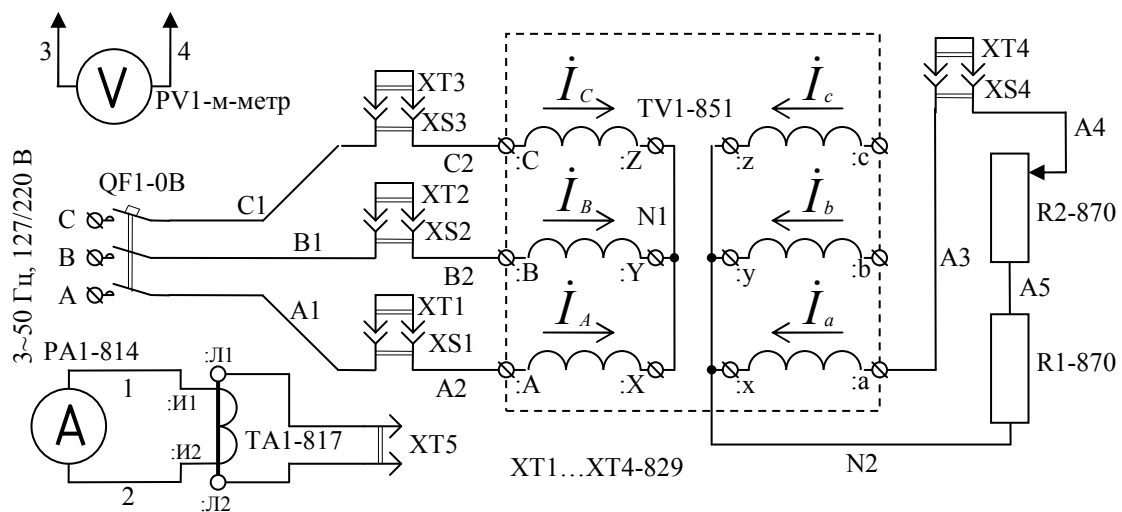


Рис.1. Принципиальная схема установки для испытания трансформатора при схеме соединения обмоток У/Ун.

6. Производим измерение и расчёт напряжений и токов и заполнение соответствующего столбца таблицы

7. Перед включением установки в сеть реостат R2 установить на максимальное сопротивление.

8. Осуществляем сравнение опытных и теоретических значений линейных токов в первичной обмотке.

9. Рассчитать процент расхождения результатов по каждому из линейных токов.

10. По данным таблицы 1 строим векторную диаграмму вторичных напряжений трансформатора для схемы соединения У/Ун:

- в нижней части поля чертежа горизонтально откладываем вектор напряжения  $U_{bc}$  в масштабе, соответствующем размеру отведённого под диаграмму поля;
- из точек B и C делаем засечки раствором циркуля соответственно равным отрезкам  $U_{ab}$  и  $U_{ca}$ ;
- в полученную точку A проводим вектора  $U_{ab}$  и  $U_{ca}$ ;
- проводим медианы полученного треугольника и определяем его центр O;
- из точек A, B, и C делаем засечки в центр треугольника ABC и получаем центр нейтральной точки фазных напряжений O1 вторичной обмотки;
- Измеряем длину отрезка OO1, который в масштабе даёт напряжение смещения нейтрали трансформатора  $E_o$ .

11. Исследуем распределение токов и напряжений при соединении обмоток трансформатора по схеме  $\Delta/Y_n$

12. Знакомимся с основными техническими данными используемого в схеме оборудования и его размещением на стенде

13. Корректируем схему экспериментальной установки

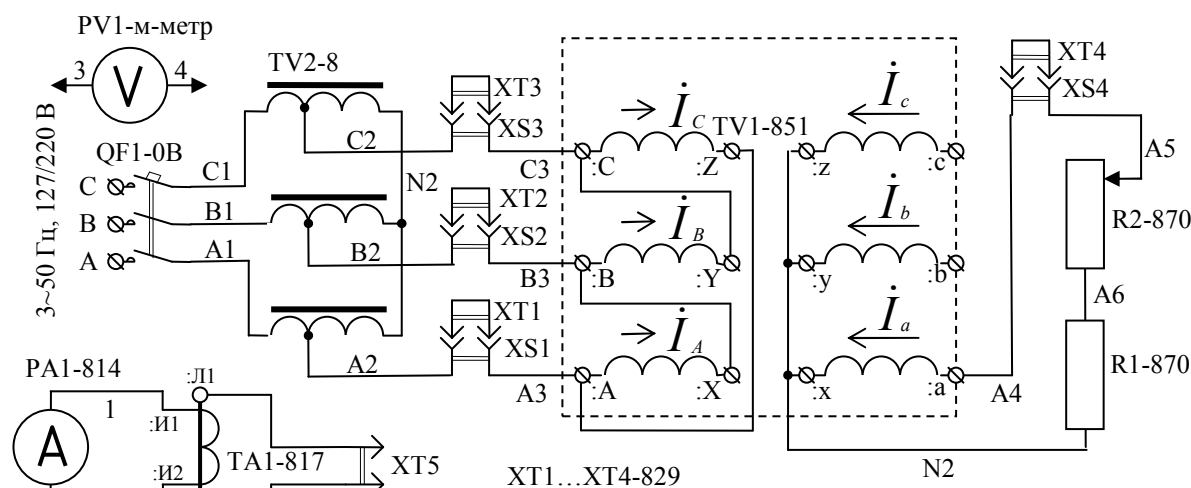


Рис.2. Принципиальная схема установки для испытания трансформатора при схеме соединения обмоток  $\Delta/Y_n$ .

14. Обмотки трансформатора переключаются на схему  $\Delta/Y_n$ , в соответствии со схемой, изображённой на рис. 2. Работу выполняет очередной исполнитель.

15. Производим измерение и расчёт напряжений и токов и заполнение соответствующего столбца таблицы

16. Перед включением установки в сеть реостат R2 установить на максимальное сопротивление.

17. Осуществляем сравнение опытных и теоретических значений линейных токов в первичной обмотке.

18. Рассчитать процент расхождения результатов по каждому из линейных токов.

19. По данным таблицы 1 строим векторную диаграмму для схемы соединения  $\Delta/Y_n$

20. Определяем сопротивления нулевой последовательности и смещение нейтрали вторичной обмотки при несимметричной нагрузке трансформатора

21. Заготавливаем и заполняем таблицу записи наблюдений и обработки экспериментальных данных

Таблица 2

Физические величины	Y/Y <sub>n</sub>	$\Delta/Y_n$
	Параметр	Параметр
Опытные данные		
U <sub>0</sub> , В		
P <sub>0</sub> , Вт		
I <sub>0</sub> , А (Устанавливается равным току однофазной нагрузки по предыдущему опыту)		
Расчётные данные		

$Z_0 = U_0 / (3I_0), \text{ Ом}$		
$R_0 = P_0 / (3(I_0)^2), \text{ Ом}$		
$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}, \text{ Ом}$		
$I_0 = I_0 \cdot \pi / 3$		
$E_0 = I_0 \cdot X_0, \text{ В}$		

22. Определяем сопротивление нулевой последовательности для схемы соединения У/У<sub>Н</sub>
23. Знакомимся с основными техническими данными используемого в схеме оборудования и его размещением на стенде
24. Собираем схему экспериментальной установки
25. Собрать электрическую схему.

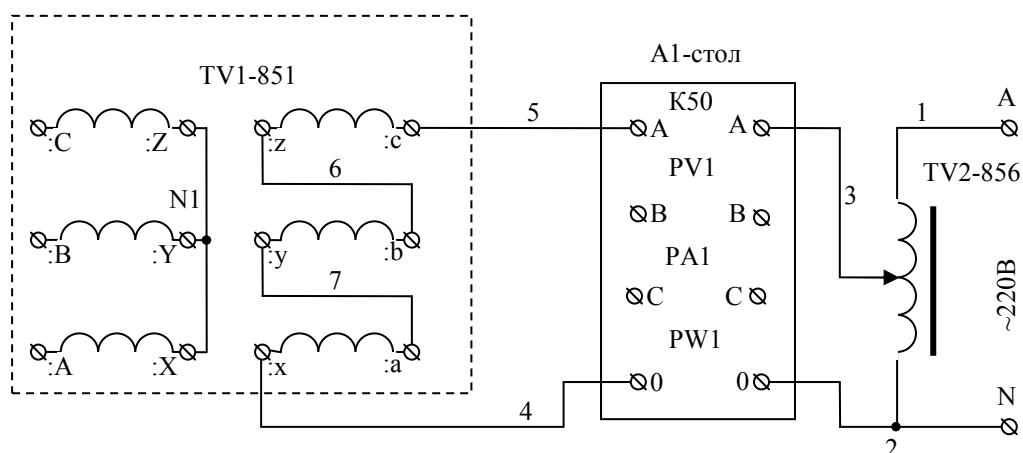
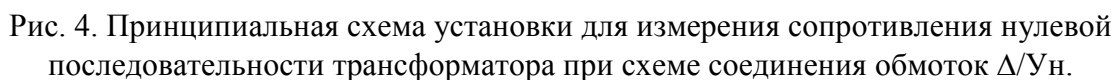


Рис.3. Принципиальная схема установки для измерения сопротивления нулевой последовательности трансформатора при схеме соединения обмоток У/У<sub>Н</sub>

26. Включаем установку и производим измерение и расчёт параметров нулевой последовательности для схемы У/У<sub>Н</sub>.
27. Осуществляем сравнение полученных значений  $E_0$  из потенциальной диаграммы и рассчитанных в таблице 2
28. Рассчитать процент расхождения результатов
29. Осуществляем измерение и расчёт параметров нулевой последовательности для схемы Δ/У<sub>Н</sub>.
30. Корректируем схему в соответствии с рис. 4



33. Рассчитать процент расхождения результатов.

## 108

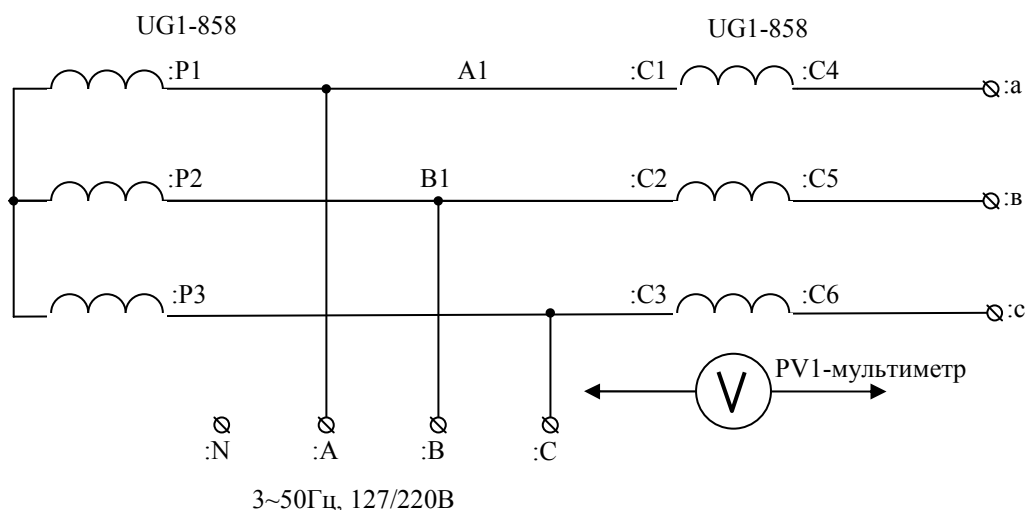


Рис.1. Принципиальная схема испытания заторможенной асинхронной машины в режиме фазорегулятора и индукционного регулятора.

В режиме фазорегулятора выходным напряжением является напряжение, снимаемое с обмоток статора ( $U_{Aa}$ ,  $U_{Bb}$ ,  $U_{Cc}$ ), а в режиме индукционного регулятора – суммарное напряжение сети и обмоток статора ( $U_{Na}$ ,  $U_{Nb}$ ,  $U_{Nc}$  или  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$ ,  $U_{ca}$ ). Входным напряжением в том и другом случаях является напряжение  $U_1$  (фазное  $U_{NA}$ ,  $U_{NB}$ ,  $U_{NC}$  или линейное  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$ )/

3. Записываем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики:
4. Устанавливаем заданное значение угла поворота ротора.
5. Записываем показания приборов.
6. Заготавливаем и заполняем таблицу записи наблюдений

Таблица 1

$\alpha$ , град	-120	-90	-60	-30	0	30	60	90	120
$U_{NA}$ , В									
$U_{NB}$ , В									
$U_{NC}$ , В									
$U_{Aa}$ , В									
$U_{Bb}$ , В									
$U_{Cc}$ , В									
$U_{Na}$ , В									
$U_{Nb}$ , В									
$U_{Nc}$ , В									
$U_{AB}$ , В									
$U_{BC}$ , В									
$U_{CA}$ , В									
$U_{ab}$ , В									
$U_{bc}$ , В									
$U_{ca}$ , В									

φ, град									
---------	--	--	--	--	--	--	--	--	--

7. Строим векторную диаграмму и определяем фазу выходного напряжения фазорегулятора φ

8. Векторная диаграмма строится с помощью циркуля для одной фазы, например, фазы А:

- Откладывается общий для всех углов поворота ротора вектор фазного напряжения сети.
- Раствором циркуля, равном в масштабе напряжению  $U_{Aa}$ , проводится окружность с центром в конце вектора  $U_{Na}$ .
- С начала вектора  $U_{Na}$  делается засечка раствором циркуля, в масштабе равном  $U_{Na}$ .
- В точку пересечения откладываются вектора  $U_{Na}$  и  $U_{Aa}$ .
- Транспортиром определяется и заносится в таблицу угол φ между фазным напряжением сети  $U_{Na}$  и напряжением вторичной обмотки  $U_{Aa}$ .
- Построения по пунктам 3...5 повторить для всех углов поворота ротора.

9. Строим графики зависимостей  $U_{Aa}$  и  $\varphi = f(\alpha)$  - для фазорегулятора и  $U_{Na} = f(\alpha)$  - для индукционного регулятора.

10. Старший заготавливает координатную плоскость на доске, а каждый из исполнителей наносит точки графиков на плоскость. Старший по работе проводит искомые кривые.

11. Формулируем заключение по проделанному заданию.

12. Исследовать асинхронную машину с заторможенным ротором в режиме регулируемой реактивной катушки.

13. Снять зависимость индуктивности катушки от угла поворота ротора.

14. Собираем схему экспериментальной установки

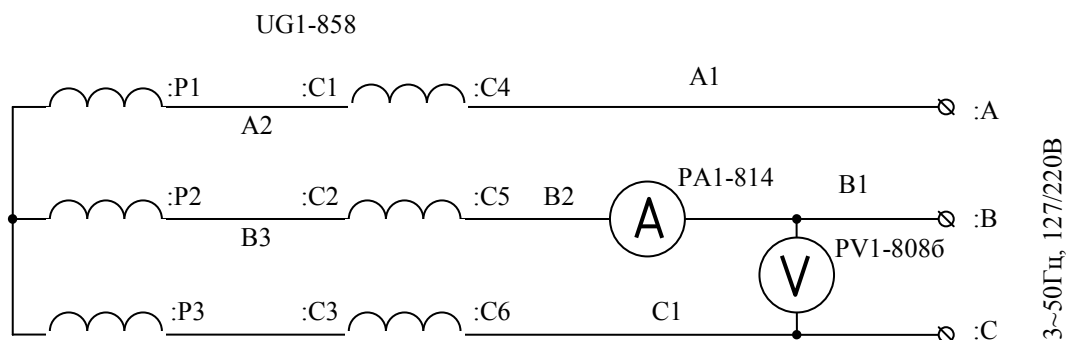


Рис. 3. Принципиальная схема исследования регулируемой реактивной катушки

15. Записываем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики:

16. Устанавливаем заданное значение угла поворота ротора α.

17. Записываем показания приборов.

18. Рассчитываем и заносим в таблицу расчётные данные.

19. Заготавливаем и заполняем таблицу записи наблюдений

Таблица 2

№ п/п	$\alpha$ , град	$U_1$ , В	$I_1$ , А	$X=U_1/I_1$ (Ом)	$L=X/2\pi f(\Gamma_H)$
1	-120				
2	-90				
3	-60				
4	-30				
5	0				
6	30				
7	60				
8	90				
9	120				

20. Строим график зависимости  $L=f(\alpha)$

## 2.8 Лабораторная работа №8 (2 часа).

**Тема: «Исследование АД с КЗР в режимах холостого хода и короткого замыкания»**

### 2.8.1 Цель работы:

Овладеть техникой и методикой проведения опытов холостого хода и короткого замыкания АД.

### 2.8.2 Задачи работы:

- Провести опыт холостого хода и построить зависимости  $I_x = f(U)$  ;  
 $P_x = f(U)$  ;  $\cos \varphi_x = f(U)$  . Разделить потери мощности холостого хода на потери в обмотке статора  $\Delta P_{эл1}$  , в стали  $\Delta P_{M1}$  и механические  $\Delta P_{Мех}$  .
- Провести опыт короткого замыкания и построить зависимости  $I_K=f(U)$  ;  
 $P_K=f(U)$  ;  $\cos \varphi_K=f(U)$  .

### 2.8.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

Универсальный фронтальный стенд в лаборатории электрических машин и электрооборудования №208

### 2.8.4 Описание (ход) работы:

1. Провести опыт холостого хода и построить зависимости  $I_x = f(U)$  ;  
 $P_x = f(U)$  ;  $\cos \varphi_x = f(U)$  . Разделить потери мощности холостого хода на потери в обмотке статора  $\Delta P_{эл1}$  , в стали  $\Delta P_{M1}$  и механические  $\Delta P_{Мех}$  .
2. Знакомимся с основными техническими данными используемого в схеме оборудования и его размещением на стенде
3. Собираем схему экспериментальной установки

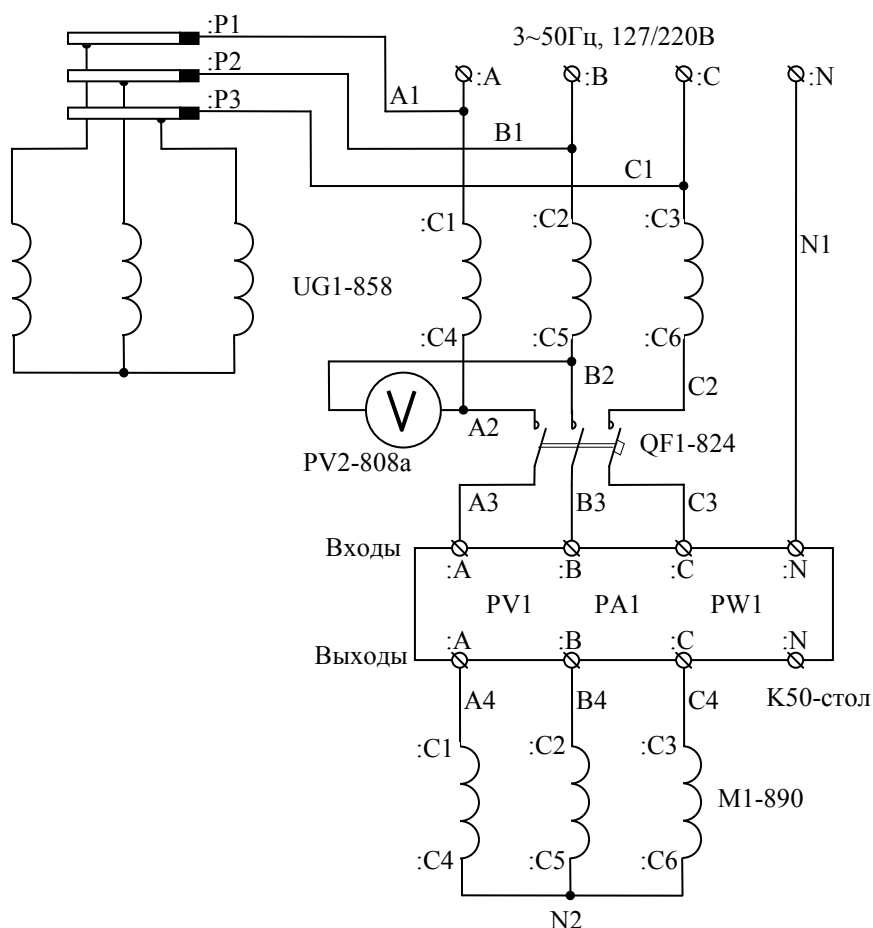


Рис. 1. Принципиальная схема установки для проведения опыта холостого хода

Таблица 1

Параметры ↓	Опытные данные						
U <sub>A</sub> , В	230	220	200	180	160	140	120
U <sub>B</sub> , В							
U <sub>C</sub> , В							
I <sub>A</sub> , А							
I <sub>B</sub> , А							
I <sub>C</sub> , А							
P <sub>A</sub> , Вт							
P <sub>B</sub> , Вт							
P <sub>C</sub> , Вт							
Расчётные данные							
$R_{175} = 3I_0 R_1 / (235 + t)$							
$U_X = (U_A + U_B + U_C) / 3$ , В							
$I_X = (I_A + I_B + I_C) / 3$ , А							
$P_X = (P_A + P_B + P_C)$ , Вт							
$\cos \varphi_X = P_X / (\sqrt{3} U_X I_X)$							
$\Delta P_{\Sigma 1} = 3I_0^2 R_{175}$ , Вт							
$\Delta P_{M+ME} = (P_X - \Delta P_{\Sigma 1})$ , Вт							
U <sub>2</sub> , В							
Последующие параметры рассчитываются после построения зависимости $(\Delta P_{M+ME}) = f(U_2)$ по пунктам							



$\Delta P_{MEX}$ , Вт							
$\Delta P_M$ , Вт							

Примечание:  $t$  – температура, при которой производилось измерение сопротивления обмотки электродвигателя  $R_1$ . Для используемого в работе электродвигателя оно равно 1,1 Ома.

4. Записываем и выполняем действия по запуску электродвигателя

- Отключаем автоматический выключатель QF1;
- Устанавливаем предел измерения напряжения измерительного комплекта К50 300 В, а предел измерения тока 25 А;
- Подаём напряжение на вход индукционного регулятора UG1;
- Устанавливаем напряжение на выходе UG1 220 В;
- Замыкаем QF1.
- Записываем и выполняем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики:
- Устанавливаем соответствующие измеряемым току и напряжению пределы измерения этих величин
- Устанавливаем заданное в таблице напряжение.
- Записываем показания приборов.

5. Осуществляет расчёт: сопротивления фазной обмотки электродвигателя  $R_1$  75, мощность холостого хода  $P_X$ , средние по фазам ток холостого хода  $I_X$  и напряжение  $U_X$ , коэффициент мощности при холостом ходе  $\cos\varphi_X$ , электрические потери в статорной обмотке  $\Delta P_{Э1}$ , сумму магнитных и механических потерь  $\Delta P_M + \Delta P_{MEX}$ , квадрат напряжения холостого хода  $U_{X2}$ .

6. Строим график  $(\Delta P_M + \Delta P_{MEX}) = f(U_{X2})$  (на доске и в тетради).

Продолжаем полученную прямую до пересечения с осью ординат и получаем значение механических потерь, не зависящих от напряжения  $\Delta P_{MEX}$ .

Определяем магнитные потери при заданном напряжении  $\Delta P_M$ .

7. Строим предусмотренные заданием графики

8. Провести опыт короткого замыкания и построить зависимости  $I_K = f(U)$ ;  $P_K = f(U)$ ;  $\cos\varphi_K = f(U)$ .

9. Корректируем схему экспериментальной установки



IK НОМ. СРЕДНЕЕ, А										
$R_K = P_K / (3 I_K^2)$ , Ом										
$R'_2 = R_K - R_1$ , Ом										
$R'_{2.среднее}$ , Ом										

10. Записываем и выполняем действия по запуску электродвигателя

- Отключаем автоматический выключатель QF1;
- Устанавливаем предел измерения напряжения измерительного комплекта К50 150 В, а предел измерения тока 10 А;
- Подаём напряжение на вход индукционного регулятора UG1;
- Устанавливаем минимально-возможное напряжение на выходе UG1;
- Замыкаем QF1.
- Записываем и выполняем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики:
- Устанавливаем соответствующие измеряемым току и напряжению пределы измерения этих величин
- Устанавливаем заданный в таблице ток.
- Записываем показания приборов.

11. Осуществляет расчёт: мощности короткого замыкания РК, средние по фазам ток короткого замыкания IK и напряжение U, коэффициент мощности при коротком замыкании Cosφк.

12. Строим предусмотренные заданием графики

## 2.9 Лабораторная работа №9 (2 часа).

**Тема: «Трёхфазный асинхронный электродвигатель в однофазном режиме»**

### 2.9.1 Цель работы:

Ознакомиться со схемами подключения трёхфазного асинхронного двигателя к однофазной сети, с порядком пуска и реверсирования, принципами образования вращающего момента при пуске и в рабочем режиме, степенью использования номинальной мощности.

### 2.9.2 Задачи работы:

Исследовать работу трёхфазного асинхронного электродвигателя в однофазном режиме

### 2.9.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

Универсальный фронтальный стенд в лаборатории электрических машин и электрооборудования №208

### 2.9.4 Описание (ход) работы:

1. Знакомимся с основными техническими данными используемого в экспериментальной установке оборудования и его размещением на стенде
2. Знакомство осуществить по перечню элементов универсального лабораторного стенда, составленному на вводном занятии
3. Определяем сопротивление фазной обмотки электродвигателя при рабочей температуре (75оС)

4. Методом вольтметра-амперметра определяем сопротивление фазной обмотки электродвигателя при комнатной температуре  $R_{1\Phi}$  (Сеть постоянного тока 25 В; амперметр постоянного тока на панели 809; вольтметр постоянного тока на панели 810a)

5. Пересчитываем сопротивление на рабочую температуру  
 $R_{1\Phi 75} = 310 R_{1\Phi} / (235 + t) = 5,61 \text{ Ом}$

6. Собираем схему экспериментальной установки

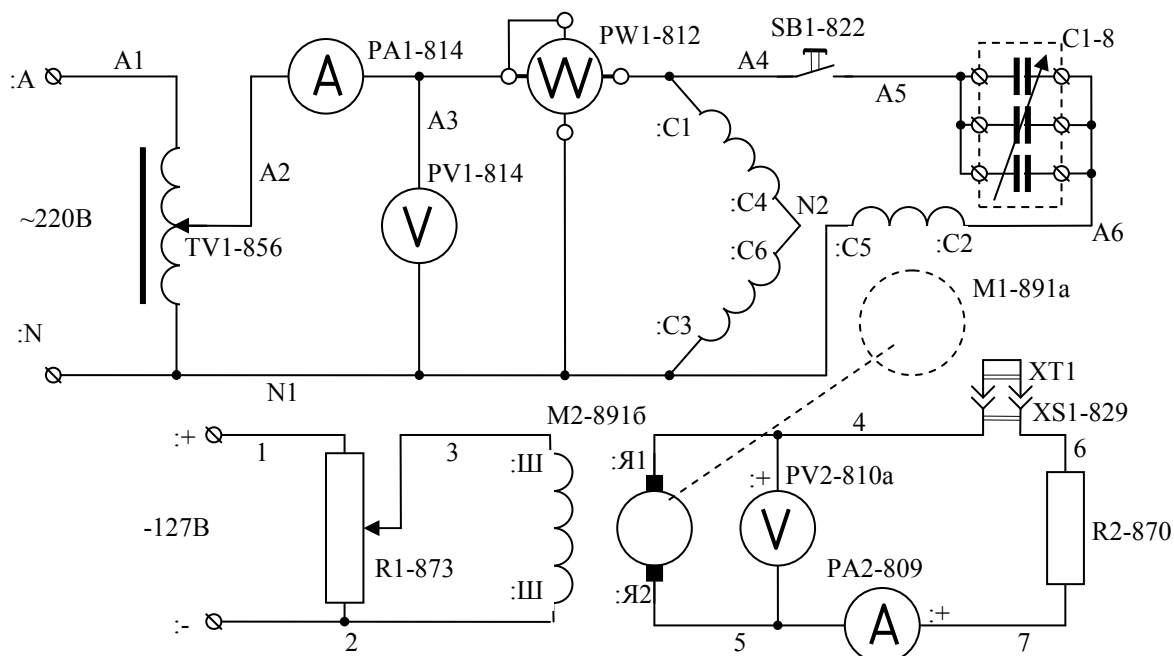


Рис. 1. Принципиальная схема установки для испытания двигателя

7. Рассчитываем необходимую ёмкость конденсатора для собранной схемы включения электродвигателя

Данные для расчёта:  $I_{\Phi \text{ НОМ}} = 4 \text{ А}$ ;  $U_{\Phi \text{ НОМ}} = 220 \text{ В}$ .  $C_P = \text{формула} = \text{расчёт} = \text{ответ мкФ}$ ;  $C_P = \text{формула} = \text{расчёт} = \text{ответ мкФ}$ .

8. Проводим опыт короткого замыкания и определяем сопротивление ротора  $R'_2$

9. Заготавливаем таблицу записи наблюдений

Таблица 1

Опытные данные			Расчётные данные		
$U_K, \text{ В}$	$I_K, \text{ А}$	$P_K \text{ Вт}$	$R_K = P_K / (I_K)^2, \text{ Ом}$	$R'_2 = R_K - R_1 = R_K - 2R_{1\Phi 75}, \text{ Ом}$	$\cos \phi_K = P_K / U_K I_K$

10. Выполняем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики:

- Устанавливаем напряжение на выходе автотрансформатора близким к нулю.
- Подаём напряжение на вход автотрансформатора и при отключенной пусковой обмотке (кнопка отпущена) увеличиваем напряжение на выходе автотрансформатора пока ток в обмотке электродвигателя не станет равным номинальному.
- Снимаем и рассчитываем показатели.
- Заполняем таблицу

11. Проводим опыт холостого хода и строим зависимости  $I_x = f(U)$  ;  
 $P_x = f(U)$  ;  $\cos \varphi_x = f(U)$

12. Разделить потери мощности холостого хода на потери в обмотке статора  $\Delta P_{эл1}$ , в стали  $\Delta P_{M1}$  и механические  $\Delta P_{мех}$ .

13. Заготавливаем таблицу записи наблюдений

14. Распределяются исполнители

Таблица 2

Параметры ↓	Опытные данные									
U, В	240	230	220	210	200	190	180	170	160	150
IX, А										
PX, Вт										
Расчётные данные										
$\cos \varphi_x = P_x / U I_x$										
$\Delta P_{Э1} = I_x^2 R_{1\Phi} 75$ , Вт										
$\Delta P_{Э2} = (I_2 \text{ обр})^2 R_2 =$ $(I_x/2)^2 \cdot R_{1\Phi} 75$ , Вт										
$\Delta P_M + \Delta P_{MECH} = (P_x -$ $\Delta P_{Э1} - \Delta P_{Э2})$ , Вт										
U2, В2										
Последующие параметры рассчитываются после построения зависимости $(\Delta P_M + \Delta P_{MECH}) = f(U_2)$ и выделения механических потерь										
$\Delta P_M$ , Вт										

*Примечание: Так как намагничивающая сила обмотки статора пульсирующая, то ток обратной последовательности  $I_2 \text{ обр}$  будет в два раза меньше тока холостого хода  $I_x$ , а приведённое сопротивление обмотки ротора  $R_2$  определено выше и примерно равно сопротивлению обмотки статора.  $R_{1\Phi} 75$ .*

15. Осуществляем пробный пуск электродвигателя.

- Устанавливаем ёмкость конденсатора, равную пусковой ёмкости, рассчитанной выше.
- С помощью короткозамкнутой вилки ХТ1 разрываем цепь якоря генератора постоянного тока, с целью исключения возможности возникновения тока якоря за счёт остаточного намагничивания полюсов генератора М2;
- Устанавливаем движок автотрансформатора на напряжение 220В;
- Удерживая нажатой кнопку SB1, подаём напряжение на зажимы автотрансформатора;
- Сразу же после разгона электродвигателя отпускаем кнопку;
- Отключаем электродвигатель.
- Меняем местами выводы пусковой или рабочей обмотки асинхронного электродвигателя и повторяем пуск;
- Убеждаемся, что электродвигатель вращается в обратном направлении;
- Передаём установку для снятия характеристик холостого хода
- Выполняем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики:
- Выполнение действий осуществляется назначенными в таблице исполнителями.

- Устанавливаем заданное в таблице напряжение.
- Снимаем и записываем показания приборов.

16. Рассчитываем: коэффициент мощности, электрические потери в статорной обмотке  $\Delta P_{\Sigma 1}$ , электрические потери в обмотке ротора  $\Delta P_{\Sigma 2}$ , сумму магнитных и механических потерь  $\Delta P_M + \Delta P_{MECH}$ , квадрат напряжения холостого хода  $U_2$ .

17. Совместно с остальными исполнителями принимаем участие в построении графика  $(\Delta P_M + \Delta P_{MECH}) = f(U_2)$  (на доске и в тетради).

18. Продолжает полученную прямую до пересечения с осью ординат и получаем значение механических потерь в двух машинах, не зависящих от напряжения  $\Delta P_{MECH}$ . Механические потери в асинхронной машине М1 ориентировочно принимаем в два раза меньше, чем в машине постоянного тока М2 ( $\Delta P_{MECH.2} = 2\Delta P_{MECH.1}$ ).

19. Определяем магнитные потери при заданном напряжении  $\Delta P_M$ .

20. Строим предусмотренные заданием графики

21. Проводим опыты и получаем данные для построения рабочих характеристик двигателя  $I_1$ ,  $\cos \varphi$ ,  $\eta = f(P_2)$  при  $U_1 = U_{ном}$ .

22. Заготавливаем таблицу записи наблюдений

Таблица 3

Параметры ↓	Опытные данные						
$I_1 \Phi$ , А	1,2	1,6	2	2,5	3,0	3,5	4,0
$U_1$ , В	220	220	220	220	220	220	220
$P_1$ , Вт							
$U_{Я}$ , В							
$I_{Я}$ , А							
	Расчётные данные						
$\cos \varphi = P_1 / (U_1 I_1 \Phi)$							
Определение мощности на валу через потери в электродвигателе (М1)							
$\Delta P_{\Sigma 1} = I_2^2 R_1 \Phi 75$ , Вт							
$P_{ЭМ} = P_1 - (\Delta P_{\Sigma 1} + \Delta P_M)$ , Вт							
$\Delta P_{\Sigma 2} \approx \Delta P_{\Sigma 1}$ , Вт							
$\Delta P_{ДОБ} = 0,005 \cdot P_{1H} [I_1 \Phi / I_1 \Phi_{НОМ}]^2$ , Вт, где $P_{1H}$ – мощность при токе $I_1 \Phi_{НОМ}$							
$\Sigma \Delta P = \Delta P_{\Sigma 2} + \Delta P_{\Sigma 1} + \Delta P_{ДОБ} + \Delta P_M + \Delta P_{MECH.1}$ , Вт							
$P'_{В} = P_2 - \Sigma \Delta P = P_1 - \Sigma \Delta P$ , Вт							
Определение мощности на валу через потери в генераторе (М2)							
$P_2 \Gamma = U_{Я} I_{Я}$ , Вт							
$\Delta P_{\Sigma} = I_2^2 R_{Я} + I_{Я}^2 \Delta U_{ШЦ}$							
$\Delta P_{ДОБ} = 0,01 U_{Я} I_{Я} \cdot \text{НОМ} (I_{Я} / I_{Я.НОМ})$							
$\Delta P_M = \Delta P_{M.НОМ} U_2 / U_{2.НОМ}$							
$\Sigma \Delta P = \Delta P_{\Sigma} + \Delta P_{ДОБ} + \Delta P_M + \Delta P_{MECH.2}$ , Вт							
$P''_{В} = P_2 \Gamma - \Sigma \Delta P = P_2 \Gamma - \Sigma \Delta P$ , Вт							
$P_B = (P'_{В} + P''_{В}) / 2$							
$\eta = P_B / P_1$							

23. Осуществляем пробный пуск электродвигателя.

24. Пуск по ниже перечисленным пунктам осуществляет очередной назначенный исполнитель

- Устанавливаем в розетку короткозамкнутую вилку;
- Запускаем электродвигатель в порядке, указанном выше;
- Устанавливаем потенциометр R1 на минимум выходного напряжения;
- Подаём на потенциометр напряжение постоянного тока;
- Передаём установку для снятия характеристик.
- Выполняем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики:
- Действия выполняет каждый из назначенных в таблице исполнителей
- Изменяя ток возбуждения машины M2 устанавливаем заданный в таблице ток статора машины M1;
- Снимаем показания приборов;
- Осуществляем расчёт и заполнение таблицы.

25. Строим предусмотренные заданием графики

## **2.10 Лабораторная работа №10 (2 часа).**

**Тема: «Асинхронный генератор»**

### **2.10.1 Цель работы:**

Ознакомиться с генераторным режимом асинхронной машины. Рассчитать ёмкость конденсатора, необходимого для самовозбуждения. Опытным путём оценить характеристики асинхронного генератора в режиме самовозбуждения.

### **2.10.2 Задачи работы:**

- Снять зависимость напряжения холостого хода асинхронного генератора в режиме самовозбуждения от ёмкости конденсаторов  $U_{xx} = f(C)$  при постоянной частоте вращения ротора.
- Построить зависимости  $I_1$ ,  $I_C$ ,  $I_{\text{наг}}$ ,  $U$ ,  $\eta = f(P_1)$  при заданной частоте вырабатываемого тока (47 Гц).

### **2.10.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:**

Универсальный фронтальный стенд в лаборатории электрических машин и электрооборудования №208

### **2.10.4 Описание (ход) работы:**

1. Снять зависимость напряжения холостого хода асинхронного генератора в режиме самовозбуждения от ёмкости конденсаторов  $U_{xx} = f(C)$  при постоянной частоте вращения ротора.
2. Опытным или расчетным путём определяем ток холостого хода
3. Включить электродвигатель в сеть и измерить ток.
4. Рассчитываем необходимую ёмкость конденсатора  
Расчёт осуществляем по формуле (2). (Работу выполняет очередной исполнитель.)
5. Знакомимся с основными техническими данными используемого в схеме оборудования и его размещением на стенде
6. Собираем схему экспериментальной установки

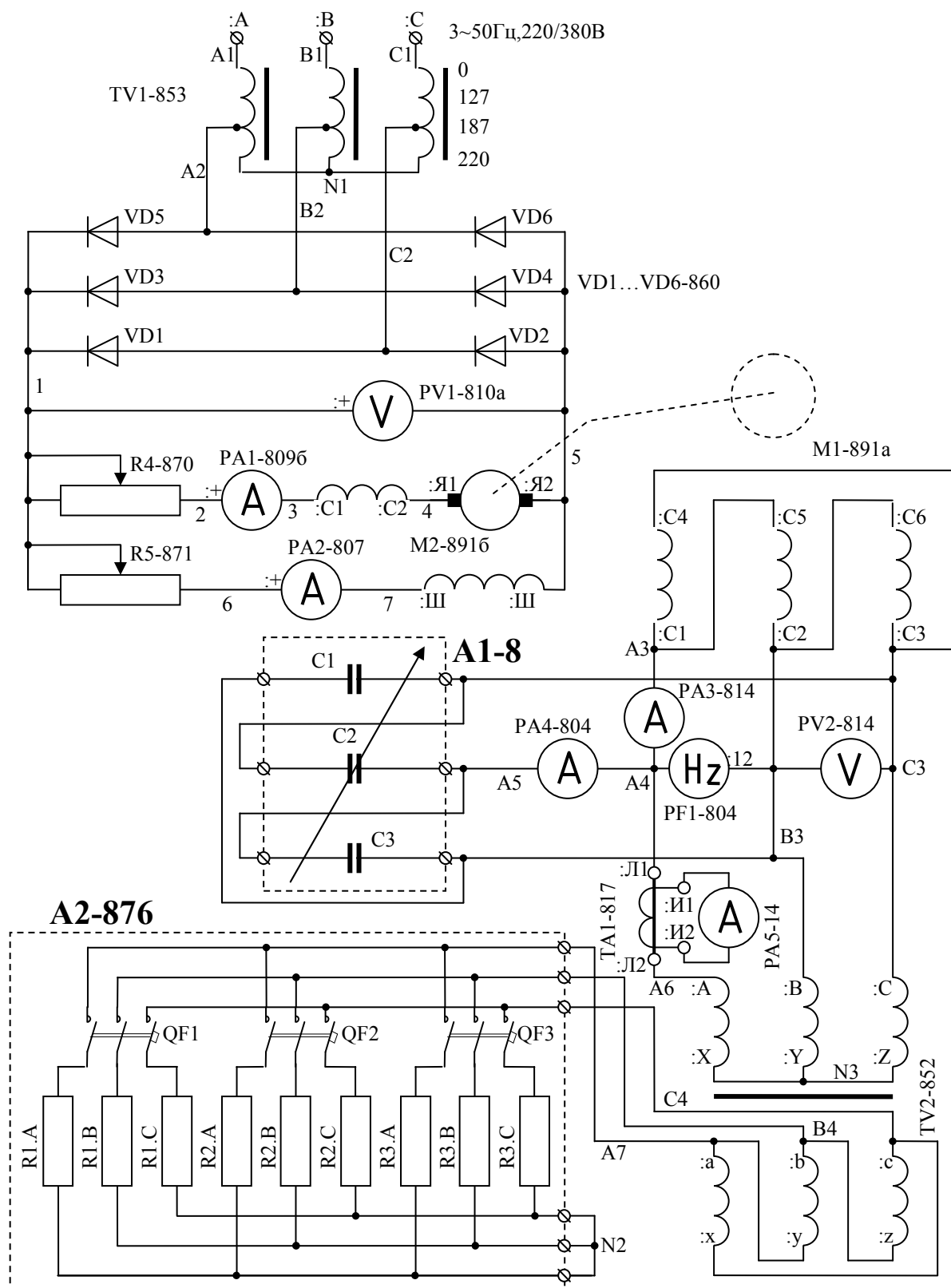


Рис. 1. Принципиальная схема установки для испытания асинхронного генератора

7. Заготавливаем и заполняем таблицу записи наблюдений

Таблица 1



№п/п	C, мкФ	f, Гц	n=60f, об/мин	IC, А	IB, А	UXX, В
1	16	50	3000			
2	20	50	3000			
3	24	50	3000			
4	28	50	3000			
5	32	50	3000			
6	36	50	3000			

#### 8. Порядок запуска установки

- Добавочное сопротивление в цепи якоря, чтобы уменьшить пусковой ток, устанавливаем на максимум.
- Регулировочный реостат R2 в цепи возбуждения электродвигателя М2 устанавливаем на минимальное сопротивление, чтобы обеспечить максимальный магнитный поток, а следовательно, больший пусковой момент при меньшем пусковом токе.
- Автоматические выключатели QF1...QF3 размыкаем.
- Подаём напряжение на вход трёхфазного автотрансформатора 220/380В.
- Медленно уменьшаем добавочное сопротивление до нуля, следя за тем, чтобы ток якоря не превышал 10 А.
- Записываем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики:
- Устанавливаем заданное значение ёмкости С.
- Регулировочным реостатом R2, меняя ток возбуждения, устанавливаем заданную частоту тока (50Гц), вырабатываемого асинхронной машиной М1.
- Заносим в таблицу показания приборов.

#### 9. Строим предусмотренный заданием график

10. Построить зависимости  $I_1$ ,  $I_C$ ,  $I_{НАГ}$ ,  $U$ ,  $\eta = f(P_1)$  при заданной частоте вырабатываемого тока (47 Гц).

11. Заготавливаем и заполняем таблицу записи наблюдений

Таблица 2

Параметры ↓	Опытные данные							
C, мкФ	20	20	20	20	20	20	20	20
F1	Откл	Вкл.	Откл	Вкл.	Откл	Вкл.	Откл	Вкл.
F2	Откл	Откл	Вкл.	Вкл.	Откл	Откл	Вкл.	Вкл.
F3	Откл	Откл	Откл	Откл	Вкл.	Вкл.	Вкл.	Вкл.
f, Гц	47	47	47	47	47	47	47	47
IЯ=I1, А								
I2, А								
I3, А								
I4, А								
I5, А								
UЯ=U1, В								
U2, В								
Расчётные данные								
РЯ ДВ=UЯ*IЯ, Вт								
$\Delta P_{\Sigma} = I_{\Sigma}(R_{\Sigma} + R_C) + I_{\Sigma} \cdot \Delta U_{\Sigma}$								
$\Delta P_{ДОБ} = 0,01 U_{\Sigma} I_{\Sigma} \cdot \text{НОМ} (I_{\Sigma} / I_{\Sigma} \cdot \text{НОМ})$								
$\Delta P_{\Sigma} + \Delta P_{МЕХ} = U_{\Sigma} I_{\Sigma} \cdot \text{XX}$								

$\Sigma \Delta P$ $=\Delta P_{\Sigma}+\Delta P_{ДОБ}+\Delta P_{М}+\Delta P_{МЭХ}, Вт$								
$P_2 ДВ=P_1 Г =P_{Я} ДВ -\Sigma \Delta P, Вт$								
$P_2 Г=1,73 U_2 I_5 \cos \varphi, Вт (\cos \varphi=1)$								
$\eta Г= P_2 Г/P_1 Г$								

Примечание: Сопротивление якоря  $R_{Я}=1 \text{ Ом}$

Сопротивление последовательной обмотки возбуждения  $R_C=0,3 \text{ Ома}$

Ток холостого хода  $I_{Я.ХХ}=1,5 \text{ А}$

Падение напряжения под парой щёток  $\Delta U_{Щ}=1 \text{ В}$

12. Записываем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики:
  - После запуска установки в порядке, описанном выше, подключаем заданное в таблице сопротивление нагрузки.
  - Снимаем и рассчитываем показатели.
  - Заполняем таблицу
13. Строим предусмотренные заданием графики

## 2.11 Лабораторная работа №11 (2 часа).

### Тема: «Испытание трёхфазного синхронного генератора»

#### 2.11.1 Цель работы:

Ознакомиться с конструкцией и принципом действия синхронного генератора, оценить влияние характера нагрузки на характеристики генератора, овладеть методикой графо-аналитического исследования характеристик синхронного генератора.

#### 2.11.2 Задачи работы:

Снять характеристики генератора:

- Холостого хода  $E_0=f(I_B)$ ;
- Индукционную нагрузочную  $U=f(I_B)$ ;
- Внешние  $U=f(I_H)$  при  $\cos \varphi=1$  и  $\cos \varphi=0,7$ ;
- Регулировочные  $I=f(I_B)$  при  $\cos \varphi=1$  и  $\cos \varphi=0,7$ ;
- Трёхфазного короткого замыкания  $I^{(3)}_{кз}=f(I_B)$ .

#### 2.11.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

Универсальный фронтальный стенд в лаборатории электрических машин и электрооборудования №208

#### 2.11.4 Описание (ход) работы:

1. Знакомимся с основными техническими данными используемого в схеме оборудования и его размещением на стенде

G1	Синхронный генератор: тип ЕС52-4М101 с самовозбуждением $I_{в.ном}=4,3 \text{ А}$ , 1500 об/мин, 5 кВт, $I_{Ф.НОМ}=9 \text{ А}$ ; $I_{Л.НОМ}=15,7 \text{ А}$ ; $U_{Ф.НОМ}=133 \text{ В}$ ; $U_{Л.НОМ}=230 \text{ В}$ ; 106 кг (При $U_B=17,6 \text{ В}$ и $I_B=9 \text{ А}$ ; $U_{Ф}=162 \text{ В}$ )	1	
----	---	---	--

2. Собираем схему экспериментальной установки



	0/0/0/0	0	0	5,5		0			0
	0/0/0/0	0	0	6,5		0			0
	0/0/0/0	0	0	7,5		0			0
	0/0/0/0	0	0	8,5		0			0
Характеристика холостого хода при снижении тока возбуждения									
	0/0/0/0	0	0	8,5		0			0
	0/0/0/0	0	0	7,5		0			0
	0/0/0/0	0	0	6,5		0			0
	0/0/0/0	0	0	5,5		0			0
	0/0/0/0			4,5		0			0
	0/0/0/0	0		3,5		0			0
	0/0/0/0	0		2,5		0			0
	0/0/0/0	0		1,5		0			0

5. Запускаем установку в следующем порядке:

- Работу выполняет назначенный исполнитель
- Устанавливаем автотрансформатор в нулевое положение;
- Отключаем QF1 по QF4;
- Подаём напряжение;
- Передаём установку для снятия характеристики.
- Записываем и выполняем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики
- Работу выполняют ответственные за каждую точку характеристики
- Устанавливаем заданные в таблице независимые параметры (величину тока возбуждения подводим к требуемой обязательно снизу для восходящей ветви и сверху - для нисходящей)
- Снимаем и заносим в таблицу зависимые параметры
- Определяем расчётные данные

6. Строим восходящую и нисходящую ветви характеристики холостого хода в относительных единицах

7. Снимаем индукционную нагрузочную характеристику

8. Заготавливаем и заполняем таблицу записи наблюдений

Таблица 2

Положение выключателей QF1...QF4	Активный ток $I_A = I_{PA2}, A$	Реактивный ток $I_P = I_{PA3}, A$	Ток возб-я $I_B = I_{PA1}, A$	Фазное напряжение $U_F = U_{PV1}, B$	Полный ток нагрузки $I_H = I_P, A$	$U_F^* = U_F / U_{F.NOM}$	$I^* B = I_B / I_{BO}$	$I^* H = I_H / I_{HOM}$
0/0/0/1	0	9	8,0		9			1
0/0/0/1	0	9	8,5		9			1
0/0/0/1	0	9	9,0		9			1
0/0/0/1	0	9	9,4		9			1

9. Запускаем установку в порядке, указанном выше

10. Записываем и выполняем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики

11. Работу выполняют ответственные за каждую точку характеристики

12. Устанавливаем заданные в таблице независимые параметры

13. Снимаем и заносим в таблицу зависимые параметры

14. Определяем расчётные данные

15. Строим характеристику в относительных единицах

Характеристика строится на том же графике, что и характеристика холостого хода

16. Снимаем внешние характеристики при активной и активно-индуктивной нагрузках

17. Заготавливаем и заполняем таблицу записи наблюдений для снятия характеристик

Таблица 3

Положение выключателей QF1...QF4	Активный ток $I_A = I_{PA2}, A$	Реактивный ток $I_P = I_{PA3}, A$	Ток возб-я $I_B = I_{PA1}, A$	Фазное напряжение $U_F = U_{PV1}, B$	Полный ток нагрузки $I_H, A$	$U_F^* = U_F / U_{F.NOM}$	$I^* B = I_B / I_{BO}$	$I^* H = I_H / I_{HOM}$
0/0/0/0		0	4,3					
0/1/0/0		0	4,3					
1/0/0/0		0	4,3					
0/0/1/0		0	4,3					
1/1/0/0		0	4,3					
0/1/1/0		0	4,3					
1/0/1/0		0	4,3					
1/1/1/0		0	4,3					
1/0/1/0		0	5,4					
0/1/1/0		0	5,4					
1/1/0/0		0	5,4					
0/0/1/0		0	5,4					
0/1/0/0		0	5,4					

1/0/0/0		0	5,4					
0/0/0/0		0	5,4					
IA=IP								
0/0/0/0			4,3					
0/1/0/1			4,3					
1/0/0/1			4,3					
0/0/1/1			4,3					
1/1/0/1			4,3					
0/1/1/1			4,3					

Примечание: 
$$I_H = \sqrt{I_A^2 + I_P^2}$$

18. Запускаем установку в порядке, указанном выше
19. Записываем и выполняем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики
20. Работу выполняют ответственные за каждую точку характеристики
21. Устанавливаем заданные в таблице независимые параметры
22. Снимаем и заносим в таблицу зависимые параметры
23. Определяем расчётные данные
24. Строим внешние характеристики в относительных единицах
25. Снимаем регулировочную характеристику
26. Заготавливаем и заполняем таблицу записи наблюдений для снятия характеристики

Таблица 4

	Положение выключателей QF1...QF4	Активный ток IA=IPA2, A	Реактивный ток IP=IPA3, A	Ток возб-я IB=IPA1, A	Фазное напряжение UF=UPV1, В	Полный ток нагрузки IH, A	UF*=UF/UF.NOM	I*B= IB/IBO	I*H= IH/ IHOM
Регулировочная характеристика при чисто активной нагрузке									
	0/0/0/0	0	0		133				
	0/1/0/0		0		133				
	1/0/0/0		0		133				
	0/0/1/0		0		133				
	1/1/0/0		0		133				
	0/1/1/0		0		133				
	1/0/1/0		0		133				
Регулировочная характеристика при активно-индуктивной нагрузке (Cosφ=0.7)									
Регулируя индуктивность реактивной катушки, устанавливаются равные токи									
		IA=IP							
	0/0/0/0	0	0		133				
	0/1/0/1				133				
	1/0/0/1				133				
	0/0/1/1				133				
	1/1/0/1				133				
	0/1/1/1				133				

	1/0/1/1				133				

27. Запускаем установку в порядке, указанном выше
28. Записываем и выполняем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики
  - Устанавливаем заданные положения выключателей QF1...QF4
  - Устанавливаем заданное в таблице напряжение
  - Регулируя индуктивность, добиваемся равенства активного и реактивного токов
  - Снимаем и заносим в таблицу установленные параметры
  - Определяем расчётные данные
  - Строим характеристики в относительных единицах
29. Снимаем характеристику короткого замыкания
30. Заготавливаем и заполняем таблицу записи наблюдений

Таблица 5

Положение выключа- телей QF1...QF4	Активный ток $I_A = I_{PA2}, A$	Реактивный ток $I_P = I_{PA3}, A$	Ток возб-я $I_B = I_{PA1}, A$	Фазное напряжение $U_F = U_{PV1}, B$	Полный ток нагрузки $I_H, A$	$U_F^* = U_F / U_{F.NOM}$	$I^* B = I_B / I_{BO}$	$I^* H = I_H / I_{H.NOM}$
0/0/0/1	0	2		0		0		
0/0/0/1	0	3		0		0		
0/0/0/1	0	4		0		0		
0/0/0/1	0	5		0		0		
0/0/0/1	0	6		0		0		
0/0/0/1	0	7		0		0		
0/0/0/1	0	8		0		0		
0/0/0/1	0	9		0		0		
0/0/0/1	0	10		0		0		

31. Закорачиваем выводы реактивной катушки C1, C2, C3
  32. Запускаем установку в порядке, указанном выше
  33. Записываем и выполняем действия по снятию параметров каждой из точек характеристики
  34. Работу выполняют ответственные за каждую точку характеристики
  35. Устанавливаем заданный в таблице ток трёхфазного короткого (это реактивный ток)
  36. Снимаем и заносим в таблицу ток возбуждения, при котором этот ток устанавливается
  37. Определяем расчётные данные
  38. Строим характеристику в относительных единицах
  39. Определяем отношение короткого замыкания
- $OK3 = I(3)_K (I_B^* = 1) / I_H =$

### 3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

#### 3.1 Практическое занятие №1 (2 часа).

Тема: «Решение задач по основам теории электротехники»

##### 3.1.1 Задание для работы:

##### Задача 1.1.

Определить эквивалентное сопротивление цепи между зажимами  $a$  и  $b$  при разомкнутом и замкнутом ключе  $K$  методом эквивалентных преобразований (рис. 1.1,  $a$ ).

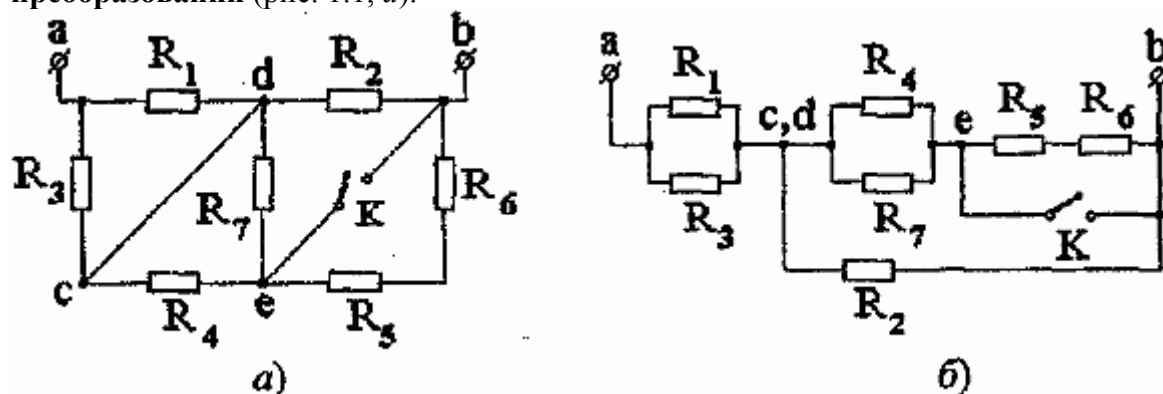


Рис. 1.1

##### Задача 1.2.

Определить методом эквивалентных преобразований сопротивление цепи между зажимами  $a$  и  $b$  при разомкнутом и замкнутом ключе  $K$  для схемы, изображенной на рис. 1.2.

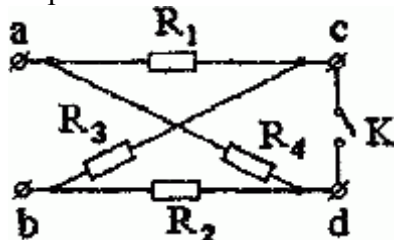


Рис. 1.2

##### Задача 1.3.

Найти сопротивление между зажимами  $a$  и  $b$  для схемы, изображенной на рис. 1.4.

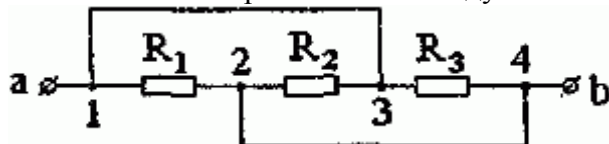


Рис. 1.4

##### Задача 1.4.

Найти сопротивление  $R_{13}$ ,  $R_{14}$ ,  $R_{17}$  между различными парами вершин куба, ребра которого имеют заданное сопротивление  $R$  (рис. 1.6).



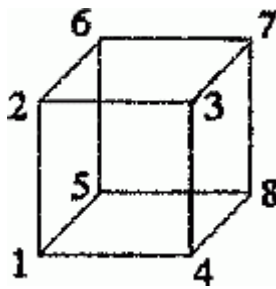


Рис. 1.6

**Задача 1.5.**

Определить **методом эквивалентных преобразований** токи в ветвях цепи (рис. 1.10, а) и показание вольтметра, включенного между точками  $c$  и  $d$ , считая, что его сопротивление во много раз превышает сопротивление каждого из элементов цепи.

Чему равно показание амперметра, включенного между точками  $c$  и  $d$ , сопротивление которого считать равным нулю?

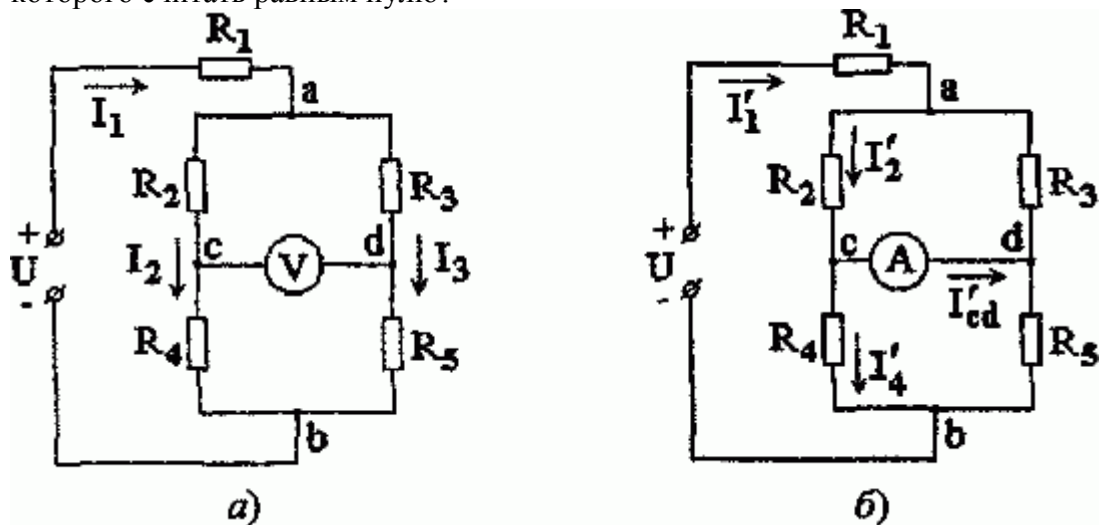


Рис. 1.10

Сопротивления элементов цепи:  $R_1 = 10 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = R_3 = R_5 = 25 \text{ Ом}$  и  $R_4 = 50 \text{ Ом}$ , а приложенное к ней напряжение  $U = 120 \text{ В}$ .

**Задача 1.6.**

В схеме рис. 1.11 заданы сопротивления приемников, величины ЭДС и источника тока отдельных ветвей. Рассчитать неизвестные токи, ЭДС  $E_2$  и сопротивление  $R_5$ , пользуясь *законами Кирхгофа*.

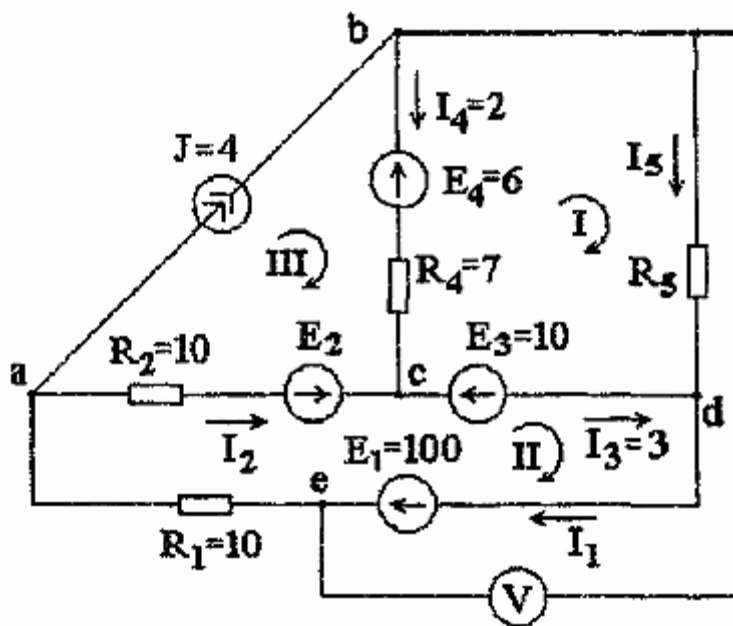


Рис. 1.11

Правильность решения проверить по балансу мощностей. Для наружного контура построить потенциальную диаграмму и определить показание вольтметра.

### 3.1.2 Краткое описание проводимого занятия:

Решение задач занимают важное место в курсе электротехники, так как в процессе их решения проверяется степень усвоения теоретического материала, и приобретаются навыки, необходимые для приложения теории к практике.

На примерах решения задач по электротехнике представлены основные разделы современной теории электрических машин, составляющие предмет теоретических основ электротехники (ТОЭ).

Объем теоретического материала курса электротехники, представленный в виде кратких физических схем и подробно изложенных алгоритмов, позволяет непосредственно перейти к решению как типовых, так и задач, выходящих за рамки курса электротехники.

Реализуется естественный принцип выборочного прочтения и быстрого нахождения нужной информации.

Решение задач по электротехнике делится на разделы, каждый из которых содержит краткое описание *методов* и *алгоритмов* решения задач по электротехнике.

Общие рекомендации при решении задач ТОЭ:

- заданные условия задачи должны быть тщательно проанализированы. Для этого их необходимо прочесть, как минимум, дважды: сначала бегло, схватывая смысл задания в целом, а затем медленно, стараясь подметить мелкие и, на первый взгляд, незначительные детали;
- не стоит решать задачу по схеме, изображенной в расчетной работе, билете. Схему следует перерисовать в привычном для себя виде;
- краткие условия задачи желательно приводить справа от расчетной схемы. На схеме должны быть обозначены все необходимые токи и напряжения, причем, желательно, все величины, относящиеся к одной ветви, обозначать одинаковым индексом:  $E_1$ ,  $U_1$ ,  $I_1$ ,  $R_1$ . В расчетах не должно быть величин, которые не были бы обозначены на схеме;
- полученный результат (результаты) расчета должен быть проверен, будь это баланс мощностей, *векторная диаграмма*, отдельное уравнение по одному из *законов Кирхгофа* или просто логическое рассуждение.

### 3.2 Практическое занятие №2 (2 часа).

Тема: «Решение задач по основам теории машин постоянного тока»

#### 3.2.1 Задание для работы:

##### Задача 2.1.

На рис. 2.2 изображен разрез трех катушек, по которым проходят токи  $I_1 = 8$  А,  $I_2 = 10$  А и  $I_3 = 5$  А.

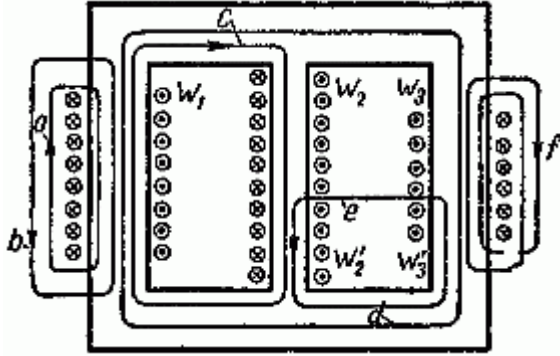


Рис. 2.2

Катушки размещены на стальном сердечнике. Первая катушка (левая)  $w_1$  имеет 8 витков, вторая (средняя)  $w_2$  – 10 витков и третья (правая)  $w_3$  – 6 витков. Определить полную магнитодвижущую силу (м. д. с.) по замкнутым контурам а, b, c, d, e, f, показанным на рис. 2.2. Контур е охватывает катушки  $w'_2$  с 4 витками и  $w'_3$  с 2 витками.

Изменится ли результат решения задачи, если при тех же данных катушки разместить на сердечнике из другого магнитного материала?

##### Задача 2.2.

Определить магнитодвижущую силу (прямая задача расчета одноконтурной магнитной цепи), необходимую для получения магнитного потока в  $5,9 \cdot 10^{-4}$  Вб в кольцеобразном сердечнике, сечением  $S = 5 \text{ см}^2$ . Длина средней линии магнитной индукции  $l = 25 \text{ см}$ .

Определить  $H$  (напряженность магнитного поля в сердечнике) и  $\mu_{\text{пр}}$  (относительная магнитная проницаемость материала сердечника). Материал сердечника – слаболегированная электротехническая листовая сталь Э11.

##### Задача 2.3.

На рис. 2.3 изображен электромагнит, сердечник которого изготовлен из слаболегированной листовой электротехнической стали Э11, а якорь – из литой стали.

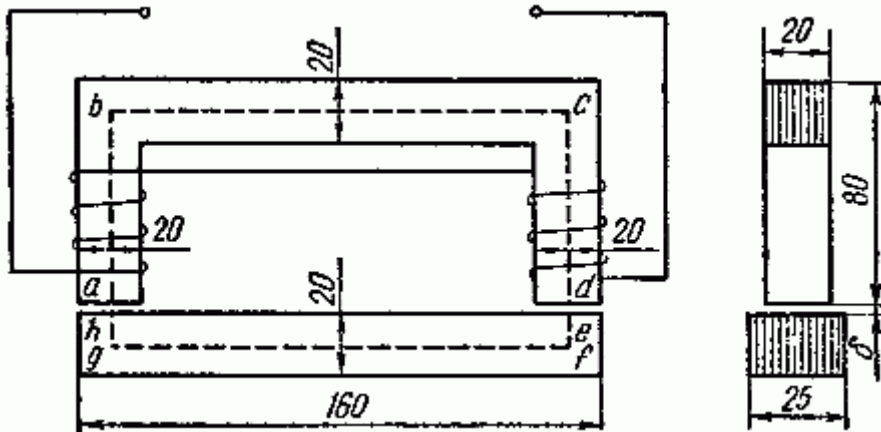


Рис. 2.3

Какой ток должен быть пропущен через обмотку электромагнита (прямая задача расчета одноконтурной магнитной цепи), состоящую из  $w = 500$  витков, для того, чтобы

в якоре была создана магнитная индукция в  $0,84 \text{ Вб/м}^2$ . Размеры на рис. 2.3 даны в миллиметрах. Длина воздушного зазора  $\delta\delta = 1 \text{ мм}$ . Площадь сечения воздушного зазора считать равной площади сечения сердечника (пренебрегаем потоком рассеяния). Чему равна статическая индуктивность электромагнита?

#### Задача 2.4.

Найти магнитную индукцию в якоре электромагнита (обратная задача расчета одноконтурной магнитной цепи), изображенном на рис. 2.3, если на электромагнит намотано  $w = 250$  витков, по которым проходит ток  $I = 4,4 \text{ А}$ . Сердечник изготовлен из листовой электротехнической стали Э11, а якорь – из литой стали. Размеры сердечника и якоря те же, что и в предыдущей задаче. Длина воздушного зазора  $0,5 \text{ мм}$ . Площадь сечения воздушного зазора считать равной площади сердечника.

#### Задача 2.5.

Найти магнитную индукцию в воздушном зазоре тороида (обратная задача расчета одноконтурной магнитной цепи), изготовленного из литой стали (рис. 2.6), если на тороид намотано  $w = 400$  витков, по которым проходит ток  $I = 4 \text{ А}$ . Воздушный зазор  $= 2 \text{ мм}$ . Размеры тороида на рисунке даны в мм.

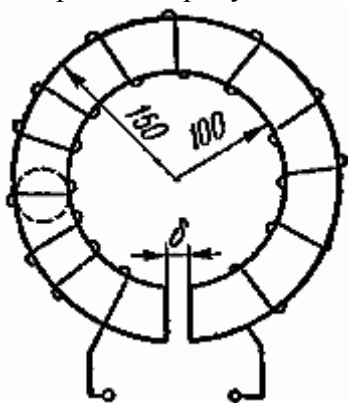


Рис. 2.6

Решение

#### Задача 2.6.

Определить все магнитные потоки и ток, проходящий через катушку, расположенную на среднем стержне сердечника, если в левом стержне имеется магнитная индукция в  $0,95 \text{ Вб/м}^2$ . Размеры магнитопровода на рис. 2.8 даны в миллиметрах. Материал сердечника – листовая сталь Э11. Число витков катушки  $w = 500$ .

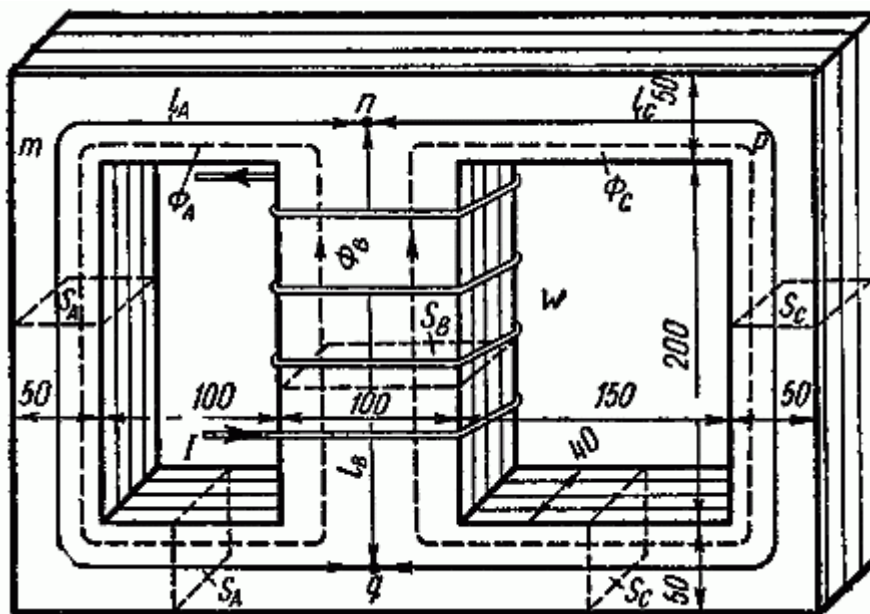


Рис. 2.8

### Задача 2.7.

Магнитная цепь изготовлена из листовой электротехнической стали Э11. На средний стержень сердечника намотана катушка, содержащая  $w = 930$  витков, по которым проходит ток  $I = 1$  А (рис. 2.8). На всем участке А сечение магнитной цепи считать  $S_A = 20 \text{ см}^2$ , на участке В –  $S_B = 40 \text{ см}^2$ , на участке С –  $S_C = 20 \text{ см}^2$ . Длины средних линий магнитной индукции каждого из участков считать равными:  $l_A = 55 \text{ см}$ ,  $l_B = 25 \text{ см}$ ,  $l_C = 80 \text{ см}$ .

Найти значения магнитной индукции во всех стержнях.

### Задача 2.8.

Сердечник собран из листов электротехнической стали марки Э11. Форма и размеры сердечника (в мм) указаны на рис. 2.10.

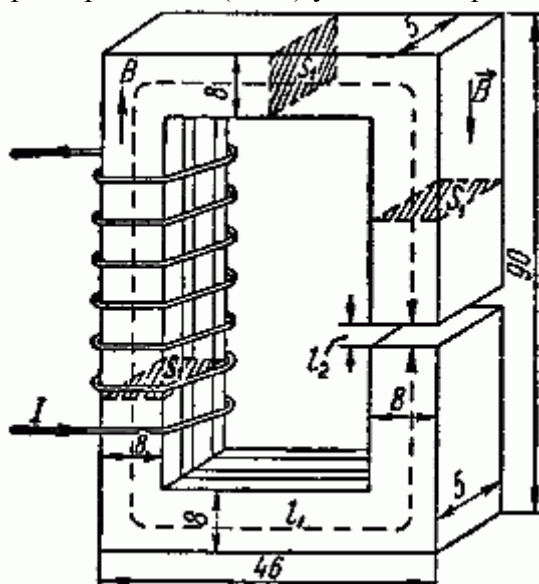


Рис. 2.10

Обмотка имеет  $w = 400$  витков, по которым проходит ток  $I = 3,5$  А. Длина воздушного зазора составляет 1 мм. Определить магнитный поток в сердечнике. При расчете следует считать, что сечение воздушного зазора равно сечению сердечника.

Задачу решить следующими аналитическими методами: а) линейной аппроксимации, б) кусочно-линейной аппроксимации, в) дробно-линейной аппроксимации.

Результаты, полученные для каждого из случаев, сравнить с теми, какие получаются при решении задачи обычным способом.

### 3.2.2 Краткое описание проводимого занятия:

Расчет магнитных цепей при постоянных токах

Основанием к расчету магнитных цепей служат: первый закон Кирхгофа для магнитных цепей и закон полного тока – второй закон Кирхгофа для магнитных цепей.

**Первый закон Кирхгофа для магнитных цепей** гласит: алгебраическая сумма магнитных потоков в узле магнитной цепи равна нулю.

Закон полного тока применяется к замкнутому контуру, образованному средними магнитными линиями магнитной цепи и имеет вид:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} \rightarrow = \sum I \cdot w, \oint \vec{H} \rightarrow \cdot d\vec{l} \rightarrow = \sum I \cdot w,$$

где

$\oint \vec{H} \rightarrow \cdot d\vec{l} \rightarrow = \sum H \cdot l$   $\oint \vec{H} \rightarrow \cdot d\vec{l} \rightarrow = \sum H \cdot l$  – падение магнитного напряжения  $U_M = H \cdot l$  в контуре;

$$F = \sum I \cdot w, F = \sum I \cdot w - \text{магнитодвижущая сила контура (м. д. с.).}$$

**Второй закон Кирхгофа для магнитных цепей** сформулируем следующим образом: алгебраическая сумма магнитных напряжений  $U_M = H \cdot l$  в замкнутом контуре магнитной цепи ( $\sum U_M = \sum H \cdot l$ ) ( $\sum U_M = \sum H \cdot l$ ) равна алгебраической сумме магнитодвижущих сил  $F = I \cdot w$  в том же контуре ( $\sum F = \sum I \cdot w$ ) ( $\sum F = \sum I \cdot w$ ):

$$\sum U_M = \sum F, \sum U_M = \sum F$$

или

$$\sum H \cdot l = \sum I \cdot w, \sum H \cdot l = \sum I \cdot w.$$

Задачи на расчет магнитной цепи могут быть двух видов: прямая задача на расчет магнитной цепи – когда задан поток и требуется рассчитать магнитодвижущую силу (м. д. с.) и обратная задача на расчет магнитной цепи – когда по заданной м. д. с. требуется рассчитать магнитный поток.

В обоих случаях должны быть известны геометрические размеры магнитной цепи и заданы кривые намагничивания ее материалов.

#### Алгоритм прямой задачи расчета неразветвленной магнитной цепи

Дана конфигурация и геометрические размеры неразветвленной магнитной цепи, кривая (или кривые) намагничивания магнитного материала и магнитный поток или индукция магнитного поля в каком-либо сечении. Требуется найти магнитодвижущую силу, ток или число витков намагничивающей обмотки.

Расчет проводим в соответствии с алгоритмом:

1. Разбиваем магнитную цепь на **однородные** (из одного магнитного материала) **участки постоянного сечения** и определяем длины  $l_k$  и площади поперечного сечения  $S_k$  участков. Длины участков (в метрах) берем по средней силовой линии.

2. Исходя из постоянства потока вдоль всей неразветвленной магнитной цепи, по заданному магнитному потоку  $\Phi$  и сечениям  $S_k$  участков находим магнитные индукции на каждом участке:

$$B_k = \Phi / S_k, B_k = \Phi / S_k.$$

Если задана магнитная индукция на каком-либо участке магнитной цепи, то магнитный поток вдоль всей неразветвленной цепи

$$\Phi = B_k \cdot S_k.$$

3. По найденным магнитным индукциям  $B_k$  участков цепи и кривой намагничивания материала  $k$ -го участка цепи (например, рис. 2.1, табл. 2.1) определяем напряженность поля  $H_k$  на каждом участке магнитной цепи.

Напряженность поля в воздушном зазоре находим по формуле

$$H_{\text{возд}} = B_{\text{возд}} / \mu_0 = B_{\text{возд}} / (4\pi \cdot 10^{-7}). \quad H_{\text{возд}} = B_{\text{возд}} / \mu_0 = B_{\text{возд}} / (4\pi \cdot 10^{-7}).$$

4. Подсчитаем сумму падений магнитных напряжений  $U_{mk} = H_k \cdot l_k$  вдоль всей магнитной цепи

$$\sum U_{mk} = \sum H_k \cdot l_k \quad \sum U_{mk} = \sum H_k \cdot l_k$$

и на основании второго закона Кирхгофа для магнитной цепи приравняем сумму магнитодвижущих сил  $F_k = I_k \cdot w_k$  вдоль всей магнитной цепи:

$$\sum H_k \cdot l_k = \sum I_k \cdot w_k. \quad \sum H_k \cdot l_k = \sum I_k \cdot w_k.$$

Основным допущением при расчете является то, что магнитный поток вдоль всей неразветвленной магнитной цепи полагаем неизменным. В действительности не большая часть потока всегда замыкается, минуя основной путь. Этот поток называют потоком рассеяния.

#### **Единицы измерения магнитных величин**

$B$  – индукция магнитного поля, Тл (Тесла);

$H$  – напряженность магнитного поля, А/м (Ампер/метр);

$\Phi$  – поток индукции магнитного поля, Вб (Вебер);

$F = I \cdot w$  – магнитодвижущая сила (м. д. с.), А (Ампер);

$U_m = H \cdot l$  – магнитное напряжение, А (Ампер!).

### **3.3 Практическое занятие №3 (2 часа).**

#### **Тема: «Расчёт магнитной цепи трансформатора»**

##### **3.3.1 Задание для работы:**

Освоить методы расчета магнитной цепи трансформатора

##### **3.3.2 Краткое описание проводимого занятия:**

Расчет магнитной цепи трансформатора

Расчет магнитной цепи производится с целью определения намагничивающего тока и магнитных потерь. Расчет реактивной составляющей намагничивающего тока можно выполнить двумя методами.

##### **Первый метод**

Первый метод аналогичен методу расчета магнитной цепи машины постоянного тока (смотрите статью "Метод расчета магнитной цепи машины постоянного тока"). При этом магнитная цепь вдоль средней магнитной линии (рисунок 1) разбивается на участки (стержни, ярма и воздушные зазоры или щели между ними), в пределах которых магнитные индукции  $B_{\text{ст}}$ ,  $B_{\text{я}}$ ,  $B_{\delta}$  можно считать постоянными. Задаваясь амплитудой потока стержня  $\Phi_{\text{ст}}$ , определяют амплитуды индукции  $B_{\text{ст}}$ ,  $B_{\text{я}}$ ,  $B_{\delta} = B_{\text{ст}}$  и затем по кривым намагничивания стали находят  $H_{\text{ст}}$  и  $H_{\text{я}}$ . Тогда намагничивающая сила однофазного трансформатора (рисунок 1, а)

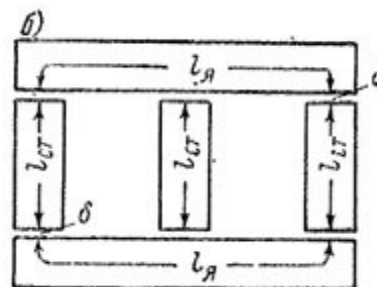


Рисунок 1. Магнитная цепь однофазного (а) и трехфазного стержневого (б) трансформатора

$$F = 2H_{ст}l_{ст} + 2H_{я}l_{я} + 4\frac{B_{ст}}{\mu_0}\delta, \quad (1)$$

где  $\delta$  – величина зазора, которая для шихтованных магнитопроводов равна 0,003 – 0,005 см, а для стыковых магнитопроводов больше этого значения на толщину изоляционной прокладки в стыке.

Магнитная цепь трехстержневого трансформатора несколько несимметрична, и длины магнитных линий для крайних фаз несколько больше, чем для средней. Поэтому намагничивающая сила и намагничивающие токи крайних фаз также несколько больше. На практике этим различием пренебрегают и рассчитывают среднюю намагничивающую силу  $F$  для одной фазы. Тогда (рисунок 1, б)

$$F = H_{ст}l_{ст} + \frac{2}{3}H_{я}l_{я} + n_{\phi}\frac{B_{ст}}{\mu_0}\delta. \quad (2)$$

Здесь  $n_{\phi}$  – среднее число стыков или зазоров на фазу. Для трехстержневого трансформатора с шихтованным магнитопроводом (смотрите рисунок 2, б)  $n_{\phi} = 7/3$  и со стыковым магнитопроводом  $n_{\phi} = 2$ .

Действующее значение основной гармоники реактивной составляющей намагничивающего тока

$$I_{0r} = \frac{F}{\sqrt{2}kw}, \quad (3)$$

где  $w$  – число витков обмотки и  $k$  – коэффициент, учитывающий наличие в намагничивающем токе высших гармоник. При  $B_{ст} = 1$  Т и  $B_{ст} = 1,4$  Т соответственно  $k = 1,5$  и  $k = 2,2$ .

Магнитная характеристика  $\Phi_{ст} = f(i_{0r})$  имеет вид, показанный на рисунке 1, в статье "Явления, возникающие при намагничивании магнитопроводов трансформаторов".

### Второй метод

Второй метод основан на вычислении энергии магнитного поля магнитопровода или его намагничивающей (реактивной) мощности.

Допустим, что  $B$  и  $H$  представляют собой амплитуды индукции и напряженности магнитного поля, изменяющихся синусоидально во времени. Тогда максимум магнитной энергии в единице объема поля



$$W'_{\text{макс}} = BH / 2 ,$$

реактивная мощность на единицу объема

$$Q' = \omega W'_{\text{макс}} = \pi f B H ,$$

а реактивная мощность магнитопровода с объемом  $V$  или массой  $G$

$$Q = Q'V = \frac{Q'G}{\gamma} = \frac{\pi f B H}{\gamma} G = q_c G , \quad (4)$$

где  $\gamma$  – плотность стали магнитопровода, а

$$q_c = \frac{\pi f B H}{\gamma} = \frac{\pi f B^2}{\mu \gamma} \quad (5)$$

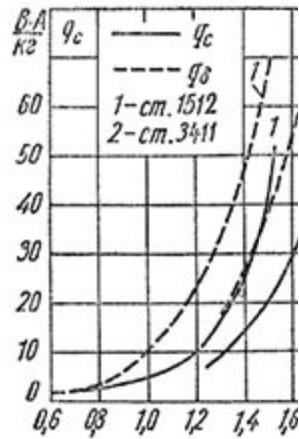


Рисунок 2. Кривые удельной реактивной мощности магнитопровода и зазора

представляет собой реактивную мощность на единицу массы стали магнитопровода.

Для воздушных зазоров выражение для  $Q$  можно представить в виде

$$Q = qn\delta S_\delta = nq_\delta S_\delta ,$$

где  $S_\delta$  – площадь зазора;  $n$  – число зазоров на весь магнитопровод;  $q$  – реактивная мощность на единицу объема зазора;  $q_\delta = q\delta$  – реактивная мощность на единицу площади зазора.

Значение  $q_c = f(B)$  в принципе можно вычислить, зная кривую  $B = f(H)$  для данного материала. Однако на практике пользуются данными, полученными непосредственно опытным путем. Кривые  $q_\delta = f(B)$  для шихтованных магнитопроводов также определяются опытным путем, так как в таких магнитопроводах зазоры одного слоя шунтируются листами другого слоя и индукция в зазорах уменьшается, а в листах стали по соседству с зазорами увеличивается, вследствие чего  $q_\delta$  зависит также от марки стали. Кривые  $q_c = f(B)$  и  $q_\delta = f(B)$  представлены на рисунке 2

Так как реактивная намагничивающая мощность трансформатора

$$Q_0 = mEI_{0r} ,$$

где  $m$  – число фаз, то

$$I_{0r} = \frac{Q_0}{mE} = \frac{q_{c\text{ст}}G_{\text{ст}} + q_{c\text{я}}G_{\text{я}} + nq_\delta S_\delta}{mE} . \quad (6)$$

Здесь  $G_{\text{ст}}$  и  $G_{\text{я}}$  – массы стержней и ярем трансформатора, а  $q_{c\text{ст}}$  и  $q_{c\text{я}}$  – удельные мощности  $q_c$  для стержня и ярма.

Обычно пользуются вторым методом расчета.

Магнитные потери в магнитопроводе  $p_{\text{мг}}$  легко вычислить, зная удельные потери  $p = f(B)$  для используемой марки стали:

$$p_{\text{мг}} = p_{\text{ст}}G_{\text{ст}} + p_{\text{я}}G_{\text{я}} . \quad (7)$$

Активная составляющая намагничивающего тока

$$I_{0a} = \frac{p_{\text{мг}}}{mE} = \frac{p_{\text{ст}}G_{\text{ст}} + p_{\text{я}}G_{\text{я}}}{mE} , \quad (8)$$

а полный намагничивающий ток, или ток холостого хода,

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0r}^2}. \quad (9)$$

Ток  $I_0$  в силовых трансформаторах относительно мал и составляет при нормальном напряжении 0,5 – 4% от номинального тока, причем второе число относится к трансформаторам малой мощности (10 – 20 кВ×А). Малое значение тока  $I_0$  объясняется наличием замкнутого стального магнитопровода.

### 3.4 Практическое занятие №4 (2 часа).

#### Тема: «Построение круговой диаграммы АД»

##### 3.4.1 Задание для работы:

Научиться строить круговую диаграмму асинхронного двигателя

##### 3.4.2 Краткое описание проводимого занятия:

Круговая диаграмма асинхронной машины представляет собой геометрическое место концов вектора тока  $\dot{I}_1$ , изменяющегося при изменении скольжения  $s$  в пределах от  $+\infty$  до  $-\infty$ , если при этом напряжение на зажимах статора машины и все ее параметры сохраняют постоянные значения. Ее называют также диаграммой тока. Она дает наглядное представление о важных зависимостях между величинами, характеризующими работу асинхронной машины.

Обратимся к схеме замещения. Введем обозначение:

$$\dot{I}_2'' = -\frac{\dot{I}_2'}{C_1}.$$

Тогда в соответствии со схемой замещения и уравнениями можем написать:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_2''(C_1 r_1 + C_1^2 \frac{r_2'}{s}) + j\dot{I}_2''(C_1 x_1 + C_1^2 x_2').$$

Комплексный коэффициент  $C_1$  согласно равен:

$$C_1 = \frac{Z_1 + Z_{12}}{Z_{12}} = \frac{r_1 + r_{12} + j(x_1 + x_{12})}{r_{12} + jx_{12}} = c_1 e^{j\gamma_1} = c_1 (\cos \gamma_1 + j \sin \gamma_1) \quad (3-171)$$

где

$$c_1 = \sqrt{\frac{(r_1 + r_{12})^2 + (x_1 + x_{12})^2}{r_{12}^2 + x_{12}^2}} \quad (3-172)$$

и

$$\operatorname{tg} \gamma_1 = \frac{r_{12} x_1 - r_1 x_{12}}{r_{12} (r_1 + r_{12}) + x_{12} (x_1 + x_{12})}. \quad (3-173)$$

Подставив в (3-170) значение  $C_1$  по (3-171), будем иметь:

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= \dot{I}_2'' e^{j2\gamma_1} (c_1 r_1 e^{-j\gamma_1} + c_1^2 \frac{r_2'}{s}) + j \dot{I}_2'' e^{j2\gamma_1} (c_1 x_1 e^{-j\gamma_1} + c_1^2 x_2') = \\ &= \dot{I}_2'' e^{j2\gamma_1} [c_1 r_1 (\cos \gamma_1 - j \sin \gamma_1) + c_1^2 \frac{r_2'}{s}] + j \dot{I}_2'' e^{j2\gamma_1} [c_1 x_1 (\cos \gamma_1 - j \sin \gamma_1) + c_1^2 x_2'],\end{aligned}$$

что после преобразований дает:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_2'' r_{дс} e^{j2\gamma_1} + j \dot{I}_2'' x_d e^{j2\gamma_1}, \quad (3-174)$$

где

$$r_{дс} = c_1 [r_1 (\cos \gamma_1 - x_1 \sin \gamma_1) + c_1^2 \frac{r_2'}{s}]; \quad (3-175)$$

$$x_d = c_1 [x_1 (\cos \gamma_1 - r_1 \sin \gamma_1) + c_1^2 x_2']. \quad (3-176)$$

Разделив (3-174) на  $j x_d e^{j2\gamma_1}$ , получим:

$$-j \frac{\dot{U}_1}{x_d} e^{-j2\gamma_1} = \dot{I}_2'' - j \dot{I}_2'' \frac{r_{дс}}{x_d}. \quad (3-177)$$

Три вектора полученного уравнения токов образуют при токе  $\dot{I}_2''$ , соответствующем некоторому скольжению  $s$ , прямоугольный треугольник  $A_c A D$ , представленный на рис. 3-53, где вектор  $\dot{U}_1$  направлен по вертикали. В этом треугольнике катеты  $\overline{A_c A} = \dot{I}_2''$  и  $\overline{A D} = -j \dot{I}_2'' \frac{r_{дс}}{x_d}$ , и гипотенуза  $\overline{A_c D} = -j \frac{\dot{U}_1}{x_d} e^{-j2\gamma_1}$  (в соответствии с обычными соотношениями между параметрами асинхронной машины принято, что угол  $\gamma_1$  имеет отрицательное значение).

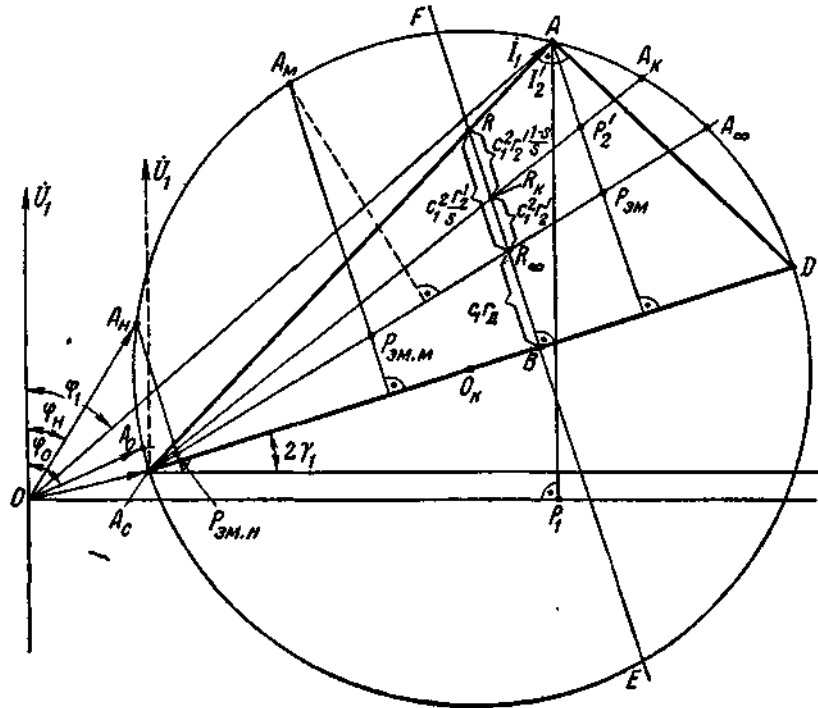


Рис. 3-53. Круговая диаграмма асинхронной машины.

При  $\dot{U}_1 = \text{const}$  отрезок  $\overline{A_c D} = \text{const}$ . Поэтому конец вектора  $\dot{I}_2''$  (вершина прямого угла A) при изменении скольжения  $s$  опишет окружность, имеющую диаметр

$$\overline{A_c D} = \frac{U_1}{x_d}. \quad (3-178)$$

Прибавив к вектору  $\dot{I}_2''$  постоянный вектор  $\overline{0A_c} = \dot{I}_2$  получим вектор первичного тока  $\dot{I}_1 = \overline{0A}$ . Отсюда следует, что конец вектора тока  $\dot{I}_1$  при изменении  $s$  будет скользить по той же окружности, что и вектор  $\dot{I}_2''$ .

Отложим в произвольном масштабе  $\overline{A_cB} = x_d$ ; тогда в том же масштабе  $\overline{BR} = r_{д.с}$ , так как треугольник сопротивлений  $A_cBR$  и треугольник токов  $A_cAD$  подобны. Отрезок  $A_cR$  в масштабе сопротивлений, очевидно, равен  $z_{д.с} = \sqrt{r_{д.с}^2 + x_d^2}$ . Теперь разделим отрезок  $\overline{BR}$  на части:

$$\overline{BR_\infty} = c_1(r_1 \cos \gamma_1 + x_1 \sin \gamma_1) = c_1 r_d;$$

$$\overline{R_\infty R_k} = c_1^2 r_2';$$

$$\overline{R_k R} = c_1^2 r_2' \frac{1-s}{s} \quad (\overline{R_\infty R} = c_1^2 \frac{r_2'}{s})$$

При уменьшении  $s$  точка  $R$  будет скользить вверх по прямой  $EF$ ; соответствующая точка  $A$  будет скользить по окружности влево.

При  $s = 0$  точка  $R$  уходит в бесконечность, точка  $A$  совпадает с точкой  $A_c$ , и мы получаем ток синхронизма  $\dot{I}_c$ .

При увеличении  $s$  точка  $R$  смещается вниз и точка  $A$  скользит вправо; при  $s = 1$  точка  $R$  совпадает с точкой  $R_k$ , а точка  $A$  — с точкой  $A_k$ . Режим работы асинхронной машины при  $s = 1$  по аналогии с трансформатором называется режимом короткого замыкания. Ток  $\dot{I}_k = \overline{0A_k}$  (не показан на рис. 3-53) — ток короткого замыкания.

Дуга  $A_cAA_k$  соответствует работе машины двигателем, так как по ней будет скользить ток  $\dot{I}_1$  при изменении  $s$  от 0 до 1. При дальнейшем увеличении  $s$  от 1 до  $+\infty$  точка  $R$  перемещается вниз, точка  $A$  — вправо и при  $s = +\infty$  точка  $R$  попадает в точку  $R_\infty$ , а точка  $A$  — в точку  $A_\infty$ . Малая дуга  $A_kA_\infty$  соответствует изменению  $s$  от 1 до  $+\infty$  и, следовательно, работе машины тормозом.

При  $s = -\infty$  точка  $R$  также совпадает с точкой  $R_\infty$ , а точка  $A$  — с точкой  $A_\infty$ . При отрицательном  $s$  и при его уменьшении по абсолютной величине точка  $R$  скользит вниз от  $R_\infty$ , а точка  $A$  — вниз от  $A_\infty$ . При  $s = 0$ , как отмечалось, точка  $A$  совпадает с точкой  $A_c$ . Дуга  $A_\infty EA_c$  соответствует изменению  $s$  от  $-\infty$  до 0 и, следовательно, работе машины генератором.

Полученная диаграмма позволяет найти для любого тока  $I_1$  соответствующий ему  $\cos \phi_1$ . Из диаграммы мы можем также получить ряд других величин, характеризующих работу машины.

Проведем через точку  $A$  перпендикулярно оси абсцисс отрезок  $\overline{P_1A}$ . Пусть при построении круговой диаграммы был выбран масштаб для тока  $C_I$ , А/мм. Тогда  $C_I \overline{P_1A} = I_1 \cos \phi_1$ ; где  $\overline{P_1A}$  измеряется в миллиметрах. Умножив полученный активный ток статора на число фаз  $m_1$  и напряжение  $U_1$ , получим электрическую мощность статора:

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \phi_1 = m_1 U_1 C_I \overline{P_1A} = C_p \overline{P_1A}, \quad (3-179)$$

где масштаб для мощности, Вт/мм,

$$C_p = m_1 U_1 C_I. \quad (3-180)$$

Таким образом, перпендикуляр из любой точки диаграммы тока на ось абсцисс, измеренный в масштабе мощности, равен электрической мощности статора. Поэтому ось абсцисс называется линией электрических мощностей  $P_1$ .

Из подобия треугольников  $A_cRR_k$  и  $A_cAP'_2$  следует:

$$\overline{P'_2 A} = \overline{A_c A} \frac{\overline{R_k R}}{\overline{A_c R}}$$

Умножив обе части равенства на масштаб мощности, получим:

$$m_1 U_1 C_1 \overline{P'_2 A} = m_1 U_1 C_I \overline{A_c A} \frac{c_1^2 r_2' \frac{1-s}{s}}{z_{дs}}$$

или

$$C_p \overline{P'_2 A} = m_1 I_2'^2 r_2' \frac{1-s}{s} = P'_2, \quad (3-181)$$

так как

$$\frac{U_1}{z_{дs}} = I_2'' = \frac{I_2'}{c_1} \quad \text{и} \quad C_I \overline{A_c A} = I_2'' = \frac{I_2'}{c_1}$$

Следовательно, линия  $A_c A_\infty$  — линия механических мощностей  $P'_2$ , развиваемых ротором.

Аналогично из подобия треугольников  $A_c R R_\infty$  и  $A_c A P_{эм}$  следует:

$$C_p \overline{P_{эм} A} = m_1 I_2'^2 \frac{r_2'}{s} = P_{эм} \quad (3-182)$$

Следовательно, линия  $A_c A_\infty$  — линия электромагнитных мощностей  $P_{эм}$ ; в то же время это есть линия электромагнитных вращающих моментов  $M$ , так как  $M$  равен

мощности  $P_{эм}$ , деленной на синхронную угловую частоту  $w_1 = \frac{2\pi n_1}{60} = \text{const}$ , Дж,

$$M = \frac{P_{эм}}{w_1} = \frac{C_1}{w_1} \overline{P_{эм} A} \quad (3-183)$$

или, кг·м,

$$M = \frac{C_p}{9,81 w_1} \overline{P_{эм} A} = C_M \overline{P_{эм} A}$$

где масштаб для момента, кг·м/мм,

$$C_M = \frac{60}{9,812 \pi n_1} \cdot C_p = \frac{0,973}{n_1} C_p \quad (3-184)$$

Отрезок  $\overline{P_{эм} P'_2}$ , измеренный в масштабе мощности, равен электрическим потерям в обмотке ротора:

$$C_p \overline{P_{эм} P'_2} = P_{эм} - P'_2 = m_1 I_2'^2 r_2' = P_{э2} \quad (3-185)$$

Согласно (3-69) скольжение

$$s = \frac{P_{э2}}{P_{эм}} = \frac{\overline{P_{эм} P'_2}}{\overline{P_{эм} A}} \quad (3-186)$$

При небольших токах  $I_1$  (например, при  $I_1 < \overline{0A_n}$ ) достаточно точное определение  $s$  по (3-186) затруднительно, поэтому для определения  $s$  применяют особое построение на диаграмме, рассмотренное в § 3-18,б.

При помощи диаграммы можно определить максимальный момент  $M_m$ . Для этого нужно параллельно линии моментов  $A_c A_\infty$  провести касательную к окружности и из точки касания  $A_m$  — перпендикуляр к диаметру  $\overline{A_c D}$  до пересечения с линией  $A_c A_\infty$ , тогда получим, кг·м,

$$M_M = C_M \overline{P_{эм.М}} A_M$$

Обычно асинхронные двигатели рассчитываются таким образом, чтобы  $\cos\varphi_H$  при номинальной нагрузке был равен максимальному (или близок к максимальному). В этом случае ток статора  $I_{1H} = \overline{0A_H}$  будет совпадать с касательной к окружности (или будет близок к ней). Номинальный момент  $M_H = C_M \overline{P_{эм.Н}} A_H$ . Кратность максимального момента (способность к перегрузке)

$$\frac{M_M}{M_H} = \frac{P_{эм.М} A_M}{P_{эм.Н} A_H}$$

Методы построения круговой диаграммы по расчетным или опытным данным и определение с ее помощью рабочих кривых двигателя, характеризующих его рабочие свойства, рассматриваются в § 3-18,б.

При построении рассмотренной круговой диаграммы было принято, что параметры асинхронной машины  $r_1$ ,  $r_2'$ ,  $x_1$ ,  $x_2'$ ,  $r_{12}$ ,  $x_{12}$  остаются без изменения, а изменяется только скольжение  $s$ . Никаких других допущений не делалось. Поэтому представленная на рис. 3-53 диаграмма называется точной круговой диаграммой.

Для обычных случаев, как отмечалось, комплекс  $C_1$  можно заменить его модулем  $s_1$  и принять, следовательно,  $\gamma_1 = 0$ . Тогда построение круговой диаграммы упрощается: ее диаметр расположится на линии, параллельной оси абсцисс; отрезки прямых, определяющие мощности и вращающие моменты, будут перпендикулярны к оси абсцисс. Такая упрощенная круговая диаграмма и используется при исследовании асинхронных машин, если угол  $\gamma_1$  не превышает примерно  $2 \div 3^\circ$ .

### 3.5 Практическое занятие №5 (2 часа).

#### Тема: «Построение внешней характеристики СГ»

##### 3.5.1 Задание для работы:

Научиться строить внешнюю характеристику синхронного генератора.

##### 3.5.2 Краткое описание проводимого занятия:

##### Построение внешних характеристик.

Внешние характеристики синхронного генератора представляют собой зависимости напряжения  $U$  от тока нагрузки  $I_a$  при неизменных токе возбуждения  $I_b$ , угле  $\varphi$  и частоте  $f_1$  (постоянной частоте вращения ротора  $n_2$ ).

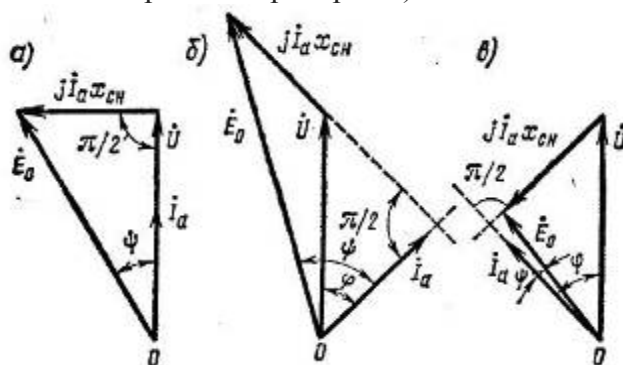


Рис. 1.26 – Упрощенные векторные диаграммы синхронной неявнополюсной машины

Они могут быть построены при помощи векторных диаграмм. Допустим, что при номинальной нагрузке  $I_a$  ном генератор имеет номинальное напряжение  $U_{ном}$ , что достигается соответствующим выбором тока возбуждения. При уменьшении тока нагрузки до нуля напряжение генератора станет равным э.д. с. холостого хода  $E_0$ . Таким образом, векторная диаграмма, построенная при номинальной нагрузке, сразу дает две точки внешней характеристики. Форма внешней характеристики зависит от характера нагрузки, т.е. от угла сдвига фаз  $\varphi$  между  $\dot{U}$  и  $\dot{I}_a$ , так как в зависимости от этого угла изменяется величина вектора  $\dot{E}_0$  (при заданном значении  $U = U_{ном}$ ).

На рис. 1.26 показаны упрощенные векторные диаграммы генератора с неявно выраженными полюсами для активной (а), активно-индуктивной (б) и активно-емкостной (в) нагрузок. При активной и активно-индуктивной нагрузках  $E_0 > U$ ; при активно-емкостной нагрузке  $E_0 < U$ . Таким образом, в первых двух случаях при увеличении нагрузки напряжение генератора уменьшается, в третьем – увеличивается. Это объясняется тем, что при активно-емкостной нагрузке имеется продольная намагничивающая составляющая реакции якоря, а в двух других случаях – продольная размагничивающая (при чисто активной нагрузке угол  $\psi > 0$ ).

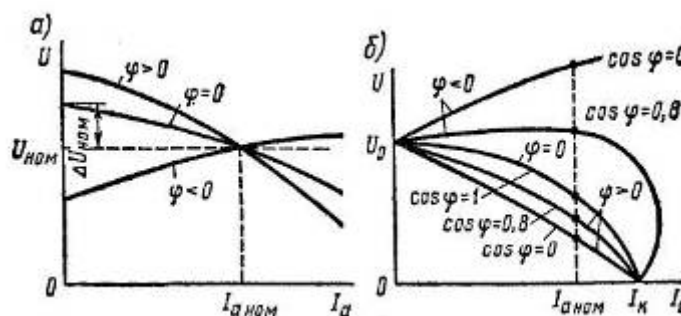


Рис. 1.27 – Внешние характеристики синхронного генератора при различном характере нагрузки

На рис. 1.27 изображены внешние характеристики генератора при различных видах нагрузки, полученные при одинаковом для всех характеристик значении  $U_{ном}$  (а) и при одинаковом значении  $U_0 = E_0$  (б). Во втором случае при  $U = 0$  (короткое замыкание) все характеристики пересекаются в одной точке, соответствующей значению тока короткого замыкания  $I_k$ .

#### Изменение напряжения.

При переходе от режима холостого хода к режиму номинальной нагрузки изменение напряжения характеризуется величиной

$$\Delta u_{\%} = \left[ \frac{(U_0 - U_{ном})}{U_{ном}} \right] 100\% \quad (1.24)$$

Обычно генераторы работают с  $\cos \varphi = 0,9 \div 0,85$  при отстающем токе. В этом случае  $\Delta u\% = 25 \div 35\%$ . Чтобы подключенные к генератору потребители работали при напряжении, близком к номинальному, требуется применять специальные устройства, стабилизирующие его выходное напряжение  $U$ , например быстродействующие регуляторы тока возбуждения. Чем больше  $\Delta u\%$ , тем более сложным получается регулирующее устройство, а поэтому желательно иметь генераторы с небольшой величиной  $\Delta u\%$ . Однако небольшую величину  $\Delta u\%$  можно получить, уменьшая синхронное индуктивное сопротивление  $x_{сн}$  (в неявнополюсных машинах) или соответственно  $x_d$  и  $x_q$  (в явнополюсных машинах), т.е. поток якоря, для чего требуется увеличивать воздушный зазор между ротором и статором. При таком способе уменьшения

$\Delta u\%$  необходимо увеличивать м.д. с. обмотки возбуждения, что заставляет увеличивать размеры этой обмотки и делать в конечном итоге синхронную машину более дорогой.

В мощных турбогенераторах мощность ограничивается именно размерами ротора, на котором размещена обмотка возбуждения. Поэтому в современных турбогенераторах с повышением мощности машины одновременно возрастает и изменение напряжения  $\Delta u\%$ .

В гидрогенераторах (по сравнению с турбогенераторами) воздушный зазор обычно имеет гораздо большую величину, поэтому у них относительно слабее проявляется реакция якоря, т.е. они имеют меньшие синхронные индуктивные сопротивления, выраженные в относительных единицах, что обуславливает и меньшее изменение напряжения  $\Delta u\%$ .

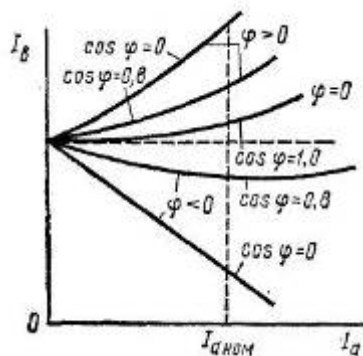


Рис. 1.28 – Регулировочные характеристики синхронного генератора при различном характере нагрузки

#### **Регулировочные характеристики синхронного генератора.**

Эти характеристики (рис. 1.28) представляют собой зависимости тока возбуждения  $I_v$  от тока нагрузки  $I_a$  при неизменных напряжении  $U$ , угле  $\varphi$  и частоте  $f_1$ . Они показывают, как надо изменять ток возбуждения генератора, чтобы поддерживать его напряжение неизменным при изменении тока нагрузки. Очевидно, что при возрастании нагрузки необходимо при  $\varphi > 0$  увеличивать ток возбуждения, а при  $\varphi < 0$  – уменьшать его. Чем больше угол  $\varphi$  по абсолютной величине, тем в большей степени требуется изменять ток возбуждения.

### **3.6 Практическое занятие №6 (2 часа).**

#### **Тема: «Параллельная работа СГ с сетью»**

##### **3.6.1 Задание для работы:**

Изучить особенности параллельной работы синхронного генератора с электрической централизованной сетью.

##### **3.6.2 Краткое описание проводимого занятия:**

**Особенности работы генератора на сеть большой мощности.** Обычно на электростанциях устанавливают несколько синхронных генераторов для параллельной работы на общую электрическую сеть. Это обеспечивает увеличение общей мощности электростанции (при ограниченной мощности каждого из установленных на ней генераторов), повышает надежность энергоснабжения потребителей и позволяет лучше организовать обслуживание агрегатов. Электрические станции, в свою очередь, объединяют для параллельной работы в мощные энергосистемы, позволяющие



наилучшим образом решать задачу производства и распределения электрической энергии. Таким образом, для синхронной машины, установленной на электрической станции или на каком-либо объекте, подключенном к энергосистеме, типичным является режим работы на сеть большой мощности, по сравнению с которой собственная мощность генератора является очень малой. В этом случае с большой степенью точности можно принять, что генератор работает параллельно с сетью бесконечно большой мощности т. е. что *напряжение сети  $U_c$  и ее частота  $f_c$  являются постоянными, не зависящими от нагрузки данного генератора.*

**Включение генератора на параллельную работу с сетью.** В рассматриваемом режиме необходимо обеспечить возможно меньший бросок тока в момент присоединения генератора к сети. В противном случае возможны срабатывание защиты поломка генератора или первичного двигателя.

Ток в момент подключения генератора к сети будет равен нулю, если удастся обеспечить равенство мгновенных значений напряжений сети  $u_c$  и генератора  $u_r$  :

(6.27)

$$U_{cm} \sin(\omega_c t - \alpha_c) = U_{rm} \sin(\omega_r - \alpha_r).$$

На практике выполнение условия (6.27) сводится к выполнению трех равенств: значений напряжений сети и генератора  $U_{cm} = U_{rm}$  или  $U_c = U_r$  ; частот  $\omega_c = \omega_r$  или  $f_c = f_r$  ; их начальных фаз  $\alpha_c = \alpha_r$  (совпадение по фазе векторов  $\dot{U}_c$  и  $\dot{U}_r$ ). Кроме того, для трехфазных генераторов нужно согласовать порядок чередования фаз.

Совокупность операций, проводимых при подключении генератора к сети, называют синхронизацией. Практически при синхронизации генератора сначала устанавливают номинальную частоту вращения ротора, что обеспечивает приближенное равенство частот  $f_c \approx f_r$  а затем, регулируя ток возбуждения, добиваются равенства напряжения  $U_c = U_r$  . Совпадение по фазе векторов напряжений сети и генератора ( $\alpha_c = \alpha_r$ ) контролируется специальными приборами — *ламповым и стрелочными синхроскопами.*

Ламповые синхроскопы применяют для синхронизации генераторов малой мощности, поэтому обычно их используют в лабораторной практике. Этот прибор представляет собой три лампы, включенные между фазами генератора и сети (рис. 6.32, а). На каждую лампу действует напряжение  $\Delta u = u_c - u_r$ , которое при  $f_c \neq f_r$  изменяется с частотой  $\Delta f = f_c - f_r$ , называемой *частотой биений* (рис. 6.32,б). В этом случае лампы мигают. При  $f_c \approx f_r$  разность  $\Delta u$  изменяется медленно, вследствие чего лампы постепенно загораются и погасают.

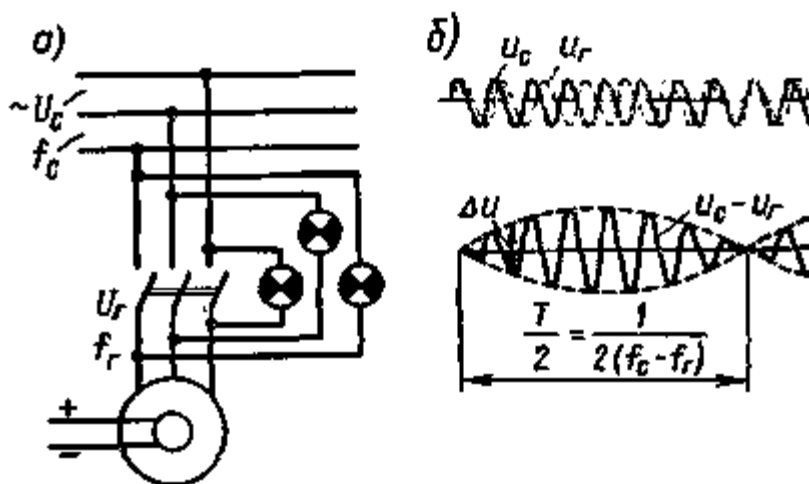
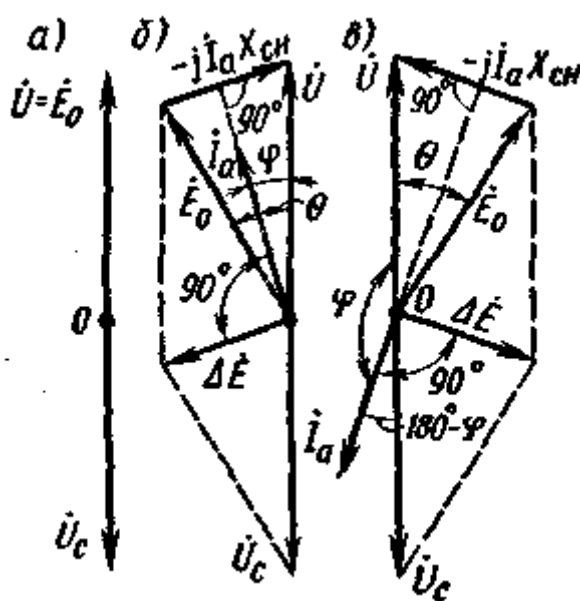


Рис. 6.32.  
Схема подключения синхронного генератора к сети с помощью лампового синхроскопа (а) и кривые изменения напряжений  $u_c$  и  $u_r$  перед включением генератора (б)

Обычно генератор подключают к сети в тот момент, когда разность напряжений  $\Delta u$  на короткое время становится близкой нулю, т. е. в середине периода погасания ламп. В этом случае выполняется условие совпадения по фазе векторов  $\dot{U}_c$  и  $\dot{U}_r$  . Для более точного определения этого момента часто применяют нулевой вольтметр, имеющий растянутую шкалу в области нуля. После включения генератора в сеть дальнейшая

Генераторы большой мощности синхронизируют с помощью стрелочных синхроскопов, работающих по принципу вращающегося магнитного поля. В этих приборах при  $f_c \neq f_r$  стрелка вращается с частотой, пропорциональной разности частот  $f_c - f_r$ , в одну или другую сторону в зависимости от того, какая из этих частот больше. При  $f_c = f_r$  стрелка устанавливается на нуль; в этот момент и следует подключать генератор к сети. На электрических станциях обычно используют автоматические приборы для синхронизации генераторов без участия обслуживающего персонала.

Довольно часто применяют метод самосинхронизации, при котором генератор подключают к сети при отсутствии возбуждения (обмотка возбуждения замыкается на активное сопротивление). При этом ротор разгоняют до частоты вращения, близкой к синхронной (допускается скольжение до 2%), за счет вращающего момента первичного двигателя и асинхронного момента, обусловленного индуктированием тока



в демпферной обмотке. После этого в обмотку возбуждения подают постоянный ток, что приводит к втягиванию ротора в синхронизм. При методе самосинхронизации в момент включения генератора возникает сравнительно большой бросок тока, который не должен превышать  $3,5I_{a\text{ ном}}$ .

**Регулирование активной мощности.** После включения генератора в сеть его напряжение  $U$  установится равным напряжению сети  $U_c$ . Относительно внешней нагрузки напряжения  $U$  и  $U_c$  совпадают по фазе, а по контуру «генератор — сеть» находятся в противофазе, т. е.  $\dot{U} = -\dot{U}_c$  (рис. 6.33, а). При точном выполнении указанных трех условий, необходимых для синхронизации генератора, его ток  $I_a$  после подключения машины к сети равняется нулю. Рассмотрим, какими способами можно регулировать ток  $I_a$  при работе генератора параллельно с сетью на примере неявнополлюсного генератора.

Ток, проходящий по обмотке якоря неявнополюсного генератора, можно определить из уравнения (6.23)

146

$$\dot{I}_a = (\dot{E}_0 - \dot{U}) / (jX_{сн}) = -j(\dot{E}_0 - \dot{U}) / X_{сн}.$$

Так как  $U = U_c = \text{const}$ , то силу тока  $I_a$  можно изменять только двумя способами — изменяя ЭДС  $E_0$  по величине или по фазе. Если к валу генератора приложить внешний момент, больший момента, необходимого для компенсации магнитных потерь мощности в стали и механических потерь, то ротор приобретает ускорение, вследствие чего вектор  $\dot{E}_0$  смещается относительно вектора  $\dot{U}$  на некоторый угол  $\theta$  в направлении вращения векторов (рис. 6.33, б). При этом возникает некоторая небалансная ЭДС  $\Delta \dot{E}$ , приводящая согласно (6.28) к появлению тока  $I_a$ . Возникающую небалансную ЭДС  $\Delta \dot{E} = \dot{E}_0 - \dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{U}_c = j\dot{I}_a X_{сн}$  можно показать на векторной диаграмме (рис. 6.33, б). Вектор тока  $I_a$  отстает от вектора  $\Delta \dot{E}$  на  $90^\circ$ , поскольку его величина и направление определяются индуктивным сопротивлением  $X_{сн}$ .

При работе в рассматриваемом режиме генератор отдает в сеть активную мощность  $P = mUI_a \cos \varphi$  и на вал его действует электромагнитный тормозной момент, который уравнивает вращающий момент первичного двигателя, вследствие чего частота вращения ротора остается неизменной. Чем больше внешний момент, приложенный к валу генератора, тем больше угол  $\theta$ , а следовательно, ток и мощность, отдаваемые генератором в сеть.

Если к валу ротора приложить внешний тормозной момент, то вектор  $\dot{E}_0$  будет отставать от вектора напряжения  $\dot{U}$  на угол  $\theta$  (рис. 6.33, в). При этом возникают небалансная ЭДС  $\Delta \dot{E}$  и ток  $\dot{I}_a$ , вектор которого отстает от вектора  $\Delta \dot{E}$  на  $90^\circ$ . Так как угол  $\varphi > 90^\circ$ , активная составляющая тока находится в противофазе с напряжением генератора. Следовательно, в рассматриваемом режиме активная мощность  $P = mUI_a \cos \varphi$  забирается из сети, и машина работает двигателем, создавая электромагнитный вращающий момент, который уравнивает внешний тормозной момент; частота вращения ротора при этом снова остается неизменной.

Таким образом, для увеличения нагрузки генератора необходимо увеличивать приложенный к его валу внешний момент (т. е. вращающий момент первичного двигателя), а для уменьшения нагрузки — уменьшать этот момент. При изменении направления внешнего момента (если вал ротора не вращать, а тормозить) машина автоматически переходит из генераторного в двигательный режим.

**Регулирование реактивной мощности.** Если в машине, подключенной к сети и работающей в режиме холостого хода (рис. 6.34, а), увеличить ток возбуждения  $I_b$ , то возрастет ЭДС  $E_0$  (рис. 6.34, б), возникнет небалансная ЭДС  $\Delta \dot{E} = -jI_a X_{сн}$  и по обмотке якоря будет проходить ток  $I_a$ , который согласно (6.28) определяется только индуктивным сопротивлением  $X_{сн}$  машины. Следовательно, ток  $\dot{I}_a$  реактивный: он отстает по фазе от напряжения  $\dot{U}$  на угол  $90^\circ$  или опережает на тот же угол напряжение сети  $\dot{U}_c$ . При уменьшении тока возбуждения ток  $\dot{I}_a$  изменяет свое направление: он опережает на  $90^\circ$  напряжение  $\dot{U}$  (рис. 6.34, в) и отстает на  $90^\circ$  от напряжения  $\dot{U}_c$ . Таким образом, при изменении тока возбуждения изменяется лишь реактивная составляющая тока  $I_a$ , т. е. реактивная мощность машины  $Q$ . Активная составляющая тока  $I_a$  в рассматриваемых случаях равна нулю. Следовательно, активная мощность  $P = 0$ , и машина работает в режиме холостого хода.

При работе машины под нагрузкой создаются те же условия: при изменении тока возбуждения изменяется лишь реактивная составляющая тока  $I_a$ , т. е. реактивная мощность машины  $Q$ . Режим возбуждения синхронной машины с током  $I_{в.п}$ , при

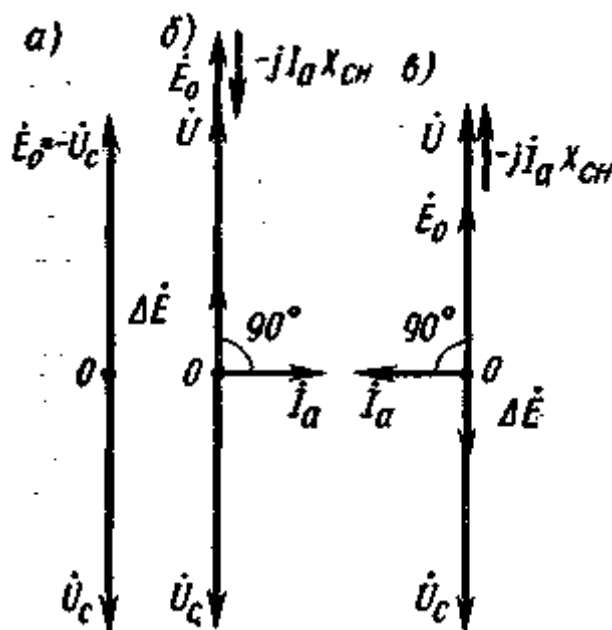


Рис. 6.34. Упрощенные векторные диаграммы неявнополюсного синхронного генератора при параллельной работе с сетью и отсутствии активной нагрузки

котором реактивная составляющая тока  $I_a$  равна нулю, называют режимом полного или нормального возбуждения. Если ток возбуждения  $I_b$  больше тока  $I_{b.п}$ , при котором имеется режим полного возбуждения, то ток  $I_a$  содержит отстающую от  $U$  реактивную составляющую, что соответствует активно-индуктивной нагрузке генератора. Такой режим называют режимом перевозбуждения. Если ток возбуждения  $I_b$  меньше тока  $I_{b.п}$ , то ток  $I_a$  содержит реактивную составляющую, опережающую напряжение  $U$ , что соответствует активно-емкостной нагрузке генератора. Такой режим называют режимом недовозбуждения.

Перевозбужденная синхронная машина, работающая в режиме холостого хода, относительно сети эквивалентна емкости. Машину, специально предназначенную для работы в таком режиме, называют синхронным компенсатором и используют для повышения коэффициента мощности электрических установок и стабилизации напряжения в электрических сетях. Недовозбужденная синхронная машина, работающая в режиме холостого хода, относительно сети эквивалентна индуктивности.

Возникновение реактивной составляющей тока  $I_a$  физически объясняется тем, что при работе синхронной машины на сеть бесконечно большой мощности суммарный магнитный поток сцепленный с каждой из фаз,  $\Sigma\Phi = \Phi_{рез} + \Phi_{\sigma} = \Phi_b + \Phi_a + \Phi_{\sigma}$  не зависит от тока возбуждения и при всех условиях остается неизменным, так как

(6.29)

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{E}_a + \dot{E}_{\sigma a} = -\dot{U}_c = const.$$

Следовательно, если ток возбуждения  $I_b$  больше тока, требуемого для полного возбуждения, то возникает отстающая составляющая тока  $I_a$ , которая создает размагничивающий поток реакции якоря  $\Phi_a$ ; если ток  $I_b$  меньше тока, необходимого для полного возбуждения, то возникает опережающая составляющая тока  $I_a$ , которая создает подмагничивающий поток реакции якоря  $\Phi_a$ . Во всех случаях суммарный поток машины  $\Sigma\Phi$  автоматически поддерживается неизменным.