



Министерство образования Республики Беларусь

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

Кафедра «Теоретические основы электротехники»

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ

Часть 2

**Практическое пособие
по одноименному курсу
по выполнению лабораторных работ
для студентов машиностроительного
и механико-технологического факультетов**

Гомель 2006

УДК 621.3+621.313+621.316.5(075.8)
ББК 31.264.5+32.973.26-04я73
Э45

*Рекомендовано научно-методическим советом
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого*

Автор-составитель: *М. П. Тиличенко, С. А. Грачев, В. В. Соленков*

Рецензент: канд. техн. наук, доц. каф. «Промышленная электроника»
Н. И. Вяхирев

Электротехника, электрические машины и аппараты. Ч. 2 : практ. пособие по одно-
У81 им. курсу по выполнению лаб. работ для студентов машиностр. и мех.-техн. фак. / авт.-
сост.: М. П. Тиличенко, С. А. Грачев, В. В. Соленков. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого,
2006. – 63 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; сво-
бодное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим дос-
тупа: <http://gstu.local/lib>. – Загол. с титул. экрана.

В практическом пособии приведены описания четырех четырехчасовых лабораторных работ, каждая из которых содержит тему, цель работы, теоретические сведения, задание, выполняемое при подготовке, лабораторное задание, контрольные вопросы и требования к содержанию отчета.

Тематика работ соответствует программе второй части курса «Электротехника, электрические машины и аппараты».

Для студентов неэлектротехнических специальностей.

УДК 621.3+621.313+621.316.5(075.8)
ББК 31.264.5+32.973.26-04я73

© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2006

В пособии приведены описания четырех четырехчасовых лабораторных работ, каждая из которых содержит тему, цель работы, теоретические сведения, задание, выполняемое при подготовке, лабораторное задание, контрольные вопросы и требования к содержанию отчета.

Тематика работ соответствует программе второй части курса “Электротехника, электрические машины и аппараты”.

Пособие составлено для студентов неэлектротехнических специальностей ВУЗов дневной и заочной форм обучения.

Вопросы общей организации работы в лабораториях кафедры ТОЭ, правила техники безопасности, требования к подготовке, выполнению, оформлению отчетов и защиты лабораторных работ изложены в первой части пособия.

Лабораторная работа № 9

Трансформаторы

Цель работы:

- изучить назначение, принцип действия, устройство и разновидности трансформаторов;
- исследовать различные режимы работы однофазного трансформатора;
- построить зависимость тока I_1 , КПД η , $\cos \varphi_1$, U_2 от тока I_2 для однофазного трансформатора и определить параметры по экспериментальным данным.

Теоретические сведения

Трансформатор – это статический электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты.

Трансформаторы широко применяются в системах электроснабжения, в радиотехнике, электронике, в измерительной технике, в устройствах автоматического управления и регулирования.

В простейшем случае трансформатор состоит из стального сердечника (магнитопровода) и двух обмоток. К первичной обмотке подводится питающее напряжение U_1 . С вторичной обмотки снимается напряжение U_2 , которое подводится к потребителю электрической энергии. Если $U_2 > U_1$, то трансформатор называют повышающим, а если $U_2 < U_1$, то понижающим.

По типу и конфигурации магнитопровода трансформаторы подразделяются на стержневые и броневые. В стержневых – обмотки, насаженные на стержни, охватывают его, а в броневых – магнитопровод охватывает обмотки, как бы “бронируя” их. Горизонтальные части сердечника называют нижним и верхним ярмом, а вертикальные – стержнями.

Трансформаторы, которые используются в системах электроснабжения, а также в источниках вторичного электропитания электроаппаратов различного назначения называют силовыми.

Повышающие силовые трансформаторы устанавливают около электростанций для обеспечения условий минимизации потерь энергии на ее передачу на большие расстояния по линиям электропередач.

Понижающие силовые трансформаторы устанавливают вблизи потребителей электроэнергии для обеспечения безопасных условий использования этой энергии.

Силовые трансформаторы обозначаются буквенно-цифровым кодом. Например, ТМН560/10 – трехфазный трансформатор с масляным естественным охлаждением, с регулятором напряжения под нагрузкой, мощностью $S = 560$ кВА и $U_{2н} = 10$ кВ.

Более подробная информация об обозначении трансформаторов приведена в справочной литературе (см., например, [1]).

Наряду с силовыми в практической электротехнике широко используются трансформаторы специального назначения, к которым относятся измерительные трансформаторы тока (ТТ) и напряжения (ТН), автотрансформаторы, сварочные трансформаторы и т.п.

Сердечник трансформатора изготавливают из листов трансформаторной электротехнической стали с высоким содержанием кремния. Стальные листы толщиной $0,35 \div 0,5$ мм изолируют друг от друга лаковой или оксидной пленкой для снижения потерь мощности от вихревых токов, замыкающихся в плоскости поперечного сечения каждого листа и вызывающих разогрев сердечника.

Обмотки трансформатора чаще всего изготавливают из медного провода круглого или прямоугольного сечения. Провод, как правило, покрыт эмалью для обеспечения межвитковой изоляции, либо витки укладывают на некотором расстоянии друг от друга. Обмотки также изолируют друг от друга и от магнитопровода.

Переменный ток, проходя по виткам первичной обмотки трансформатора, возбуждает в сердечнике магнитопровода переменный магнитный поток

$$\phi = \Phi_m \sin \omega t, \quad (9.1)$$

который пронизывает витки всех обмоток и (по закону электромагнитной индукции) наводит ЭДС, мгновенные значения которых для первичной и вторичной обмоток равны

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= w_1 \frac{d\phi}{dt} = E_{m1} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \\ e_2 &= w_2 \frac{d\phi}{dt} = E_{m2} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned} \right\}, \quad (9.2)$$

где w_1 , w_2 - число витков первичной и вторичной обмоток трансформатора;

E_{m1} , E_{m2} - амплитудные значения ЭДС в первичной и вторичной обмотках.

При синусоидальном изменении магнитного потока и отсутствии насыщения магнитной системы, действующие значения ЭДС, наводимых в первичной и вторичной обмотках трансформатора, определяются по формулам

$$E_1 = 4,44 w_1 f \Phi_m \text{ и } E_2 = 4,44 w_2 f \Phi_m, \quad (9.3)$$

где f – частота переменного тока.

Отношение ЭДС первичной обмотки трансформатора к ЭДС вторичной его обмотки, равное отношению соответствующих чисел витков обмоток, называется коэффициентом трансформации трансформатора по напряжению

$$K_U = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (9.4)$$

Различают три режима работы трансформатора: режим холостого хода, режим работы под нагрузкой (или нагрузочный режим) и режим короткого замыкания.

В режиме холостого хода вторичная обмотка трансформатора разомкнута и по первичной обмотке протекает ток холостого хода I_0 , значение которого обычно невелико и составляет $4 \div 10$ % от номинального значения.

В соответствии со вторым законом Кирхгофа для первичной и вторичной обмоток трансформатора в режиме холостого хода можно записать следующие уравнения электрического равновесия

$$\underline{U}_1 = \underline{E}_1 + \underline{I}_0 \underline{Z}_1; \quad \underline{U}_2 = \underline{E}_2. \quad (9.5)$$

Пренебрегая падением напряжения $\underline{I}_0 \underline{Z}_1$ ввиду его небольшого значения по сравнению с \underline{E}_1 , можно определить приближенно коэффициент трансформации через действующие значения напряжений

$$K_U = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_2}. \quad (9.6)$$

При этом

$$U_1 \approx E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m. \quad (9.7)$$

Выражение (9.7) позволяет определить амплитудное значение магнитного потока Φ_m , а также магнитную индукцию B_m , если известно сечение S_c сердечника магнитопровода, так как

$$B_m = \frac{\Phi_m}{S_c}. \quad (9.8)$$

Активная мощность P_0 , потребляемая трансформатором в режиме холостого хода, затрачивается на потери мощности в магнитопроводе и электрические потери мощности в первичной обмотке

$$P_0 = P_m + P_{\text{эл}}. \quad (9.9)$$

Так как активное сопротивление R_1 , как и ток I_0 холостого хода трансформатора, обычно невелики, то электрическими потерями можно пренебречь. В результате этого можно принять, что мощность P_0 , потребляемая трансформатором в опыте холостого хода и измеряемая ваттметром, расходуется на потери в магнитопроводе, обусловленные гистерезисом и вихревыми токами

$$P_0 \approx P_m. \quad (9.10)$$

В режиме короткого замыкания вторичная обмотка трансформатора замкнута накоротко, ток I_2 максимален, а $U_2 \approx 0$. Замыкание вторичной обмотки трансформатора накоротко в процессе эксплуатации приводит к тому, что при номинальном напряжении $U_{1н}$, подводимом к первичной обмотке, в обмотках трансформатора возникают весьма значительные токи, которые могут привести к выходу его из строя.

В отличие от аварийного режима короткого замыкания, в процессе исследования трансформатора проводится опыт короткого замыкания с целью определения электрических потерь мощности в проводах обмоток и с целью определения параметров эквивалентной схемы (схемы замещения) трансформатора.

При проведении этого опыта, к первичной обмотке трансформатора подводится такое напряжение $U_{1к}$, при котором в обмотках возникают токи, равные номинальным значениям $I_{1н}$ и $I_{2н}$. Величина $U_{1к}$ снижена (в зависимости от типа трансформатора) в 10-20 раз по сравнению с $U_{1н}$.

Так как $U_{1к} \approx E_{1к} = 4,44 w_1 f \Phi_{mk}$, то магнитный поток Φ_{mk} , а, следовательно, и магнитная индукция B_{mk} трансформатора малы и потому малы магнитные потери (пропорциональные B_m^2) и ими можно пренебречь.

Таким образом, можно считать, что в опыте короткого замыкания вся мощность P_k , потребляемая трансформатором, идет на нагрев обмоток трансформатора, т.е. равна электрическим потерям

$$P_k \approx P_{\Sigma} = I_{1н}^2 R_k, \quad (9.11)$$

где $R_k = R_1 + R_2'$ - активное сопротивление обмоток трансформатора в схеме замещения.

Схемы опытов холостого хода и короткого замыкания приведены на рис. 9.1.

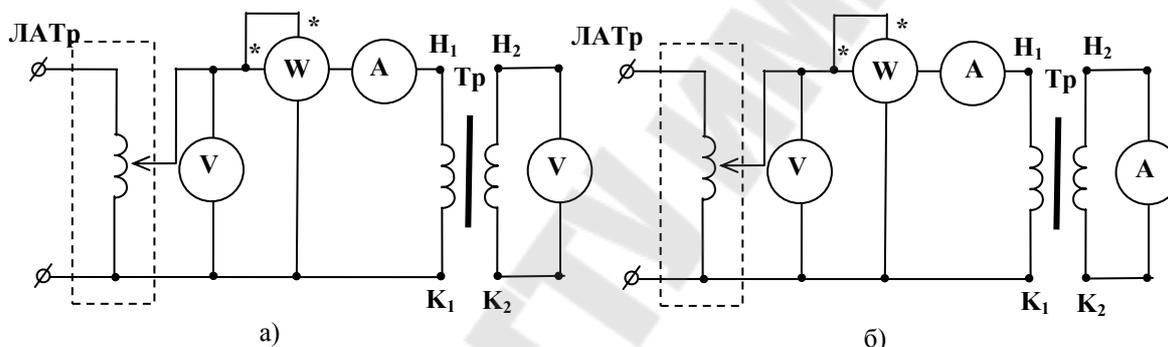


Рис. 9.1. Схемы опытов холостого хода (а) и короткого замыкания (б)

По данным опыта холостого хода P_0 , I_0 , U_1 , U_2 , кроме коэффициента трансформации K_U , определяют коэффициент мощности $\cos \varphi_1 = \frac{P_0}{U_1 I_0}$, а также параметры контура намагничивания эквивалентной схемы трансформатора

$$R_m = \frac{P_0}{I_0^2}; \quad Z_m = \frac{U_1}{I_0}; \quad X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2}. \quad (9.12)$$

По данным опыта короткого замыкания $U_{1к}$, P_k , $I_{1к}$, $I_{2н}$ определяют коэффициент трансформации по току

$$K_I = \frac{I_{2H}}{I_{1K}}. \quad (9.13)$$

коэффициент мощности трансформатора при коротком замыкании

$$\cos \varphi_K = \frac{P_K}{U_{1K} I_{1K}}, \quad (9.14)$$

а также параметры упрощенной схемы замещения трансформатора при коротком замыкании

$$Z_K = \frac{U_{1K}}{I_{1K}}; R_K = R_1 + R'_2 = \frac{P_K}{I_{1H}^2}; X_K = X_1 + X'_2 = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}. \quad (9.15)$$

При включении нагрузки по вторичной обмотке трансформатора протекает ток I_2 , который создает магнитодвижущую силу (МДС), направленную навстречу МДС первичной обмотки.

В соответствии со вторым законом Кирхгофа, уравнения электрического равновесия имеют вид

$$\underline{U}_1 = \underline{E}_1 + \underline{I}_1(R_1 + j X_1); \underline{U}_2 = \underline{E}_2 + \underline{I}_2(R_2 + j X_2). \quad (9.16)$$

Так как падение напряжения на первичной обмотке $I_1 Z_1 = I_1 \sqrt{R_1^2 + X_1^2}$ в пределах I_1 от I_0 до I_{1H} мало по сравнению с E_1 , то можно приближенно считать, что

$$U_1 \approx E_1 = 4,44 w_1 f \Phi_m. \quad (9.17)$$

Из (9.17) следует, что $E_1 = const$ и, следовательно, остается практически постоянным основной магнитный поток Φ_m , замыкающийся по сердечнику, где $U_1 = const$.

С увеличением нагрузки трансформатора ток в первичной обмотке возрастает, компенсируя размагничивающее действие тока вторичной обмотки.

Кроме основного магнитного потока Φ , в трансформаторе имеют место магнитные потоки рассеяния Φ_{1s} и Φ_{2s} . Эти потоки сцеплены только с витками своих обмоток и наводят в них ЭДС рассеяния E_{1s} и E_{2s} .

Кроме указанных выше параметров трансформатора, работа этого аппарата характеризуется рядом параметров и характеристик.

К паспортным относятся следующие величины:

$U_{1н}$ - номинальное первичное напряжение;

$U_{2хх}$ - напряжение холостого хода вторичной обмотки;

S_n - номинальная полная мощность;

$U_k \%$ - напряжение короткого замыкания (в процентах от $U_{1н}$);

P_0, P_k - мощность потерь в опытах х.х. и к.з. ($P_0 = P_{xx}, P_k = P_{kз}$);

$I_{1хх} \%$ - ток первичной обмотки при холостом ходе (в процентах от $I_{1н}$).

Исходя из паспортных данных, определяют значения номинальных токов в каждой из вторичных обмоток и выбирают аппараты защиты трансформатора.

Подводимая к трансформатору мощность $P_1 = U_k I_1 \cos \varphi_1$, а мощность, отдаваемая трансформатором в нагрузку - $P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$.

Разность $P_n = P_1 - P_2$ - потери мощности в трансформаторе.

Величина $\eta = \frac{P_2}{P_1}$ называется коэффициентом полезного действия трансформатора.

Выразив P_1 в виде суммы $P_1 = P_2 + P_0 + P_k$, можно представить η в виде

$$\eta = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_2 I_2 \cos \varphi_2 + P_0 + P_k}. \quad (9.18)$$

Для трехфазного трансформатора это выражение имеет вид

$$\eta = \frac{\sqrt{3} U_2 I_2 \cos \varphi_2}{\sqrt{3} U_2 I_2 \cos \varphi_2 + P_0 + P_k}. \quad (9.19)$$

Наибольшее значение η имеет трансформатор при нагрузке, для которой $P_{ст} = P_{обм}$ или $P_0 = P_9$.

У современных трансформаторов η очень высок и достигает при номинальной нагрузке 95÷99 %.

Вместе с промышленной электросетью трансформатор является источником питания для приемников, подключенных к вторичной обмотке.

Поэтому трансформатор можно рассматривать как активный двухполюсник А (рис. 9.2) относительно выводов вторичной обмотки.

Важнейшей характеристикой трансформатора (как активного двухполюсника) является внешняя вольт-амперная характеристика, представляющая собой зависимость напряжения U_2 на выходе вторичной обмотки (на нагрузке) от тока I_2 при $U_1 = const$.

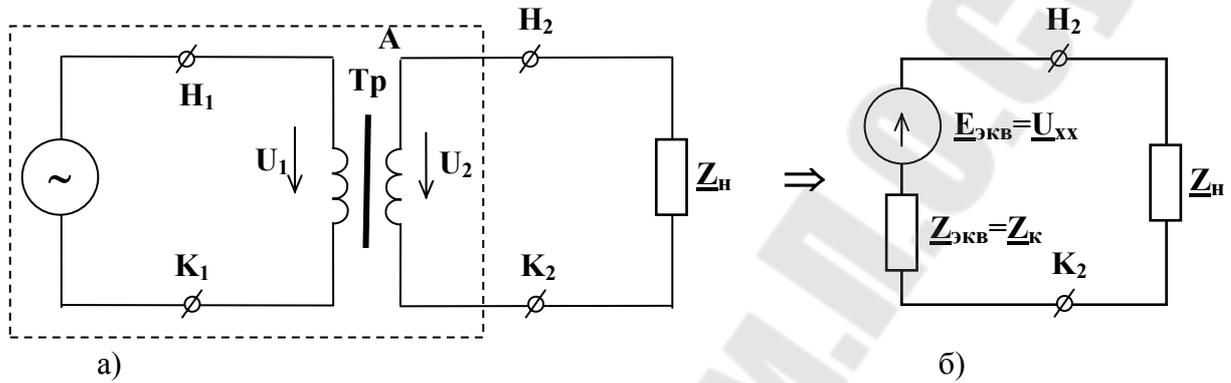


Рис. 9.2. К определению внешней характеристики трансформатора

У идеализированных трансформаторов $U_2 = U_1 / K = const$, т.е. U_2 не зависит от нагрузки, поэтому его вольт-амперная характеристика проходит параллельно оси I_2 (рис. 9.3а, прямая 1). У реального трансформатора существуют ЭДС от полей рассеяния и падение напряжения на вторичной обмотке, поэтому при активно-индуктивных нагрузках U_2 уменьшается с ростом I_2 (рис. 9.3а, кривая 2).

При емкостном характере нагрузки, с ростом I_2 происходит возрастание U_2 (рис. 9.3а, кривая 3).

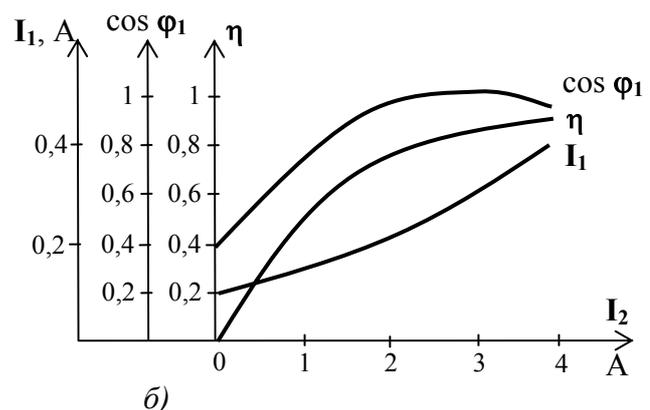
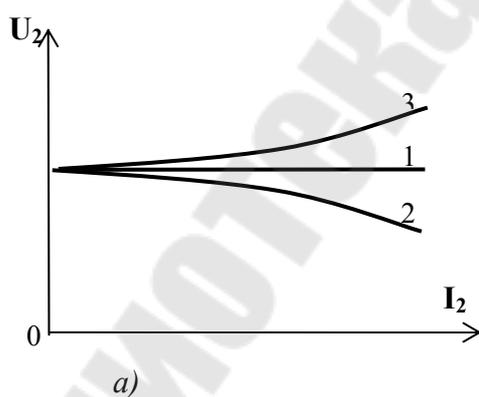


Рис. 9.3. Нагрузочные характеристики трансформатора

К нагрузочным характеристикам относятся также зависимости: $\cos \varphi_1$, η и I_1 от тока I_2 (рис. 9.3б).

Трехфазные трансформаторы преобразуют электрическую энергию в трехфазных цепях с одним соотношением линейных напряжений и токов в электрическую энергию с другим соотношением этих же величин, при неизменной частоте.

Свойства трехфазного трансформатора, как и однофазного, определяются набором номинальных параметров и характеристик, которые также могут быть определены экспериментально, как и для однофазного трансформатора.

Автотрансформаторы находят широкое применение при пуске мощных синхронных и асинхронных электродвигателей, для регулирования напряжения. При экспериментальных работах применяются лабораторные автотрансформаторы (ЛАТРы). Они имеют регулируемый коэффициент трансформации и позволяют плавно, в широких пределах, изменять напряжение U_2 . Обмотки этих трансформаторов рис. 9.4 имеют не только магнитную, но и электрическую связь.

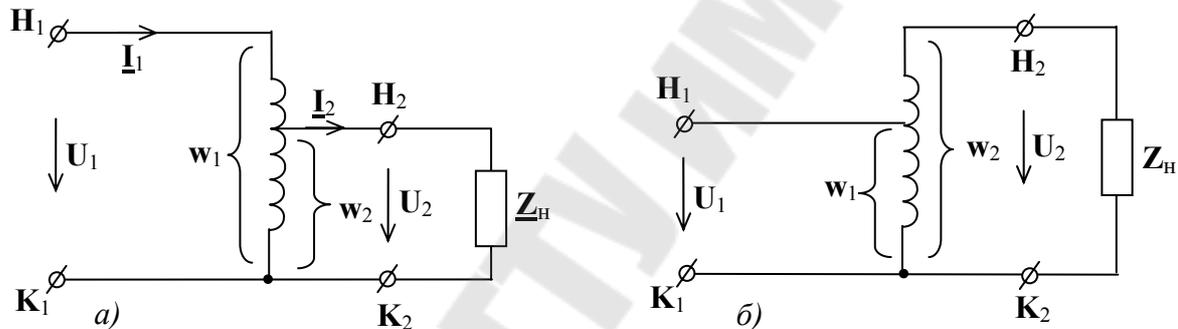


Рис. 9.4. Электрическая схема автотрансформатора:
а) понижающего; б) повышающего

Если пренебречь падениями напряжений в обмотках и током холостого хода, то для обоих автотрансформаторов рис. 9.4 коэффициент трансформации

$$K = \frac{U_{вн}}{U_{вн}} = \frac{w_в}{w_н}.$$

В общей части протекают токи I_1 и I_2 и, так как они находятся в противофазе, то $I_{12} = |I_2 - I_1| = I_1 K - I_1 = I_1 (K - 1)$.

При близких значениях $w_в$ и $w_н$, когда $K \approx 1$, ток I_{12} намного меньше I_1 . По этой причине сечение провода и габариты автотрансформатора меньше, чем у обычного трансформатора той же мощности.

Недостатком автотрансформатора является наличие гальванической связи между обмотками, что приводит к связи вторичной обмотки с контактной сетью, и тем самым ухудшает условия электробезопасности.

Раздел 2. Задание, выполняемое при домашней подготовке.

2.1. По конспекту лекций, рекомендуемой литературе [1÷3] и разделу 1 данной работы изучить назначение, устройство, принцип действия и конструктивные разновидности трансформаторов. Освоить методику экспериментального определения параметров и характеристик однофазного трансформатора.

2.2. Расшифровать марку, выписать номинальные параметры и схему намотки (по [3]) макета однофазного трансформатора ТПП-272-127/220-50.

2.3. Заготовить отчет по требованиям раздела 5.

Раздел 3. Лабораторное задание.

3.1. Собрать электрическую цепь по схеме рис. 9.5 и записать марки приборов.

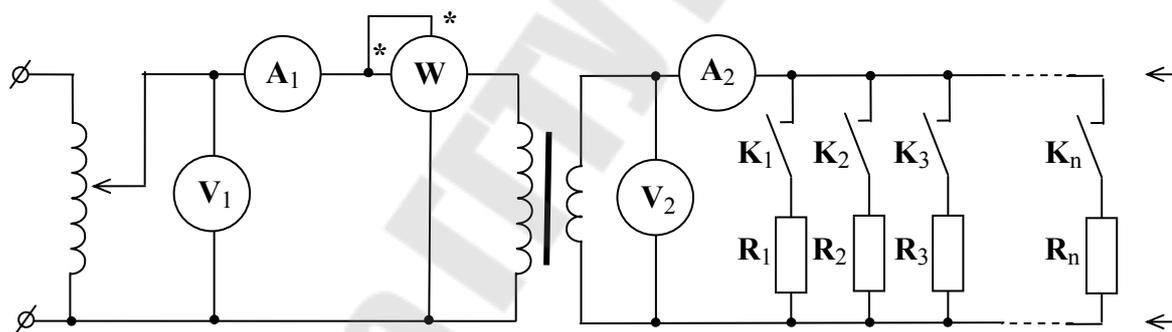


Рис. 9.5. Схема экспериментального исследования характеристик однофазного трансформатора

Состав измерительных приборов указывает преподаватель.

3.2. Подать на первичную обмотку испытуемого трансформатора синусоидальное напряжение $U_n = 220\text{ В}$ от выходных клемм ЛАТРа и снять зависимость показаний приборов для различных нагрузок, последовательно замыкая ключи $K_1, K_2, K_3, \dots, K_n$, начиная с холостого хода, когда все ключи разомкнуты. Результаты измерений занести в таблицу 9.1. Следить за тем, чтобы I_2 не превышал $1,2 I_{2n}$.

Таблица 9.1

№ опыта	Результаты измерений					Результаты расчетов		
	U_1	I_1	P_1	U_2	I_2	P_2	$\cos \varphi_1$	η
	В	А	Вт	В	А	Вт	-	%
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								

3.3. Осуществить опыт короткого замыкания. Для этого:

- установить на выходе ЛАТРа нулевое напряжение и затем закоротить перемычкой (рис. 9.5) клеммы нагрузки;
- плавно увеличивая напряжение от ЛАТРа на первичной обмотке $U_{1к}$ до момента установки тока $I_2 = I_{2н}$, записать показания приборов в таблицу 9.2. Выключить питание установки и убрать перемычку.

Таблица 9.2

Режим работы цепи	Результаты измерения					Расчет	
	$U_{1к}$	$I_{1к}$	U_2	I_2	P_k	$\cos \varphi_k$	K_I
	В	А	В	А	Вт	-	-
короткое замыкание							

Раздел 4. Контрольные вопросы

- 4.1. Объясните назначение и принцип работы трансформаторов.
- 4.2. Как устроен однофазный трансформатор ?
- 4.3. Какие параметры трансформаторов можно определить по данным опыта холостого хода ?
- 4.4. Чем отличается опыт короткого замыкания от режима короткого замыкания ?
- 4.5. Какие параметры трансформатора можно определить по данным опыта короткого замыкания ?
- 4.6. Какие виды потерь энергии имеют место в трансформаторе и от чего они зависят ?
- 4.7. Как маркируются силовые трансформаторы ?
- 4.8. Почему при изменении тока I_2 , изменяется также и ток I_1 ?
- 4.9. Объясните вид внешней характеристики для разных нагрузок.
- 4.10. Как устроен трехфазный трансформатор ?
- 4.11. Что понимается под группой соединения трехфазных трансформаторов ?
- 4.12. Какие разновидности трансформаторов специального назначения вам известны ?
- 4.13. Перечислите достоинства и недостатки автотрансформаторов.
- 4.14. Приведите схемы подключения измерительных трансформаторов.

Раздел 5. Требования к оформлению отчета

Отчет должен содержать:

- титульный лист;
- тему и цель работы;
- схему рис. 9.5 и заполненную таблицу 9.1;
- параметры K_U , R_m , Z_m , X_m , найденные по данным строки 1 из таблицы 9.1;
- графики (по образцу рис. 9.3) нагрузочных характеристик по данным таблицы 9.1;
- параметры R_k , Z_k , X_k (см. 9.15), найденные по данным таблицы 9.2;
- анализ результатов измерений и выводы.

Литература

1. Алиев И.И. Электротехнический справочник. – М.:ИП РадиоСофит, 2004. – 384 с.
2. Волынский Б.А. и др. Электротехника. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 528 с.
3. Акимов Н.Н. и др. Резисторы, конденсаторы, трансформаторы, дроссели, коммутационные устройства РЭА: Справочник. –Мн.: Беларусь, 1994.
4. Грачев С.А., Соленков В.В. Методические указания к лабораторным занятиям по электротехническим курсам. Ч.III. 1987. (М/ук 428).

Лабораторная работа № 10

Асинхронные электродвигатели

Цель работы:

- изучить устройство и принцип действия асинхронных двигателей различного назначения;
- ознакомиться с системой условных обозначений и разметкой выводов статора и ротора;
- освоить методику проверки разметки выводов и методику испытания трехфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором под нагрузкой;
- приобрести навыки запуска и реверсирования асинхронного трехфазного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Теоретические сведения

Асинхронные электродвигатели предназначены для преобразования электрической энергии переменного тока в механическую энергию.

Асинхронные электродвигатели – самые распространенные из всех видов электрических машин из-за их простоты, надежности, меньшего, в сравнении с другими машинами, веса, габарита, стоимости и других критериев.

Промышленностью выпускаются трехфазные, однофазные и универсальные асинхронные двигатели.

Наибольшее применение в качестве двигателей электрического привода получили трехфазные асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым и фазным ротором (ТАД).

Такие двигатели выпускались и выпускаются сериями:

Асинхронные электродвигатели различаются по степени защиты (IP23, IP24), способу охлаждения (IC01, IC014), способу монтажа (IM1001).

IP означает International protection 23- защищенное, 44 – закрытое исполнение. IC- International cooling 01 – машина с самовентиляцией. IM - International mounting. IM1001- машина на лапах с двумя подшипниковыми щитами, с горизонтальным расположением вала.

Начала обмоток статора обозначаются буквами C_1, C_2, C_3 или A_n, B_n, C_n , а концы – буквами C_4, C_5, C_6 или a_k, b_k, c_k . Для соединения обмоток статора звездой или треугольником (при стандартном монтаже выводов на клеммах монтажной коробки) необходимо выводы соединять по схеме рис. 10.1.

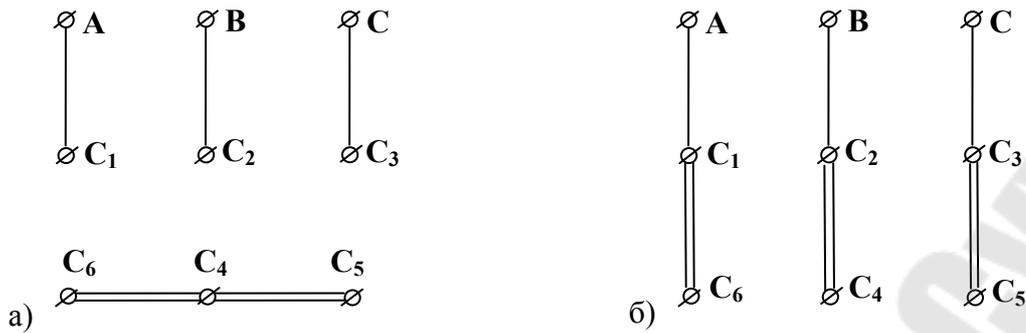


Рис. 10.1. Монтаж выводов обмоток статора АД при соединении звездой (а) и треугольником (б)

Выходы обмоток фазного ротора обозначают буквами P_1, P_2, P_3 .

Вращающееся магнитное поле статора создается за счет пространственного сдвига плоскостей фазных обмоток статора на 120° и запитки этих обмоток трехфазной симметричной системой ЭДС рис. 10.2. При этом магнитное поле может быть двухполюсным или многополюсным, что зависит от числа катушек в каждой фазной обмотке статора [1].

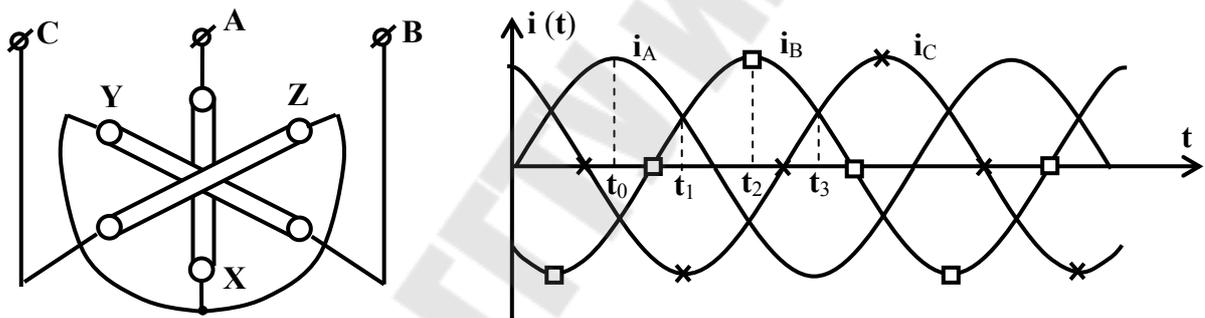


Рис. 10.2. Схема соединения обмоток статора звездой (а) и токи в обмотках (б) при питании трехфазной симметричной системой ЭДС

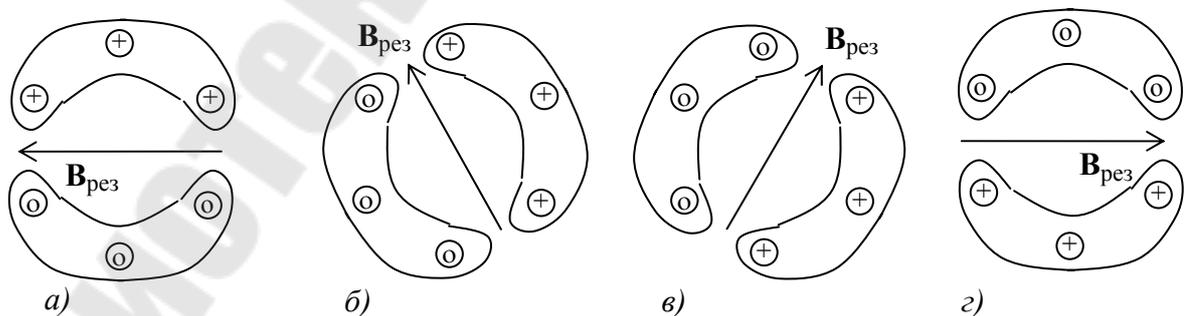


Рис. 10.3. Формирование двухполюсного вращающегося магнитного поля в статоре трехфазного АД

На рис. 10.3 приведены картины магнитного поля для разных моментов времени. Если ω - угловая частота, то угол поворота вектора

$B_{\text{рез}} : \alpha = \omega(t - t_0)$, где $\omega = 2\pi f$. За время $t = T$, т.е. периоду, ось вектора $B_{\text{рез}}$ займет первоначальное положение, т.е. магнитное поле сделает один оборот $\alpha = \omega T = 2\pi f \frac{1}{f} = 2\pi$.

В рассмотренном примере число полюсов $2P=2$, а магнитное поле вращается с частотой $n_1 = 60 f_1 = 60 \cdot 50 = 3000$ об/мин. Направление вращения магнитного поля совпадает с порядком чередования фаз $A \rightarrow B \rightarrow C$.

Если поменять местами выводы любых двух фаз, то направление вращения поля и ротора двигателя будет обратным. Рассмотренное поле эквивалентно полю двухполюсного электромагнита, поэтому трехфазный двигатель, обмотки которого создают такое поле, называется двухполюсным.

Если число катушек в каждой фазе увеличить, а сдвиг фаз между токами в фазах сохранить в 120° , то частота вращения магнитного поля изменится и станет равной

$$n_1 = 60 \frac{f_1}{p}, \quad (10.1)$$

где p – число пар полюсов. В таблице 10.1 приведены значения n_1 для различных p .

Таблица 10.1

p	1	2	3	4	5	6	8	10
n_1 , об/мин	3000	1500	1000	750	600	500	375	300

В рабочем режиме ротор АД вращается с числом оборотов $n_2 < n_1$, поэтому магнитное поле статора скользит относительно ротора с числом оборотов $n_S = (n_1 - n_2)$ об/мин.

Относительное отставание ротора от вращающегося магнитного поля статора характеризуется скольжением

$$S = \frac{n_S}{n_1} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{\Omega_1 - \Omega_2}{\Omega_1}. \quad (10.2)$$

где $\Omega_1 = 2\pi \frac{n_1}{60} = \frac{\omega_1}{p}$, $\Omega_2 = 2\pi \frac{n_2}{60} = \frac{\omega_2}{p}$ – угловая частота вращения магнитного поля статора и частота вращения ротора;

$\omega_1 = 2\pi f_1$, $\omega_2 = 2\pi f_{2S}$ – угловая частота тока статора и ротора.

Для большинства современных АД скольжение ротора при номинальной нагрузке составляет $(2 \div 6)\%$, т.е. $S = 0,02 \div 0,06$, а при работе на холостом ходе – доли процента. При заторможенном роторе ($n_2 = 0$), скольжение максимально и равно единице ($S = 1$).

График зависимости $M(S)$ приведен на рис.10.4. Точка $S = 0$, $M = 0$ соответствует идеальному холостому ходу двигателя, а точка $M_{ном}$, $S_{ном}$ – номинальному режиму. Участок НК графика соответствует механической перегрузке двигателя. В точке K момент достигает максимального значения и называется критическим моментом. Скольжение $S_{кр}$, соответствующее критическому моменту называется критическим скольжением.

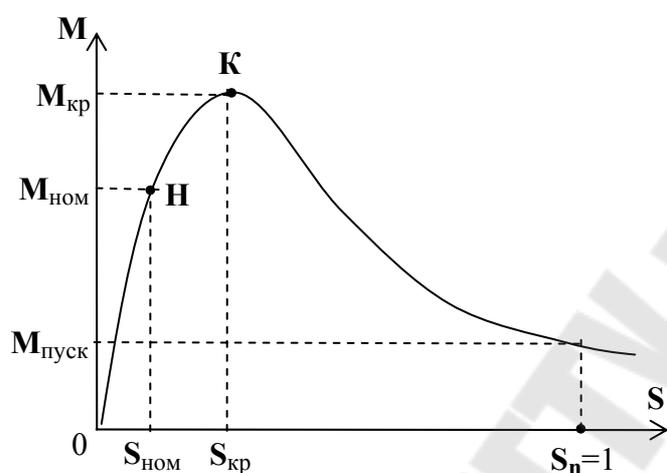


Рис. 10.4. Зависимость момента M АД от скольжения S

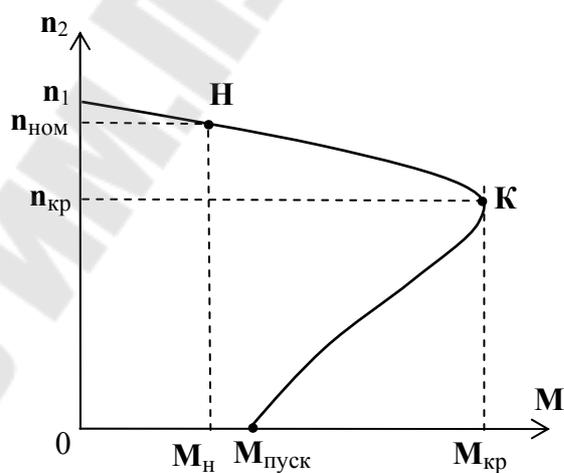


Рис. 10.5. Механическая (скоростная) характеристика АД

При практических расчетах обычно определяют момент, развиваемый АД для заданного скольжения S , пользуясь приближенной формулой Клосса

$$M = \frac{2 M_{кр}}{\frac{S_{кр}}{S} + \frac{S}{S_{кр}}} \quad (10.3)$$

Зная $S_{кр}$ и $M_{кр}$ и учитывая связь числа оборотов ротора n_2 со скольжением по соотношению

$$n_2 = n_1(1 - S), \quad (10.4)$$

можно рассчитать и построить механическую характеристику асинхронного двигателя, под которой понимается зависимость числа оборотов ротора n_2 от момента нагрузки на валу M рис. 10.5.

От ее характера (вида) зависит пригодность АД для привода различных рабочих механизмов. Для многих станков, к примеру, требуется, чтобы эта характеристика была “жесткой”, т.е. чтобы n_2 изменялось незначительно при изменении нагрузки. В то же время рабочие механизмы, работающие при резко изменяющихся нагрузках (прессы, краны, ножницы) требуют быстрого изменения частоты вращения двигателя.

Зависимости момента M , развиваемого двигателем, потребляемой мощности P_1 , коэффициента мощности $\cos \varphi_1$, коэффициента полезного действия η , скольжения ротора S , тока статора I_1 от полезной мощности, т.е. от мощности P_2 на валу двигателя являются рабочими характеристиками асинхронного двигателя рис. 10.6. Эти характеристики снимаются при $U = const$ и $f = const$.

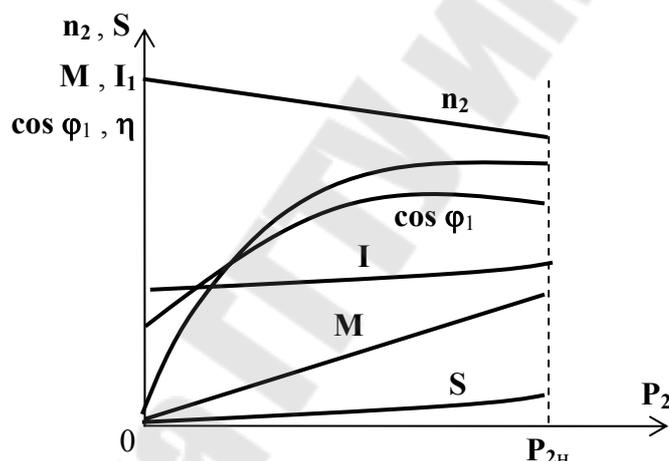


Рис. 10.6. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Мощность P_2 на валу можно регулировать и определять с помощью электромагнитного тормоза, в котором величина тормозного момента регулируется изменением тока возбуждения (постоянного тока, питаемого обмотки электромагнита). При этом тормозной момент

$$M = m g l \sin \alpha, \quad (10.5)$$

где m – масса груза, l – длина подвеса, $g = 9,8 \text{ м/с}^2$;

α - угол отклонения стрелки от вертикального положения.

Как правило, M отсчитывают по заранее отградуированной шкале в Н·м, а мощность на валу рассчитывают по формуле

$$P_2 = \frac{M \cdot n_2}{9550}, \text{ кВт}, \quad (10.6)$$

где n_2 - измеряемая тахогенератором частота вращения ротора, об/мин.

В качестве регулируемой нагрузки может быть использован также генератор постоянного тока, сопряженный с валом ротора испытуемого ТАД. При этом в якорной цепи генератора включается последовательно амперметр с регулировочным реостатом. Шкала амперметра может быть отградуирована в единицах тормозного момента, т.е. в Н·м.

Коэффициент мощности АД определяют по формуле

$$\cos \varphi = \frac{P_\phi}{U_\phi I_\phi} = \frac{P_1}{\sqrt{3} U_\lambda I_\lambda}, \quad (10.7)$$

а коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}. \quad (10.8)$$

К паспортным данным АД относятся следующие величины:

- тип двигателя;
- номинальные линейные напряжения U_1^Δ / U_1^Y ;
- номинальная механическая мощность на валу $P_{2ном}$;
- схема соединения обмоток статора (звезда Y или треугольник Δ);
- номинальная частота вращения n_2 , соответствующая $P_{2н}$;
- номинальные КПД η_n и $\cos \varphi_n$.

Эти данные позволяют выбрать двигатель по заданной статической нагрузке, рассчитать линию его питания и выбрать пускозащитные аппараты.

Кроме того, в справочной литературе приводятся кратность пускового момента $m = \frac{M_n}{M_n}$, кратность максимального момента $m_{max} = \frac{M_{кр}}{M_n}$, а

также кратность пускового тока $i = \frac{I_n}{I_n}$.

В двигателях с шестью выводами обмоток статора указывают два значения линейных напряжений и токов $U_{1н}$ и $I_{1н}$ (в числителе – при соединении треугольником, а в знаменателе – при соединении звездой).

Вопросы запуска трехфазного АД, быстрой остановки его (тормозные режимы), а также регулирования частоты вращения ротора в данной лабораторной работе не рассматриваются. Эти вопросы освещены, например, в [3].

В схемах автоматического управления, в бытовой аппаратуре, в приводах механизмов малой мощности находят широкое применение однофазные асинхронные электродвигатели, которые питаются от сети однофазного тока.

Трехфазные АД с короткозамкнутым ротором также часто используются в режиме однофазного запуска.

2. Задание, выполняемое при домашней подготовке

2.1. По лекциям, рекомендуемой литературе [1÷3] и разделу 1 данной работы изучить назначение, устройство, принцип действия и разновидности асинхронных электрических двигателей.

2.2. Ознакомиться с системой условных обозначений и разметкой выводов статорных и роторных обмоток асинхронных электродвигателей.

2.3. Освоить методику экспериментального определения начал и концов обмоток статора (по разделу 3).

2.4. Освоить способы прямого запуска и реверсирования АД с короткозамкнутым ротором при соединении обмоток статора звездой и треугольником.

2.5. Освоить методику лабораторного испытания трехфазных АД под нагрузкой с применением электромагнитного тормоза или машины постоянного тока в качестве регулируемой нагрузки.

2.6. Заготовить отчет по требованиям раздела 5.

3. Лабораторное задание

3.1. Переписать с таблички, укрепленной на корпусе асинхронного двигателя, его марку и все указанные параметры. Пояснить смысл всех приведенных там обозначений и величин.

3.2. Используя фазоуказатель, с помощью преподавателя проверить правильность разметки выводов трехфазных блоков питания 220 В и 380 В.

3.3. Произвести разметку концов обмоток статора, выведенных на клеммник. Для этого:

- собрать цепь рис. 10.7а, подсоединив один из зажимов вольтметра и один конец провода щупа от лабораторного автотрансформатора к двум любым зажимам клеммника двигателя;

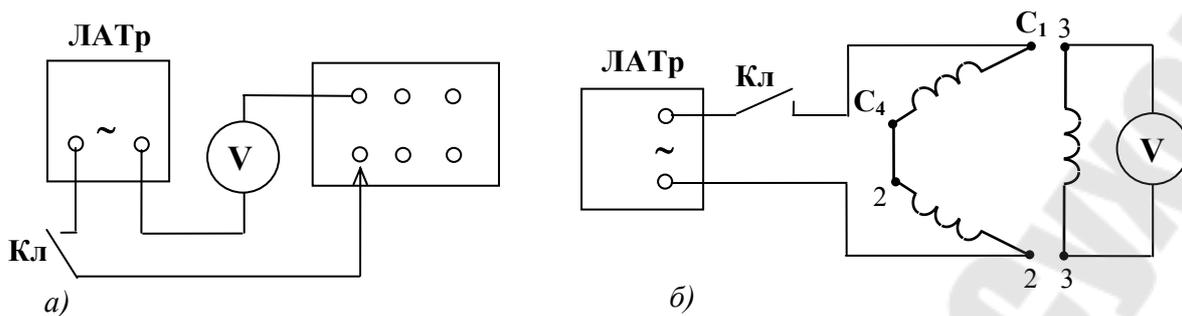


Рис. 10.7. Схемы цепей для определения начал и концов обмоток статора АД

- включив питание автотрансформатора, и установив напряжение на его выходе, не превышающее установленного предела вольтметра и U_n ТАД, замкнуть ключ Кл (включить тумблер) и коснуться щупом по очереди всех выводов обмотки, кроме вывода, к которому подключен вольтметр. Отклонение стрелки вольтметра укажет на то, что в цепь включилась одна из трех обмоток статора. Эти выводы следует обозначить, например, цифрами 1 и 1. Аналогично находят выводы фаз второй 2-2 и третьей 3-3 обмотки;

- собрать цепь по схеме рис. 10.7б, соединив первую и вторую обмотки последовательно, а к третьей подключить вольтметр. При этом выводы первой обмотки следует переобозначить буквами C_1 и C_4 . Включив питание автотрансформатора, плавно увеличивая выходное напряжение, следует наблюдать за стрелкой вольтметра. Если она отклонится, то зажим C_4 первой фазы будет соединен с началом, т.е. с зажимом C_2 второй фазы, а если не отклонится – то с зажимом C_5 второй фазы. Разметить вторую фазу буквами C_2 и C_5 (рекомендуется использовать вольтметр многопредельный);

- повторить предыдущий пункт, подав питание от автотрансформатора на последовательно соединенные первую и третью обмотки, а вольтметр подключить ко второй обмотке.

3.4. Произвести запуск и реверсирование асинхронного электродвигателя при соединении статорных обмоток звездой рис. 10.8а и треугольником рис. 10.8б. Перед включением убедиться, что номинальное линейное напряжение, подаваемое от источника трехфазного напряжения не превышает допустимое для каждой схемы соединения значение. Измерить и записать в протокол U_d , I_d и направление вращения ротора с посадочной стороны вала. Реверсирование производить после выключения питания путем смены местами проводов на выходных клеммах В и С трехфазного источника .

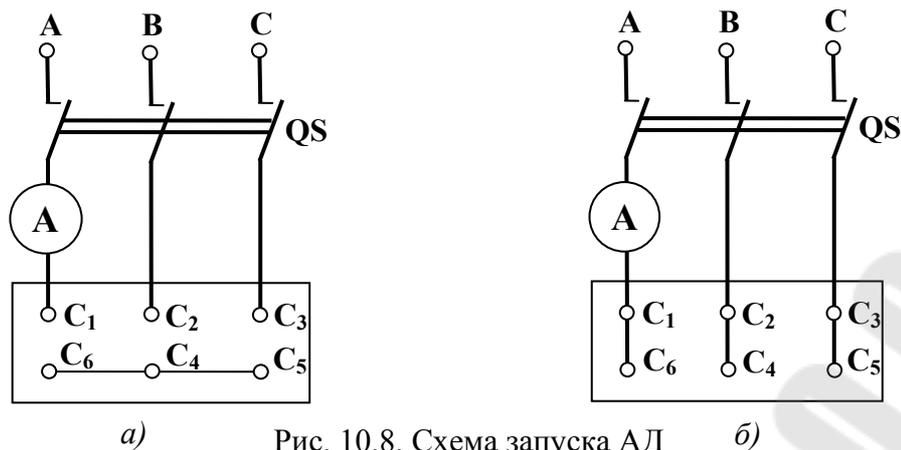


Рис. 10.8. Схема запуска АД

- 3.5. Исследовать работу АД под нагрузкой. Для этого следует:
- собрать схему рис. 10.9а с применением измерительного комплекта К505, либо набора приборов (по указанию преподавателя);
 - собрать цепь питания электромагнитного тормоза рис. 10.10а, либо схему регулировки момента нагрузки на основе генератора постоянного тока рис. 10.10б и установить момент $M = 0$ (ключ $K_{л}$ разомкнут);
 - ЛАТр установить в положение минимума $U_{вых}$, либо $R_{н}$ в цепи якоря установить на максимальное сопротивление и, зашунтировав перемычками токовые цепи амперметра и ваттметра в цепи статора, произвести запуск АД;
 - убрать перемычки и снять зависимость показаний измерительных приборов от момента M на валу, регулируя величину момента ЛАТром, либо реостатом $R_{н}$. Число оборотов определять с помощью тахометра. Данные занести в таблицу 10.1.

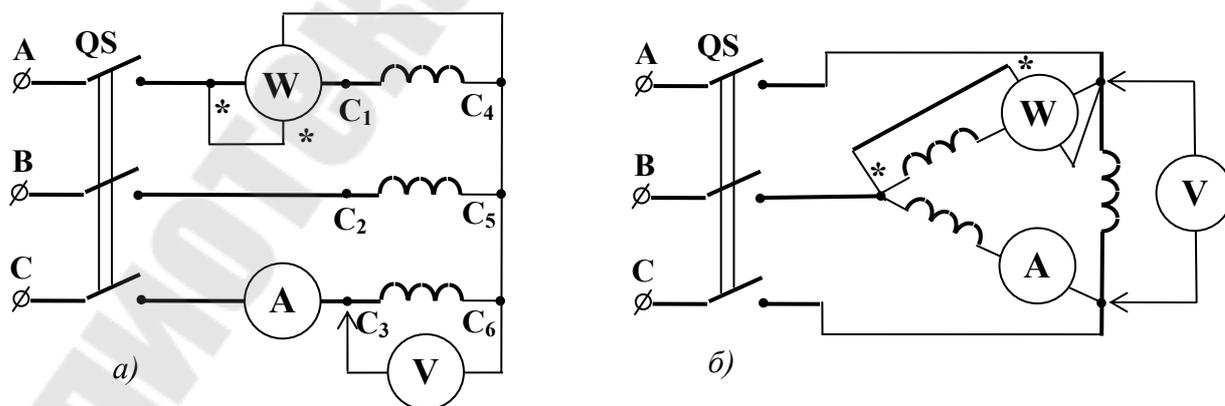


Рис. 10.9. Схема включения статорных обмоток АД при его лабораторном испытании под нагрузкой

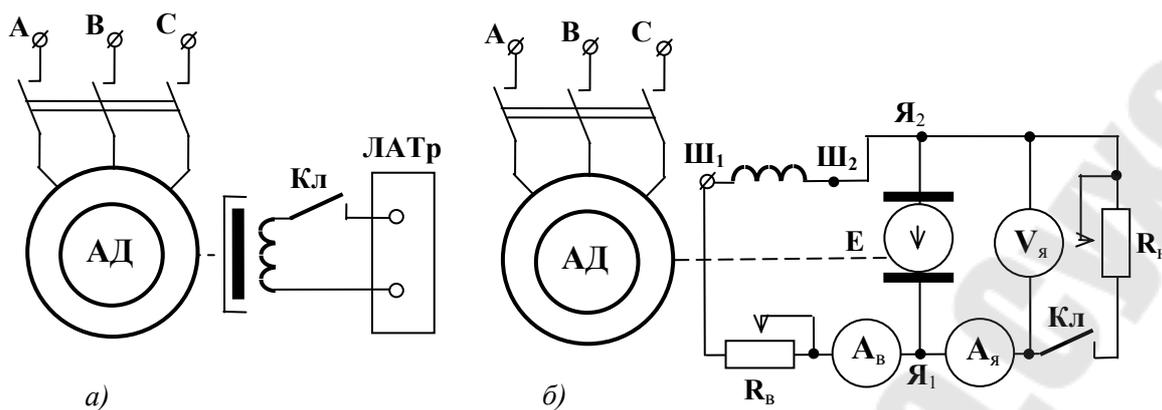


Рис. 10.10. Цепь регулировки момента M на валу АД

Таблица 10.1

№	Измерение					Вычисления				
	I_{ϕ} , А	U_{ϕ} , В	P_{ϕ} , Вт	n_2 , об/мин	M , Нм	$\cos \varphi_1$	P_1 , Вт	P_2 , Вт	η	S
1										
2										
3										
4										
5										
6										

4. Контрольные вопросы

- 4.1. Как устроен ТАД и какие разновидности АД вам известны ?
- 4.2. Какие физические явления лежат в основе работы ТАД ?
- 4.3. Какие данные приводятся на табличках, укрепляемых на корпусе ТАД ?
- 4.4. Как обозначаются выводы статорных обмоток ТАД с короткозамкнутым ротором и выводы якорных обмоток ТАД с фазным ротором ?
- 4.5. Каковы основные условия получения вращающегося магнитного поля и что понимается под явлением, названным диск Араго-Ленца ?
- 4.6. От чего зависит частота вращения ротора ТАД ?
- 4.7. Что такое скольжение и в каких пределах эта величина изменяется ?
- 4.8. Запишите формулу Клосса и определите по ней величину пускового момента M_n .
- 4.9. Что понимается под механической характеристикой ТАД ?

4.10. Приведите графики $M(S)$ и $n_2(M)$ и укажите на них точки M_n , M_n , $M_{кр}$.

4.11. Как изменить направление вращения ТАД ?

4.12. Что понимается под рабочими характеристиками ТАД, как они экспериментально снимаются и как используются при выборе электродвигателя для электропривода ?

4.13. Приведите схемы запуска ТАД от трехфазной и однофазной сети.

4.14. Чем объяснить значительное превышение пусковых токов в сравнении с I_n и какие способы снижения пусковых токов применяются ?

5. Требования к содержанию отчета

Отчет должен содержать:

5.1. Титульный лист.

5.2. Цель работы.

5.3. Краткие письменные ответы на контрольные вопросы.

5.4. Результаты выполнения лабораторного задания в виде схем опытов, полученных данных и рабочих характеристик рис. 10.4, 10.5, 10.6 ТАД. При этом величины P_1 , P_2 , η , S и $\cos \varphi_1$ вычисляются по данным измерений по формулам

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_\phi}{U_\phi I_\phi}, P_1 = 3 P_\phi, P_2 = \frac{M n_2}{9,55}, \eta = \frac{P_2}{P_1}, S = 1 - \frac{n_2}{n_1}.$$

5.5. Анализ результатов и выводы.

Литература

1. Волынский Б.А. и др. Электротехника. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 528 с.
2. Алиев И.И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию: Учебное пособие для студентов ВУЗов. – М.: Высшая школа, 2000. – 255 с.
3. Алиев И.И. Электротехнический справочник. – М.: ИП РадиоСофт, 2004. – 384 с.

Лабораторная работа № 11

Электрические машины постоянного тока

Цель работы:

- изучить назначение, устройство, принцип действия, конструктивные разновидности машин постоянного тока (МПТ), их параметры и характеристики;
- ознакомиться с условными обозначениями МПТ, выпускаемых электротехнической промышленностью, а также разметкой выводов обмоток якоря и обмоток возбуждения;
- приобрести навыки запуска, реверсирования и регулирования частоты вращения ротора (якоря) МПТ в режиме двигателя;
- освоить методику лабораторного испытания МПТ в режиме двигателя и в режиме генератора.

1. Теоретические сведения

Машины постоянного тока, как и асинхронные машины, чаще используются в режиме двигателя, т.е. служат для преобразования электрической энергии постоянного тока в механическую энергию. Кроме того, МПТ довольно широко используются и в режиме генератора, преобразуя механическую энергию вращательного движения ротора в электрическую энергию. В этом режиме МПТ применяются очень широко в качестве возбуждателей мощных синхронных генераторов, устанавливаемых на электростанциях, а также в качестве источников цеховых сетей постоянного тока, для зарядки аккумуляторов, в мобильных маломощных электрогенераторах и т.д.

В режиме двигателя, МПТ широко применяются в электротранспорте (электровозы, троллейбусы, трамваи, электрокары и т.п.), так как позволяют в широких пределах регулировать частоту вращения, развивают большие пусковые моменты. Кроме того, МПТ применяются в подъемно-транспортных устройствах, для привода компрессоров, строгальных станков и т.п.

Машина постоянного тока состоит из статора и вращающейся части – ротора, называемого в МПТ якорем. Статор состоит из станины, служащей корпусом и магнитопроводом МПТ, главных и дополнительных полюсов электромагнитов с обмотками, через которые пропускают постоянный ток (ток возбуждения), подшипниковых щитов, закрывающих корпус

с торцов и центрирующих на подшипниках якорь, и щеточной траверсы со щетками.

Дополнительные полюса устанавливаются между основными и служат для улучшения условий коммутации. На траверсе закреплены пальцы, электрически изолированные от траверсы. На пальцах устанавливают щеткодержатели со щетками из графита или смеси графита с медью.

Якорь состоит из сердечника, обмотки и коллектора. Магнитопровод сердечника набирается из листов электротехнической стали. В продольные пазы магнитопровода укладываются секции обмоток, концы которых припаиваются к пластинам коллектора. Токопроводящие медные пластины коллектора располагают по цилиндрической поверхности и изолируют друг от друга и от вала якоря миканитовыми прокладками. К коллекторным пластинам прижимаются щетки, к которым в режиме ДПТ подводится постоянное напряжение от источника питания, а в режиме генератора подключается внешняя нагрузка. Таким образом, МПТ обладает свойством обратимости.

Как и асинхронные двигатели, машины постоянного тока выпускаются сериями. Ранее выпускаемые ДПТ серии 2П заменяются новой серией 4П, которые по ряду конструктивных особенностей (сборочным единицам, способу охлаждения, защиты и т.д.) унифицированы с асинхронными машинами серии 4А и АИ.

Выводы обмоток статора и ротора МПТ маркируются по ГОСТ 187074 следующим образом:

Я1, Я2 – выводы обмоток якоря;

К1, К2 – выводы компенсационной обмотки;

Д1, Д2 – выводы обмоток дополнительных полюсов;

С1, С2 – выводы последовательной (сериесной) обмотки возбуждения;

Ш1, Ш2 – выводы параллельной (шунтовой) обмотки возбуждения.

Свойства и характеристики МПТ зависят главным образом от схемы включения обмотки главных полюсов. По этому признаку МПТ делятся на машины с независимым возбуждением, с параллельным, последовательным и смешанным (параллельно-последовательным) возбуждением.

В МПТ с независимым возбуждением обмотка возбуждения питается от отдельного источника постоянного напряжения. В машинах с параллельным возбуждением обмотка возбуждения и обмотка якоря включены параллельно и питаются от одного источника.

В МПТ с последовательным возбуждением $I_{\text{в}}$ и $I_{\text{я}}$ равны, так как обмотка возбуждения и якорь соединяются последовательно.

В МПТ со смешанным возбуждением содержится две обмотки возбуждения, одна из которых соединена с якорем последовательно, а вторая – параллельно.

Для трех последних схем включения, при работе МПТ в режиме генератора говорят о самовозбуждении, так как в этом случае обмотка возбуждения питается от зажимов якоря самого генератора.

1.1. Работа МПТ в режиме двигателя

Работа МПТ в режиме ДПТ характеризуется следующими параметрами и зависимостями:

- механической мощностью на валу P_2 ;
- питающим напряжением U ;
- потребляемым током I ;
- током якоря $I_{я}$;
- током возбуждения I_{σ} ;
- частотой вращения n ;
- электромагнитным моментом $M_{\text{э.м}}$.

Зависимости между этими величинами описываются уравнениями:

$$M_{\text{э.м}} = C_m I_{я} \phi \quad (11.1)$$

- уравнение развиваемого ДПТ электромагнитного момента;

$$U = E_{np} + R_{я} I_{я} \quad (11.2)$$

- уравнение электрического состояния, где

$$M_{\text{э.м}} = M_c + M_n \quad (11.3)$$

- уравнение равновесия моментов в установившемся режиме работы двигателя,

где M_c - момент сопротивления на валу, создаваемый нагрузкой;

M_n - момент потерь, создаваемый всеми видами потерь в двигателе;

C_m - конструктивный коэффициент момента, зависящий от конструкции обмотки якоря и числа полюсов ДПТ;

$I_{я}$ - ток якоря в двигателе;

ϕ - магнитный поток одной пары главных полюсов электродвигателя.

$$E_{np} = C_e \phi n \quad (11.4)$$

- противо ЭДС, т.е. ЭДС, которая наводится в обмотке вращающегося якоря и направленная против тока якоря;

C_e - конструктивный коэффициент ЭДС;

n – частота вращения якоря электродвигателя.

Электромагнитный момент в ДПТ возникает в результате взаимодействия тока якоря с магнитным потоком обмотки возбуждения.

Важнейшими из характеристик ДПТ являются следующие зависимости:

- механическая характеристика $n(M_c)$ зависимость частоты вращения от момента на валу при $U = const$ и $I_g = const$;
- регулировочная $n(I_g)$;
- скоростная $n(I_a)$;
- рабочие характеристики – зависимость M, P, n, I, η от P_2 при $U = const$ и при $R_g = const$.

Механическая характеристика может быть естественной и искусственной. Под естественной понимается характеристика, снятая при отсутствии в схеме каких-либо дополнительных сопротивлений, например, реостатов в цепи якоря или возбуждения.

Под искусственной понимается характеристика, снятая при наличии реостатов.

Уравнение механической характеристики может быть получено из выражения для ЭДС МПТ

$$E_{np} = C_e \phi n,$$

где $E_{np} = U - I_a R_e$ и, следовательно,

$$n = \frac{U - I_a R_e}{C_e \phi}. \quad (11.5)$$

Заменив I_a из выражения для электромагнитного момента $I_a = \frac{M_{э.м.}}{C_m \phi}$, получим уравнение механической характеристики

$$n = \frac{U}{C_e \phi} - \frac{R_a}{C_e C_m \phi^2} M_{э.м.} \quad (11.6)$$

1.1.1. ДПТ параллельного возбуждения

Электрическая схема этого ДПТ приведена на рис. 11.1. Обмотка якоря и обмотка возбуждения включены параллельно друг другу.

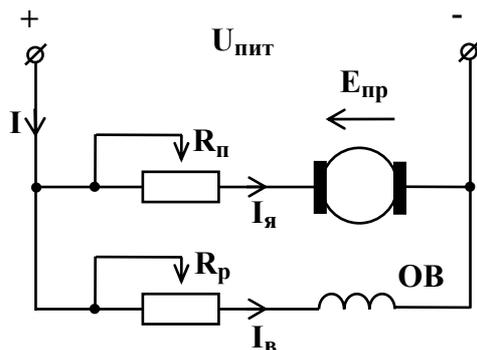


Рис. 11.1. Электрическая схема ДПТ с параллельным возбуждением

I – потребляемый двигателем ток;

$I_я$ - ток якоря;

$I_в$ - ток возбуждения.

$$I = I_я + I_в. \quad (11.7)$$

Частоту вращения ДПТ параллельного возбуждения регулируют изменением магнитного потока главных полюсов (R_p), изменением тока якоря $I_я$ ($R_я$), изменением $U_{пит}$ (рис. 11.2).

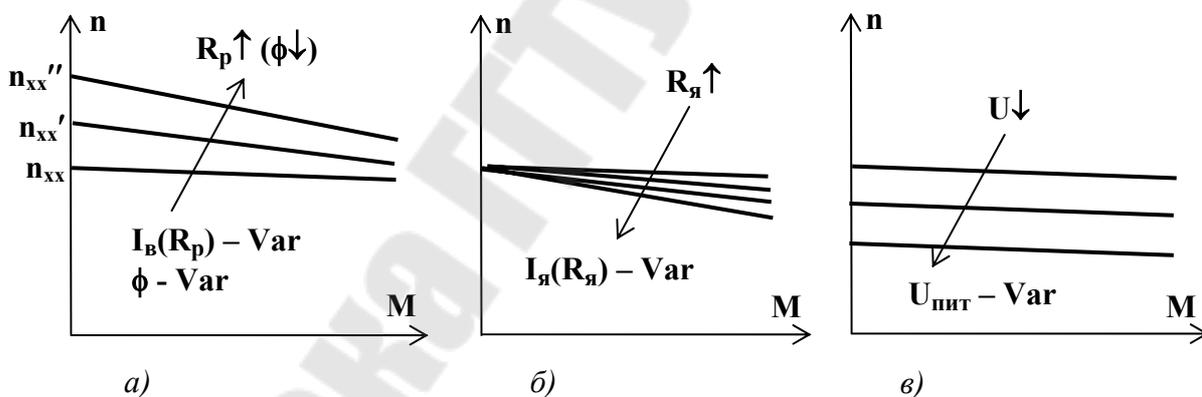


Рис. 11.2. Способы регулировки частоты вращения якоря ДПТ параллельного возбуждения

Регулировочная характеристика ДПТ параллельного возбуждения $n = f(I_в) = \frac{U - I_я R_я}{C_e \phi}$ приведена на рис. 11.3. При обрыве цепи возбуждения магнитный поток Φ минимален и равен остаточному потоку. При этом n настолько возрастает, что ротор может механически разрушиться за счет сил инерции. Такое явление называется разносом двигателя.

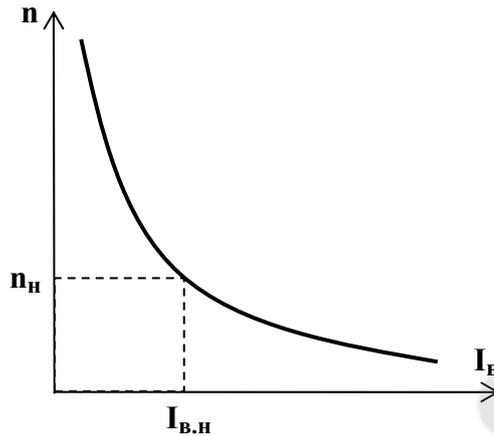


Рис. 11.3. Регулировочная характеристика ДПТ

1.1.2. ДПТ последовательного возбуждения

Электрическая схема этого типа двигателя приведена на рис. 11.4. Из рисунка следует, что $I = I_{я} = I_{\phi}$.

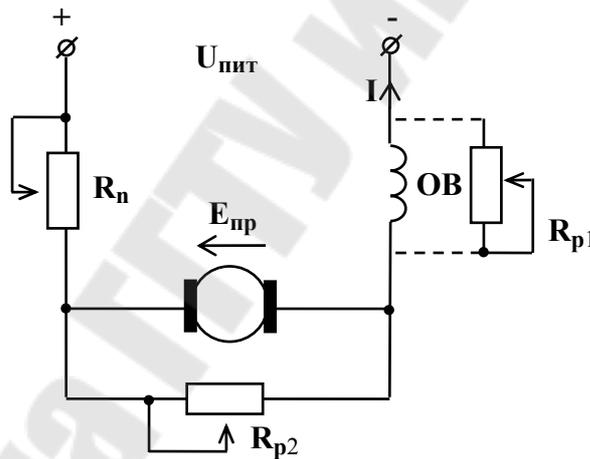


Рис. 11.4. Электрическая схема ДПТ с последовательным возбуждением

График механической характеристики приведен на рис. 11.5. При изменении $M = M_{\text{э.м}}$, частота вращения резко изменяется. Такая характеристика называется мягкой. При $M \rightarrow 0$, n неограниченно растет, и двигатель идет вразнос.

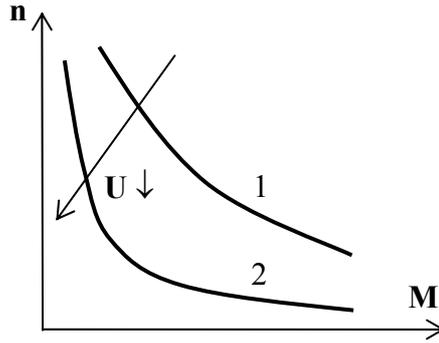


Рис. 11.5. Механическая характеристика ДПТ с последовательным возбуждением

Режим генераторного (рекуперационного) торможения невозможен, так как $n_{\text{хх}} \rightarrow \infty$.

1.1.3. ДПТ смешанного возбуждения

Электрическая схема этого типа ДПТ содержит две обмотки возбуждения рис. 11.6 – последовательную ОВ2 и параллельную ОВ1. Эти обмотки намотаны на одни и те же главные полюсы. Обмотки ОВ1 и ОВ2 могут быть включены согласно или встречно. Чаще МДС обмотки ОВ1 больше, чем МДС обмотки ОВ2 и обмотки включаются между собой согласно.

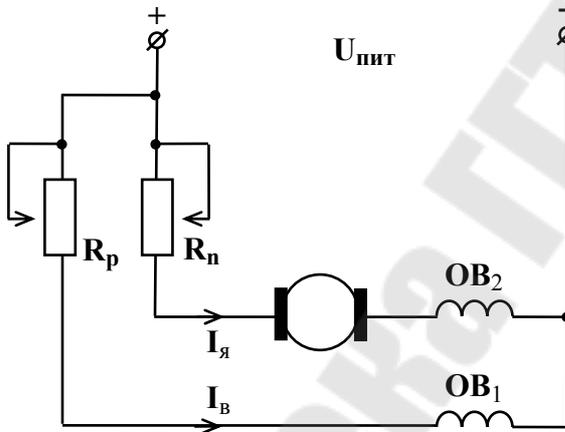


Рис. 11.6. Электрическая схема ДПТ со смешанным возбуждением

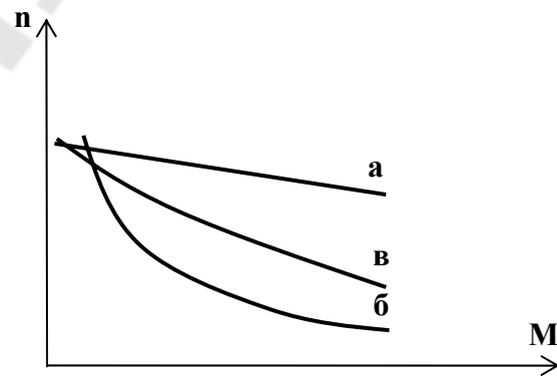


Рис. 11.7. Механическая характеристика ДПТ:
а) параллельного возбуждения;
б) последовательного возбуждения;
в) смешанного возбуждения

Механическая характеристика рис. 11.7в расположена между характеристикой ДПТ параллельного возбуждения рис. 11.7а и последовательного возбуждения рис. 11.7б. Такая характеристика позволяет получить значительный пусковой момент и исключает возможность “разноса” двигателя при холостом ходе (при $M \rightarrow 0$). Варьируя МДС обмоток возбуждения, получают любую промежуточную механическую характеристику.

Рабочие характеристики ДПТ с параллельным возбуждением приведены на рис. 11.8а.

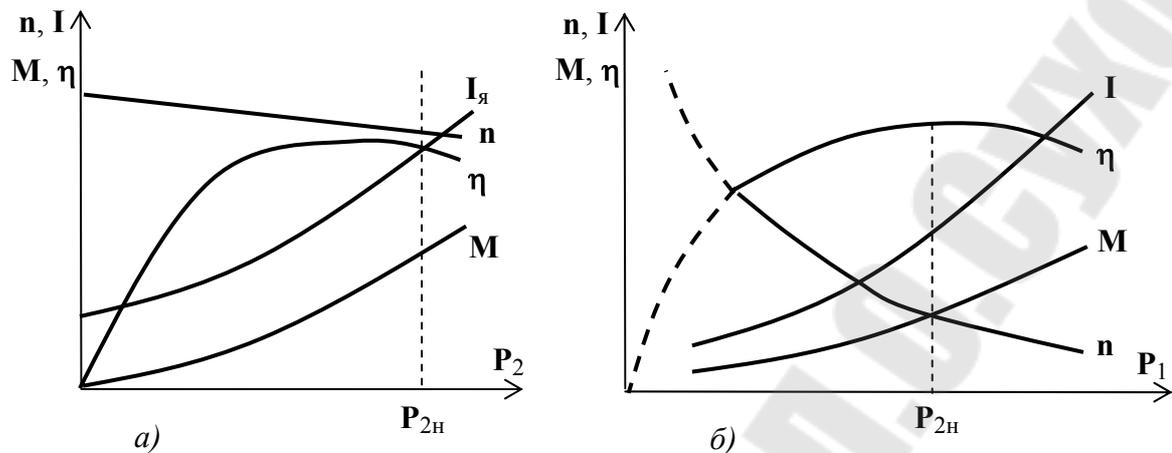


Рис. 11.8. Рабочие характеристики ДПТ с параллельным (а) и последовательным (б) возбуждением

Рабочие характеристики для ДПТ с последовательным возбуждением приведены на рис. 11.8б. Отличие этих характеристик объясняется тем, что с изменением нагрузки на валу (P_2) происходит также изменение и магнитного потока.

Рабочие характеристики ДПТ со смешанным возбуждением занимают в системе координат некоторое среднее положение между характеристиками ДПТ с параллельным и последовательным возбуждением.

1.2. Работа МПТ в режиме генератора

Генератор постоянного тока (ГПТ) преобразует механическую энергию в энергию постоянного тока.

Генератор состоит из трех основных частей: индуктора, якоря и коллектора. Индуктор предназначен для создания магнитного поля и расположен на статоре. Как и у ДПТ, вращающаяся часть ГПТ, называется якорем.

Принцип действия ГПТ основан на законе электромагнитной индукции. При вращении якоря приводным двигателем, вследствие пересечения проводниками обмотки якоря магнитного поля полюсов, в соответствии с законом электромагнитной индукции, в обмотке якоря наводится ЭДС.

В зависимости от типа используемого при этом приводного двигателя различают турбогенераторы, гидрогенераторы, мотогенераторы и т.п.

ЭДС, возникающая в каждом проводнике обмотки якоря, является переменной $e = f(t)$, так как она изменяется во времени по величине и направлению и зависит от положения проводников в межполюсном про-

странстве. Для получения на зажимах генератора постоянной во времени ЭДС предназначен коллектор, расположенный на вращающемся якоре, с системой неподвижных щеток, расположенных на статоре машины.

Генераторы постоянного тока, в зависимости от способа возбуждения, делятся на генераторы с независимым возбуждением и генераторы с самовозбуждением.

На практике в основном применяют генераторы с самовозбуждением, имеющие более простую конструкцию и легкость эксплуатации. Из этого класса ГПТ наиболее широко в настоящее время применяют генераторы с параллельным возбуждением рис. 11.9.

При работе в режиме генератора электрическая машина выполняет функции источника энергии, поэтому возникающий в цепи якоря ток $I_{я}$ совпадает по направлению с индуцированной в нем ЭДС E . Из рис. 11.9 видно, что

$$I_{я} = I + I_{\epsilon}. \quad (11.8)$$

Обмотку возбуждения генераторов с параллельным возбуждением выполняют из большого количества витков тонкого провода. Это позволяет получить необходимые для создания требуемого магнитного потока ампервитки при относительно небольшом токе возбуждения I_{ϵ} . Для современных МПТ ток возбуждения составляет около 1÷5% от номинального тока якоря $I_{я}$.

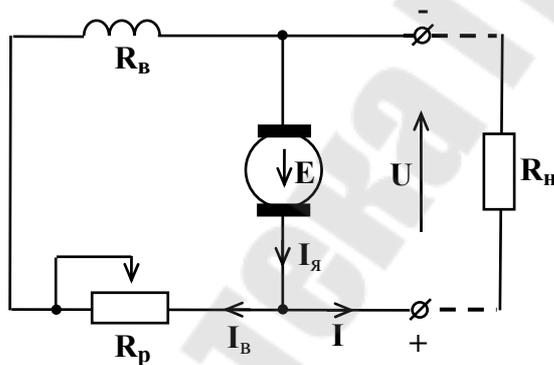


Рис. 11.9. Электрическая схема ГПТ с параллельным возбуждением

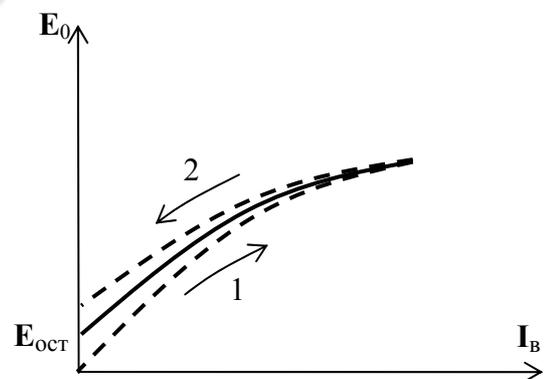


Рис. 11.10. Характеристика холостого хода ГПТ с параллельным возбуждением

Работа МПТ в режиме генератора характеризуется следующими параметрами и зависимостями:

- вырабатываемой мощностью P ;
- напряжением на выходе (на зажимах якоря) U ;

- током возбуждения I_g ;
- током якоря I_y или нагрузки I ;
- частотой вращения якоря n .

Зависимости между этими величинами описываются двумя уравнениями:

- уравнением ЭДС

$$E = C_e n \phi; \quad (11.9)$$

- уравнением электрического состояния цепи якоря

$$U = E - R_y I_y. \quad (11.10)$$

Основными характеристиками, определяющими свойства ГПТ, являются

- характеристика холостого хода (XXX) – зависимость ЭДС на зажимах якоря от тока возбуждения, при токе нагрузки равном нулю (при разомкнутой цепи нагрузки) и постоянной частоте вращения якоря, равной номинальной, т.е.

$$E = f(I_g) \left| \begin{array}{l} I = 0 \\ n_n = const \end{array} \right. \quad (11.11)$$

- внешняя характеристика – зависимость напряжения на зажимах обмотки якоря от тока нагрузки I при постоянном сопротивлении в цепи обмотки возбуждения и номинальной частоте вращения, т.е.

$$U = f(I) \left| \begin{array}{l} R_g = const \\ n_n = const \end{array} \right. \quad (11.12)$$

- регулировочная характеристика – зависимость тока возбуждения I_g от тока нагрузки I_n при $n = n_{ном} = const$, при которой обеспечивается постоянство напряжения U на зажимах генератора, т.е.

$$I_g = f(I) \left| \begin{array}{l} U = const \\ n_n = const \end{array} \right. \quad (11.13)$$

Характеристика холостого хода ГПТ с параллельным возбуждением рис. 11.10 представляет собой совокупность двух расходящихся ветвей 1 и 2. Ветвь 1 (восходящая) соответствует увеличению тока возбуждения I_g от нуля, а ветвь 2 (нисходящая) – его уменьшению. При $I_g = 0$ (цепь ОВ разомкнута), ЭДС E_0 холостого хода не равна нулю, что обусловлено нали-

чим в магнитной системе машины остаточного магнитного потока $\phi_{ост}$, при этом $E_{ост} = C_e n \phi_{ост}$.

По мере увеличения I_g магнитная система ГПТ насыщается, и характеристика выходит на почти горизонтальный участок. При обратном изменении I_g (т.е., при уменьшении I_g) характеристика идет по ветви 2, не совпадающей с ветвью 1, что обусловлено гистерезисом. Чем ближе расположены друг к другу ветви 1 и 2, тем меньше потери на гистерезис.

При расчете и исследовании свойств МПТ обычно используют практическую кривую ХХХ, за которую принимают среднюю линию (сплошная линия на рис. 11.10).

Уравнение, описывающее внешнюю характеристику (10.10) ГПТ с параллельным возбуждением с учетом соотношения $I \approx I_{я}$ запишется в виде

$$U = E - R_{я} I. \quad (11.14)$$

Если при этом принять, что $E = const$, то внешняя характеристика генератора с параллельным возбуждением представится в виде прямой 1, параллельной оси абсцисс рис. 11.11.

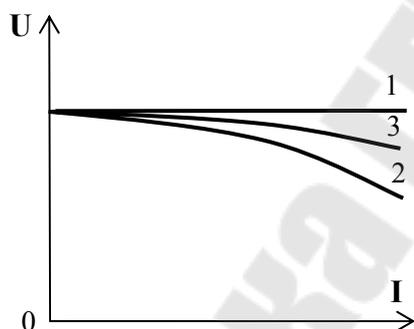


Рис. 11.11. Внешняя характеристика ГПТ с параллельным возбуждением

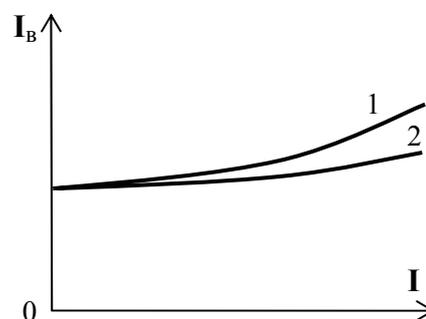


Рис. 11.12. Регулировочная характеристика ГПТ с параллельным возбуждением

В реальных генераторах $E \neq const$ вследствие размагничивающего действия поля якоря (при подключении нагрузки) на основное поле, созданное током возбуждения (реакция якоря).

Вследствие этого влияния уменьшается результирующий магнитный поток ϕ . С увеличением тока нагрузки увеличивается падение напряжения $I_{я} R_{я}$ на обмотке якоря. По этим причинам уменьшается ток возбуждения

I_{ϕ} , магнитный поток, и, как следствие – напряжение на зажимах якоря, т.е. на выходе генератора (кривая 2 на рис. 11.11).

Регулировочная характеристика рис. 11.12 показывает возможность поддержания на выходе генератора постоянного напряжения. Для этого при увеличении тока нагрузки следует увеличивать ток возбуждения (кривая 1).

Генератор постоянного тока с независимым возбуждением возбуждается от независимого внешнего источника постоянного тока, а его свойства такие же, как и генераторов с параллельным возбуждением. Внешняя характеристика такого генератора оказывается более жесткой (рис. 11.11, кривая 3), а регулировочная характеристика – более пологой (рис. 11.12, кривая 2).

Находят также применение и выпускаются промышленностью ГПТ с последовательным и смешанным возбуждением. Их характеристики существенно отличаются от рассмотренных выше и описаны в литературе [1].

Такие генераторы целесообразно использовать в условиях частых коротких замыканий (например, для питания дуговых сварочных машин).

2. Задание, выполняемое при домашней подготовке

2.1. По лекциям, рекомендуемой литературе [1, 2] и разделу 1 данной работы изучить назначение, устройство, принцип действия и разновидности машин постоянного тока.

2.2. Ознакомиться с условными обозначениями МПТ, маркировкой выводов обмоток возбуждения и якоря, изучить параметры и характеристики МПТ для режима двигателя и генератора.

2.3. Освоить способы пуска, реверсирования и регулирования частоты вращения якоря ДПТ с параллельным возбуждением и независимым возбуждением.

2.4. Заготовить отчет по требованиям раздела 5.

3. Лабораторное задание

3.1. Переписать с табличек, закрепленных на ДПТ и ГПТ спарки, марки и все указанные параметры. Пояснить смысл всех приведенных параметров. Занести в протокол схему разметки выводов обмоток возбуждения и якоря.

3.2. Исследовать работу МПТ в режиме двигателя. Для этого:
- собрать схему рис. 11.13. запитав обмотку якоря ДПТ от регулируемого выпрямителя на основе ЛАТРа;

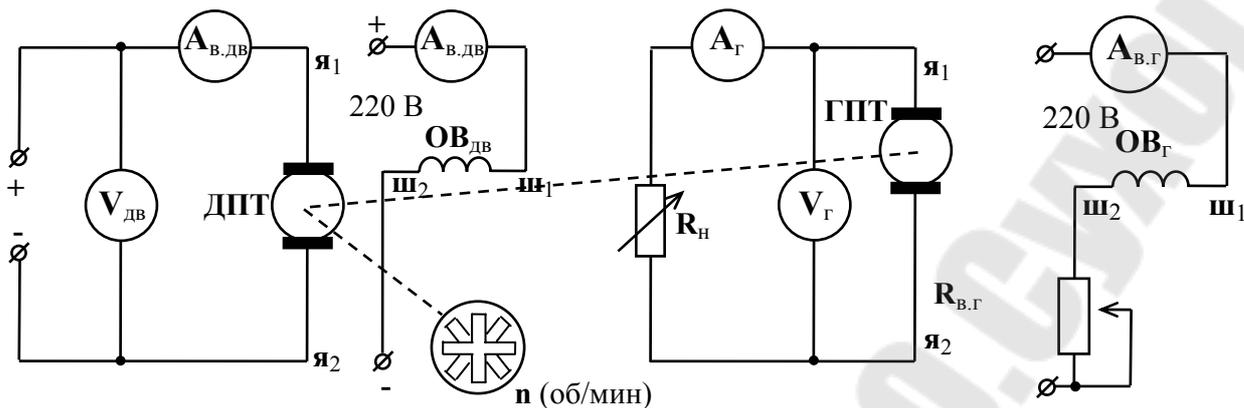


Рис. 11.13. Электрическая схема испытания ДПТ с параллельным возбуждением

- разомкнуть обмотку возбуждения и обмотку якоря нагрузочного генератора и осуществить пуск двигателя путем изменения напряжения на зажимах $Я_1$, $Я_2$ двигателя от 0 до $U_{ном}$. Перед включением питания регулируемого выпрямителя убедиться в том, что ток $I_{в.дв} = I_{в.н}$, а ручка регулировки $U_{вых}$ выпрямителя находится в положении $U_{вых} = 0$. Показания $I_{дв}$, $U_{дв}$, I_2 , U_2 и n тахометра или тахогенератора занести в первую строку таблицы 11.1;

Таблица 11.1

№ п/п	Измерения					Вычисления						
	$U_{дв}$	$I_{дв}$	n	U_2	I_2	$P_{1дв}$	P_{22}	$\sum P$	$\sum P_{дв}$	$P_{2дв}$	η	M
	В	А	об/мин	В	А	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	-	Н·м
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												

- подключить обмотку возбуждения (убедиться, что $I_{в.2} = I_{в.н}$) и, установив движок реостата $R_н$ в положение, отвечающее максимальному сопротивлению, замкнуть цепь якоря по схеме рис. 11.13. Постепенно нагружая двигатель от тока холостого хода до тока $I_{дв} = 1,2 I_{дв.н}$, снять пока-

зания всех приборов и заполнить остальные строки таблицы 11.1. Выключить питание установки.

Вычисления произвести по формулам:

$P_{1\partial\partial} = U_{\partial\partial} I_{\partial\partial}$ - мощность, потребляемая двигателем от источника питания;

$P_{2z} = U_z I_z$ - мощность, отдаваемая нагрузочным генератором;

$\sum P = \sum P_{\partial\partial} + \sum P_z = P_{1\partial\partial} - P_{2z}$ - суммарные потери в двигателе и генераторе;

$\sum P_{\partial\partial} = \frac{P_{1\partial\partial} - P_{2z}}{2}$ - суммарные потери в двигателе;

$P_{2\partial\partial} = P_{1\partial\partial} - \sum P_{\partial\partial}$ - полезная мощность, отдаваемая двигателем;

$\eta = \frac{P_{2\partial\partial}}{P_{1\partial\partial}}$ - коэффициент полезного действия двигателя;

$M = M_0 + M_2$, где $M_0 = 9,550 \frac{P_{1\partial\partial}^{xx}}{n^{xx}}$, $M_2 = 9,550 \frac{P_{2\partial\partial}}{n}$;

- по данным таблицы 11.1 построить в одной координатной системе рабочие характеристики двигателя (по образцу рис. 11.8а) при постоянных $U_{\partial\partial.n}$ и $I_{\partial\partial.n}$;

- по данным таблицы 11.1 построить механическую $n(M)$ и скоростную $n(I_{\partial\partial})$ характеристики ДПТ.

3.3. Исследовать работу МПТ в режиме генератора. Для этого необходимо:

- собрать генераторную часть установки по рис. 11.13 с использованием в качестве приводного трехфазный АД, запитав его статорные обмотки от источника трехфазного напряжения по схеме “звезда” ($U_n = 380$ В);

- разомкнуть обмотку возбуждения генератора и цепь нагрузки генератора ($R_n = \infty$), осуществить пуск ТАД и записать в первую строку таблицы 11.2 значение $I_{\partial\partial} = 0$ и значение остаточной ЭДС E_o по показанию вольтметра V_z . Установить движок реостата R_n в положение, отвечающее $R_{n.max}$;

- замкнув далее обмотку возбуждения $I_{\partial\partial}$, произвести 6÷8 измерений $I_{\partial\partial}$ и E (до $E = 1,25U_n$), регулируя $I_{\partial\partial}$ реостатом $R_{\partial\partial}$. Таким образом снимают восходящую ветвь характеристики холостого хода, передви-

гая движок реостата $R_{\sigma,2}$ в одну сторону (в сторону уменьшения сопротивления);

- передвигая далее движок в обратную сторону, т.е. уменьшая $I_{\sigma,2}$ до минимально-возможного, снять нисходящую ветвь характеристики ХХ. Выключить питание;

Таблица 11.2

№ п/п	$I_{\sigma,2}$, А	E, В	
		Восходящая ветвь	Нисходящая ветвь
1			
2			
3			
4			
5			
6			

- по данным таблицы 11.2 построить характеристику холостого хода генератора рис. 11.14;

- осуществить пуск ТАД по предыдущему пункту и, возбуждив генератор при отключенной нагрузке до $U_2 = (1,1 \div 1,2)U_n$, при $n = n_n$ и $R_{\sigma,2} = const$, снять внешнюю характеристику $U(I_2)$, изменяя I_2 от нуля (нагрузка отключена) до $I_2 = 1,2I_n$, передвигая движок реостата R_n , сделать 5÷6 измерений. Данные занести в таблицу 11.3 и по ним построить внешнюю характеристику рис. 11.15;

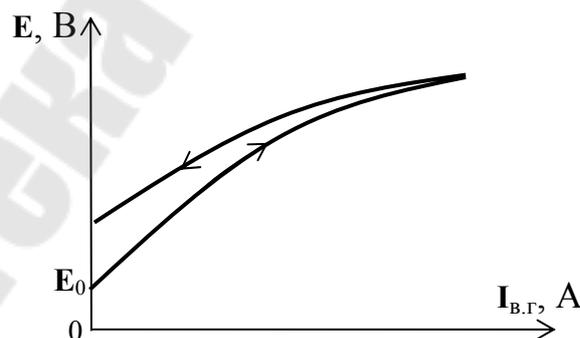


Рис. 11.14

Таблица 11.3

№ п/п	U_2	I_2	$I_{в.2}$
	В	А	А
1			
2			
3			
4			
5			
6			

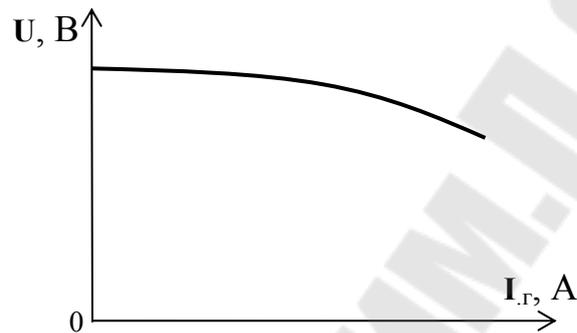


Рис. 11.15. Внешняя (нагрузочная) характеристика генератора

- снять регулировочную характеристику $I_{в.2}(I_2)$ при $U = const$ и $n = const$, осуществив пуск ТАД и возбуждив генератор до $E = U_n$ при $I_2 = 0$. Далее генератор нагружать R_n , а ток возбуждения регулировать $R_{в.2}$ так, чтобы напряжение на выходе генератора оставалось постоянным и равным U_n . Данные 5÷7 опытов занести в таблицу 11.4 и по ним построить регулировочную характеристику рис. 11.16

Таблица 11.4

№ п/п	$I_Г$	$I_{в.Г}$	Примечание
	А	А	
1			$U = \dots\dots В$ $n = const$
2			
3			
4			
5			
6			

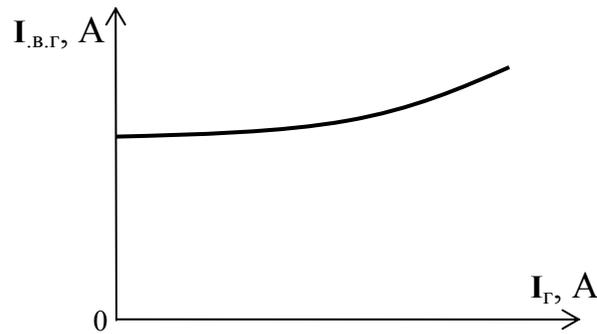


Рис. 11.16. Регулировочная характеристика ГПТ с параллельным возбуждением

4. Контрольные вопросы

- 4.1. Как устроен ДПТ ?
- 4.2. Объясните принцип действия ДПТ с параллельным возбуждением.
- 4.3. Приведите электрическую схему ДПТ параллельного возбуждения с пусковыми и регулируемыми элементами.
- 4.4. Как осуществляется пуск ДПТ ?
- 4.5. Перечислите способы регулирования частоты вращения ДПТ.
- 4.6. Почему во время работы ДПТ нельзя разрывать цепь возбуждения ?
- 4.7. Как можно изменить направление вращения якоря ДПТ ?
- 4.8. Как в лабораторной работе регулируется нагрузка на валу ДПТ ?
- 4.9. Как снимаются рабочие характеристики ДПТ ?
- 4.10. Дайте сравнительную оценку ДПТ различных способов возбуждения и приведите их области применения.
- 4.11. Объясните устройство и принцип действия генератора постоянного тока с параллельным возбуждением.
- 4.12. Объясните, как происходит процесс самовозбуждения ГПТ с параллельным возбуждением и какие факторы влияют на величину ЭДС на зажимах якоря.
- 4.13. Каково назначение коллектора в ГПТ ?
- 4.14. Почему в МПТ магнитопровод статора выполняется сплошным (литым), а якоря – наборным из изолированных пластин электротехнической стали ?
- 4.15. Почему при изменении полярности подключения обмотки возбуждения ГПТ с параллельным возбуждением к обмотке якоря генератор не возбуждается ?

4.16. Почему снижается напряжение на зажимах генератора с параллельным возбуждением при увеличении тока нагрузки ?

4.17. Чем отличаются ГПТ с параллельным, последовательным и смешанным возбуждением и где они применяются ?

5. Требования к содержанию отчета

Отчет должен содержать:

- титульный лист;
- цель работы;
- краткие письменные ответы на контрольные вопросы;
- марки ДПТ и ГПТ и их номинальные параметры по п. 3.1;
- схему рис. 11.13, таблицу 11.1 и рабочие характеристики ДПТ с параллельным возбуждением, а также механическую и скоростную характеристики;
- заполненные таблицы 11.2, 11.3, 11.4, и построенные по ним характеристики МПТ в режиме генератора;
- анализ результатов и выводы.

Литература

1. И.И. Алиев. Электротехнический справочник. – М: ИП РадиоСофт, 2004. – 384 с.
2. Рекус Т.Т., Чесноков В.Н. Лабораторный практикум по электротехнике и основам электроники. – М: Высшая школа, 2001. – 255 с.

Лабораторная работа № 12

Электрические аппараты

Цель работы:

- ознакомиться с назначением электрических аппаратов управления, защиты и контроля режимов работы электрических цепей;
- ознакомиться с маркировкой, устройством, принципом действия и рабочими характеристиками пускателей, реле, плавких предохранителей и автоматических выключателей;

- приобрести навыки экспериментального исследования работы магнитного пускателя, токового реле, теплового реле, реле времени и определить их рабочие параметры и характеристики.

1. Теоретические сведения

1.1. Классификация электрических аппаратов

Электрический аппарат – это электротехническое устройство, предназначенное для управления, регулирования и защиты электрических цепей, а также для контроля их режимов работы.

Электрические аппараты классифицируются по назначению, т.е. основной функции, выполняемой аппаратом; принципу действия; роду тока (переменный или постоянный); величине тока; величине напряжения (до 1 кВ и выше); исполнению; степени защиты и областям применения.

В зависимости от назначения аппараты можно подразделить на следующие группы:

Аппараты управления предназначены для пуска, реверсирования, торможения, регулирования скорости вращения, напряжения, тока электрических машин, станков, механизмов или для пуска и регулирования параметров других потребителей электроэнергии в системах электроснабжения. К ним относятся электромагнитные контакторы, пускатели, реле, кнопки управления, переключатели, контроллеры, резисторы и реостаты. Для аппаратов управления характерно частое коммутирование (включение и отключение) электрических цепей.

Электрические аппараты управления подразделяются на аппараты ручного и дистанционного управления. К аппаратам дистанционного управления относятся электромагнитные контакторы, пускатели, реле и электромагниты.

Аппараты защиты используются для коммутации электрических цепей, защиты электрооборудования и электрических сетей от сверхтоков, т.е. токов перегрузки, пиковых токов, токов коротких замыканий. К ним относятся плавкие предохранители, автоматические выключатели, тепловые и токовые реле.

Контролирующие аппараты предназначены для контроля заданных электрических и неэлектрических параметров. К этой группе относят датчики. Эти аппараты преобразуют электрические и неэлектрические величины в электрические и выдают информацию в виде электрических сигналов. Такие устройства называются измерительными преобразователями или датчиками.

К контролирующим аппаратам относятся датчики тока, давления, температуры, положения, уровня, пьезодатчики, фотодатчики, датчики Холла, а также реле, реализующие функции датчиков, например, реле контроля скорости (РКС), реле времени, напряжения, тока.

При достижении контролируемым параметром определенного значения, реле срабатывает и своими исполнительными органами воздействует на схему автоматики управления электрооборудованием станков, механизмов и машин.

Датчиками тока служат трансформаторы тока в цепях переменного тока и магнитные усилители в цепях постоянного тока, а также токовые и тепловые реле. Реле напряжения реагируют на величину напряжения. Реле времени обеспечивают временную регулирующую задержку выходного сигнала относительно входного сигнала. В качестве фотодатчиков используются чувствительные фотоэлементы, реагирующие на изменение освещенности.

1.2. Коммутационные электрические аппараты ручного управления

Аппараты ручного управления (командные аппараты) предназначены для непосредственного управления электродвигателями и другими потребителями электрической энергии переменного и постоянного тока. Они используются для нечастого включения и выключения электрических цепей, реверсирования, переключения схем соединения обмоток, изменения сопротивления при управлении электродвигателями.

К аппаратам ручного управления относятся рубильники, кнопки управления, пакетные выключатели и переключатели, универсальные переключатели, ящики сопротивлений, пусковые и регулировочные реостаты, командоконтроллеры и контроллеры.

Рубильники используются в цепях переменного тока при напряжении до 660 В и постоянного тока при напряжении до 440 В и токах 25-10000 А. По количеству полюсов они подразделяются на одно-, двух- и трехполюсные; по роду управления бывают с центральной и боковой рукояткой или рычажным приводом; по способу присоединения – с передней и с задней стороны аппарата. Коммутирующим элементом рубильников является подвижный нож, который входит в губки контактных стоек.

Переключатели имеют дополнительные неподвижные контакты с выводами, что обеспечивает возможность переключения подходящих к нему цепей с одной на другую.

В некоторых конструкциях рубильники совмещают с предохранителями или используют предохранители в качестве ножей. Такая конструк-

ция, позволяющая выполнять функции коммутации и защиты, называется блоком предохранитель-выключатель (БПВ).

Обозначаются рубильники буквенно-цифровым кодом. Например, РБ31 - рубильник с боковой рукояткой, трехполюсный, рассчитанный на ток до 100 А; РПБ (ППБ) - рубильник (переключатель) с боковым рычажным приводом; РПЦ (ППЦ) – рубильник (переключатель) с центральным рычажным приводом.

Кнопки управления используют в цепях переменного тока при напряжении до 600 В и в цепях постоянного тока – до 440 В. Они различаются по величине (нормальные и малогабаритные), набору замыкающих и размыкающих контактов, номинальному току и напряжению, форме и цвету толкателей; они бывают с самовозвратом (без фиксаций), с защелками (с фиксацией), а также включаемые специальным ключом. Контакты кнопочных элементов изготавливают из металлокерамики или делают посеребрёнными. Они рассчитаны на 40000 циклов включений-отключений под нагрузкой. Два, три и более кнопочных элемента, смонтированные в одном корпусе, образуют кнопочную станцию или кнопочный пост. Они монтируются на пультах, стендах, на полу (ножные) и подвесные. Выпускаются кнопки управления и кнопочные станции серий КЕ, ПКЕ, ПКУ. Структура условного обозначения кнопочных постов серии ПКЕ, ПКУ приведена в [1].

Пакетные выключатели и переключатели используются в цепях управления и сигнализации, в схемах пуска и реверса электродвигателей небольшой мощности под нагрузкой в цепях переменного тока до 380 В и постоянного тока до 220 В. Они представляют собой малогабаритные многоцепные аппараты поворотного типа. Пакетные выключатели рассчитаны на токи 10 А, 25А, 60 А, 100 А, 250 А, 400 А при небольшом количестве включений (15-20 в час) и имеют одно-, двух- и трехполюсную конструкцию в открытом, защищенном и герметическом исполнении. Пакетные выключатели состоят из отдельных колод – пакетов, изготовленных из изолирующего материала. Внутри пакета находится контактная система, состоящая из неподвижного и подвижного контактов (один полюс). Из таких пакетов набирается любое количество полюсов. Выключатель снабжен механизмом мгновенного переключения.

Пакетные выключатели и переключатели обозначаются буквенно-цифровым кодом: ПВ – пакетный выключатель; ПП – пакетный переключатель; ПВМ – пакетный выключатель малогабаритный; ГПВМ – герметический пакетный выключатель малогабаритный; первая цифра обозначает число полюсов; число после дефиса обозначает номинальный ток в амперах. Например, ПВМ2-10 – пакетный выключатель малогабаритный двух-

полюсный, на $I_n = 10$ А; ПП2-10/Н2 - пакетный переключатель двухполюсный на 10 А с двумя нулевыми наложениями.

Контроллеры – это многоцепные электрические аппараты с ручным или ножным приводом для непосредственной коммутации силовых цепей двигателей постоянного тока до 440 В и переменного тока до 500 В. По конструкции они подразделяются на кулачковые, барабанные, плоские и магнитные. Кулачковые контроллеры различаются по количеству коммутируемых цепей, виду привода, диаграммам замыкания контактов.

Для управления электродвигателями переменного тока используются контроллеры серий ККТ61, ККТ61А, ККТ62, ККТ62А, ККТ68А, ККТ101, ККТ102 на номинальное напряжение до 380 В; серий ККП101, ККП102 – для управления двигателями постоянного тока до 440 В. Они имеют до 12 силовых контактов и до 6 позиций рукоятки в каждую сторону от нулевого положения.

Магнитные контроллеры состоят из командоконтроллера и силовых электромагнитных контакторов. Командоконтроллер с помощью контактов включает или отключает напряжение на катушках контакторов, которые своими силовыми контактами коммутируют цепи электродвигателей.

1.3. Электрические аппараты дистанционного управления.

Электрические аппараты дистанционного управления, в отличие от аппаратов ручного управления, содержат магнитную систему как элемент привода электромагнитных контакторов, пускателей, реле и как устройство, создающее электромагнитные силы, например, в электромагнитных муфтах и электромагнитных тормозных устройствах. Наличие электромагнитов в этих аппаратах позволяет управлять ими на расстоянии.

Реле. Электрическим реле называется коммутационный аппарат, предназначенный для осуществления скачкообразных изменений в управляющих цепях при заданном значении электрических воздействующих величин. При этом под воздействующей входной величиной понимают электрическую величину (ток, напряжение), подаваемую в электрическую цепь управления реле.

Реле составляют многочисленную группу электрических аппаратов, применяемых для управления, сигнализации, защиты систем электроснабжения городов, промышленных предприятий; в системах управления электроприводами станков, механизмов, машин.

В зависимости от параметра срабатывания различают реле напряжения, тока, мощности, частоты и т.д.

Реле также подразделяются по роду тока (постоянного, переменного), по принципу воздействия на управляемую цепь (контактные и бесконтактные).

Контактные реле своими контактами коммутируют электрическую цепь; бесконтактные – при срабатывании резко изменяют свое сопротивление, включенное в управляемую цепь.

Действие реле основано на электромагнитном, магнитоэлектрическом и индукционном принципах.

1.3.1. Электромагнитные реле (ЭМР)

ЭМР – аппарат, автоматически коммутирующий электрические цепи сигналом извне. ЭМР состоит из электромагнита (магнитопровод, сердечник, катушка, якорь) и нескольких контактных групп, управляемых связанным с якорем электромагнита приводным механизмом. При протекании через катушку электромагнита электрического тока якорь притягивается к катушке и перемещает подвижные контакты, вызывая их переключение. Чтобы контакты реле вернулись в первоначальное состояние необходимо разорвать цепь питания катушки.

По назначению различают:

- пусковые реле (управляются обычно с пультов с помощью кнопки);
- максимальные реле (для отключения управляемой цепи при превышении заданного значения напряжения или тока);
- минимальные реле (для отключения управляемой цепи при уменьшении напряжения (тока) ниже заданного значения);
- реле времени (для создания необходимой выдержки времени между моментом подачи управляющего сигнала и моментом включения или отключения управляемой цепи).

По роду тока ЭМР подразделяются на реле постоянного тока, переменного тока и поляризованные реле.

Поляризованное реле является наиболее чувствительным из всех типов реле. Напряжение постоянного тока одной полярности замыкает одни контакты, а при смене полярности питающего напряжения эти контакты размыкаются, и замыкаются другие.

1.3.2. Электромагнитные контакторы.

Электромагнитные контакторы – это двухпозиционные аппараты с самовозвратом дистанционного управления, которые предназначены для частых включений и отключений силовых электрических цепей под нагрузкой.

Контакторы изготавливаются на токи коммутации 4...4000 А, при напряжении 220 В, 440 В, 750 В постоянного тока и 380 В, 660 В, 1140 В переменного тока. Они допускают до 1400 включений в час. Исполнение может быть одно-, пятиполюсным с управлением на постоянном или переменном токе.

Контакторы имеют основные узлы:

- главные контакты;
- электромагнитный механизм;
- вспомогательные контакты;
- дугогасительная камера.

Контактор работает следующим образом.

При нажатии кнопки “Пуск” в катушке электромагнита создается магнитный поток, притягивающий якорь к сердечнику. На якоре укреплен подвижный контакт, который, замыкаясь с неподвижным контактом, скользит по его поверхности, разрушая оксидную пленку. Одновременно с главными контактами замыкаются вспомогательные контакты, блокирующие контакты кнопки “Пуск”, после чего воздействие на кнопку “Пуск” можно снять. Отключение контактора производится нажатием кнопки “Стоп”, разрывающей цепь питания катушки электромагнита.

Для управления электродвигателями большой мощности используются контакторы переменного тока КТ, КТП, КТВ; постоянного тока КП, КПВ, КПД.

Для управления трехфазными двигателями переменного тока широко используются контакторы поворотного типа серии КТ6000 со щелевыми дугогасительными камерами и магнитным дутьем, а также КТ7000 с дугогасительными решетками.

1.3.3. Электромагнитные пускатели.

Электромагнитный пускатель – это коммутационный аппарат для управления и защиты электродвигателей переменного тока, разработанный на базе контакторов.

Эти аппараты имеют различное исполнение: они бывают неревверсивными и реверсивными; с тепловыми реле и без них; открытого, защищенного и пылебрызгозащищенного исполнения и выпускаются сериями.

Структура условного обозначения электромагнитных пускателей серий ПМЕ, ПАЕ, ПМЛ приведены в [1].

Управление состоянием пускателя осуществляется при помощи кнопочного поста, который встраивается в пускатель или устанавливается отдельно. Встроенное тепловое реле используется для защиты двигателя от

токовых перегрузок. Для защиты двигателей от токов короткого замыкания в главной (силовой) цепи пускателя устанавливают предохранители.

Каждый пускатель имеет один или несколько вспомогательных контакта, используемых для самоблокировки, сигнализации и др. целей.

Все магнитные пускатели обеспечивают нулевую защиту, т.е. при снижении напряжения питающего катушку пускателя на 30 % и более, электромагнит не может удержать якорь пускателя и силовые контакты размыкаются.

Катушки электромагнита пускателя изготавливаются на номинальные напряжения 42 В, 127 В, 220 В, 380 В и 500 В.

1.4. Электрические аппараты защиты.

При эксплуатации электрооборудования и электрических сетей длительные токовые перегрузки проводов, обмоток, кабелей, а также короткие замыкания вызывают их нагрев свыше допустимых значений. Это приводит к преждевременному износу их изоляции, вследствие чего может произойти возгорание или взрыв во взрывоопасных помещениях, а также поражение людей электрическим током.

Для предотвращения подобных явлений каждый участок электрической сети должен быть снабжен защитным аппаратом, обеспечивающим отключение аварийного участка при непредвиденном увеличении токовой нагрузки сверх допустимой.

Аппаратом защиты называется устройство, которое автоматически отключает защищаемую электрическую цепь при ненормальных режимах. К аппаратам защиты относятся плавкие предохранители, автоматические выключатели, тепловые и токовые реле, устройства защитного отключения, электронные предохранители.

1.4.1. Плавкие предохранители.

Плавкие предохранители – это коммутационные электрические аппараты, предназначенные для отключения защищаемой цепи посредством разрушения специально предусмотренных для этого токоведущих частей под действием тока, который превышает определенное значение. В плавких предохранителях отключение цепи происходит за счет расплавления плавкой вставки, которая нагревается протекающим через нее током защищаемой цепи. После отключения цепи необходимо устранить причину, обусловившую токовую перегрузку и заменить перегоревшую вставку на новую.

Предохранители включаются последовательно в защищаемую цепь, а для создания видимого разрыва электрической цепи и безопасного обслуживания совместно с предохранителями применяются неавтоматические выключатели или рубильники.

Предохранители изготавливаются в расчете на напряжение переменного тока 42 В, 220 В, 380 В, 660 В и постоянного тока 24 В, 110В, 220 В, 440 В.

Основными элементами предохранителя являются корпус, плавкая вставка, контактная часть, дугогасительное устройство и дугогасительная среда.

Предохранители характеризуются номинальным током плавкой вставки, номинальным током патрона (корпуса) данной конструкции предохранителя. Например, корпус предохранителя серии ПН2-100 рассчитан на ток до 100 А, а в него можно вставлять сменные плавкие вставки на ток 30 А, 40 А, 50 А, 60 А, 80 А, 100 А.

При перегрузке и коротком замыкании цепи температура вставки увеличивается и она расплавляется. Чем больше протекающий ток, тем меньше время плавления.

При использовании предохранителей в трехфазных цепях может работать только один из трех предохранителей. В этом случае трехфазные двигатели будут включены на две фазы, что приведет к перегреву обмоток и выходу двигателя из строя.

В схемах управления станков, механизмов, машин, а также в системах электроснабжения жилых и общественных зданий широко используются пробочные плавкие предохранители серии ПРС с номинальным током корпуса 6 А, 25 А, 63 А, 100 А.

1.4.2. Тепловые реле.

Для защиты электрических двигателей и другого электрооборудования от длительных токовых перегрузок широко применяются тепловые реле с биметаллическими элементами. Биметаллический элемент состоит из двух жестко скрепленных друг с другом пластин с различным значением коэффициента линейного расширения α .

В качестве материала используются инвар с низким α и хромоникелевая сталь – с высоким α .

Если биметаллический элемент неподвижно закрепить с одной стороны и нагреть, то он изогнется в сторону материала с меньшим α .

Механическое усилие, развиваемое бипластиной при изгибе, приводит в действие исполнительный элемент реле и при этом происходит переключение контактов. Нагрев может осуществляться прямым способом

(рис. 12.1а), косвенным способом (рис. 12.1б) и комбинированным способом (рис. 12.1в).

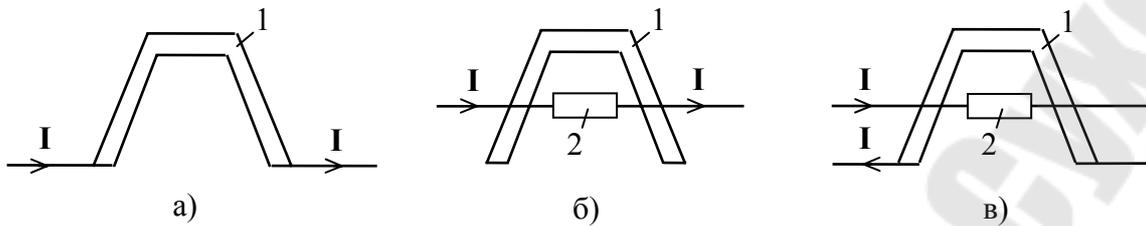


Рис. 12.1. Способы нагрева биметаллической пластины теплового реле:

- 1 – пластина;
- 2 – нагревательный элемент

Из-за инерционности теплового процесса тепловые реле, имеющие биметаллический элемент, непригодны для защиты от токов коротких замыканий.

Выпускаются трехполюсные тепловые реле серий РТЛ, РТТ; двухполюсные серии ТРН и однополюсные реле серии ТРП. В схемах тепловые реле устанавливаются индивидуально или в комплекте с магнитными пускателями.

Конструктивно тепловое реле состоит из диэлектрического корпуса с отсеками, в которых устанавливаются биметаллические пластины с нагревательными элементами, механизмы срабатывания с защелкой, кнопки возврата, эксцентрики для регулировки номинального тока реле и контактов силовых и вспомогательных.

После срабатывания реле необходимо устранить причину, вызвавшую это срабатывание, дождаться, пока бипластины остынут, и привести реле в рабочее состояние, нажав кнопку возврата.

1.4.3. Автоматические выключатели.

Автоматические выключатели предназначены для коммутации цепей при аварийных режимах, а также нечастых (от 6 до 30 в сутки) оперативных отключений электрических цепей. Они обеспечивают быструю и надежную защиту электрических сетей от токов перегрузки и короткого замыкания, выполняя одновременно функции защиты и управления.

Для обеспечения защитных функций автоматические выключатели снабжены тепловыми и (или) электромагнитными расцепителями. Тепловые расцепители защищают цепи от токов длительной перегрузки, а электромагнитные – от токов короткого замыкания.

Тепловой расцепитель основан на использовании биметаллических пластин (как у тепловых реле) и не защищает цепи от токов короткого замыкания из-за большой тепловой инерции.

Электромагнитный расцепитель содержит электромагнит, воздействующий на отключающий пружинный механизм. Если ток в катушке электромагнита превышает определенное значение, то электромагнитный расцепитель отключает линию с помощью коммутирующего устройства практически мгновенно.

Широкое распространение получили малогабаритные пробочные автоматические выключатели для защиты от коротких замыканий и перегрузок осветительных сетей в бытовых и жилых помещениях. Они выпускаются на $I_{\text{н}} = 6 \dots 50$ А и напряжение до 380 В.

1.4.4. Токовые реле.

В схемах релейной защиты систем электроснабжения наиболее распространены токовые реле электромагнитной и индукционной систем.

Реле РТМ имеют токи уставки ($I_{\text{уст}}$) 5 А, 7 А, 8 А, 10 А, 12,5 А, 15 А и выполняются в четырех вариантах с регулированием $I_{\text{уст}}$: РТМ-1 – 5...15 А, РТМ-2 – 10...25 А, РТМ-3 – 30...60 А, РТМ-4 – 75...150 А.

Токовые реле с выдержкой времени РТВ имеют $I_{\text{уст}}$ - 5...35 А и регулируемую от 0 до 4 с выдержку времени срабатывания.

Реле мгновенного действия РТ...-40 применяются в схемах максимально-токовой защиты систем электроснабжения и другого электрооборудования.

Реле тока серий РТ-80, РТ-81 ...РТ-86, РТ-91, РТ-95 имеют индукционный воспринимающий элемент с выдержкой времени срабатывания, зависящей от тока, и электромагнитный воспринимающий элемент мгновенного действия (отсечка), срабатывающий при высоких значениях тока.

1.5. Контролирующие электрические аппараты.

В процессе работы электрического и технологического оборудования возникает необходимость контролировать происходящие при этом процессы. Для этого нужна информация о состоянии и текущих значениях скорости, тока, момента, ЭДС, температуры, давления, уровня жидкости в емкости, положения предмета, освещенности и т.д.

Устройства, которые выдают подобную информацию в виде электрических сигналов, называют измерительными преобразователями или датчиками.

Датчики классифицируются по принципу преобразования электрических и неэлектрических величин в электрические (тепловые, давления, уровня, электромагнитные, датчики холла, фотодатчики), по конструкции (контактные и бесконтактные), по роду тока и величине напряжения, по току выходного исполнительного органа, по конструктивным особенностям и степени защиты.

В зависимости от вида выходного сигнала датчики подразделяются на генераторные и параметрические. Генераторные вырабатывают электрическую энергию (термопара, солнечная батарея и др.). Параметрические датчики под действием измеряемой величины меняют какие-либо электрические параметры (сопротивление, емкость, индуктивность, фазовый сдвиг и др.).

2. Задание, выполняемое при домашней подготовке.

2.1. По лекциям, рекомендуемой литературе [1] и разделу 1 данной работы ознакомиться с классификацией электрических аппаратов по их назначению, с условными обозначениями, электрическими схемами и техническими характеристиками аппаратов.

2.2. По рекомендуемой литературе [1] расшифровать марку пускателя ПМЕ111, теплового реле ТРН10А, токового реле РТ40/20, УХЛ4, реле времени ВЛ-67УХЛ4, автоматического выключателя АЕ2026-20Н-0073-Б. Привести их технические характеристики, электрические схемы и монтажные символы.

2.3. По разделу 3 ознакомиться с методикой лабораторных испытаний аппаратов, перечисленных в п. 2.2.

2.4. Заготовить отчет по требованиям раздела 5.

3. Лабораторное задание.

3.1. Исследовать экспериментально работу магнитного пускателя ПМЕ111. Для этого:

3.1.1. Собрать электрическую цепь рис. 12.2.

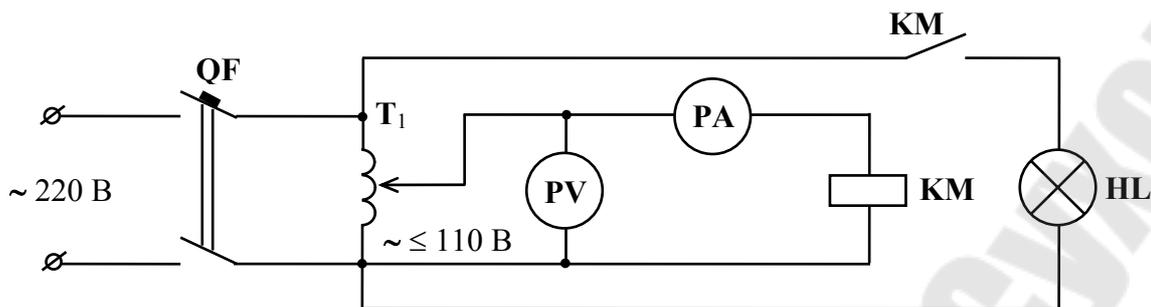


Рис. 12.2. Электрическая схема исследования магнитного пускателя

3.1.2. Установить регулятор $U_{вых}$ лабораторного автотрансформатора в нулевое положение и подать сетевое напряжение питания ЛАТРа.

3.1.3. Включить тумблер питания ЛАТРа и тумблер переменного выходного напряжения и, плавно увеличивая $U_{вых}$, зафиксировать значение напряжения срабатывания (по вольтметру на лицевой панели ЛАТРа) и тока $I_{ср}$ (по амперметру) в момент загорания лампочки индикации и притяжения якоря пускателя к электромагниту. Показания записать в табл. 12.1.

3.1.4. Увеличить напряжение до номинального значения катушки пускателя $U_{ном.к} = 110$ В и записать в табл. 12.1 значения тока $I_{вкл}$.

3.1.5. Плавно уменьшая напряжение, определить напряжение возврата $U_{возвр}$ якоря электромагнита пускателя в исходное состояние, т.е. напряжение отпадания и записать $U_{возвр}$ в табл. 12.1.

3.1.6. Пункты 3.1.3-3.1.5 повторить 5 раз и вычислить средние значения величин. Вычислить также коэффициент возврата $K_v = U_{ср.возвр.} / U_{ср.срб.}$, кратность пускового тока (тока срабатывания) номинальному $I_{ср.срб.} / I_{ном.}$, номинальную активную мощность $P_{ном} = I_{вкл}^2 R$, номинальную полную мощность $S_{ном} = I_{вкл}^2 U_n$, пусковую полную мощность катушки $S_{пуск} = I_{ср.срб.} U_n$.

Таблица 12.1

Напряжение срабатывания $U_{срб.}$, В					$U_{ср.срб.}$, В
Ток при невтянутом якоря $I_{срб.}$, А					$I_{ср.срб.}$, А
Ток при втянутом якоря $I_{вкл.}$, А					$I_{ср.вкл.}$, А
Напряжение возврата $U_{возвр.}$, В					$U_{ср.возвр.}$, В

3.2. Исследовать экспериментально работу токового реле РТ40/20 УХЛ4.
Для этого:

3.2.1. Собрать электрическую цепь рис. 12.3.

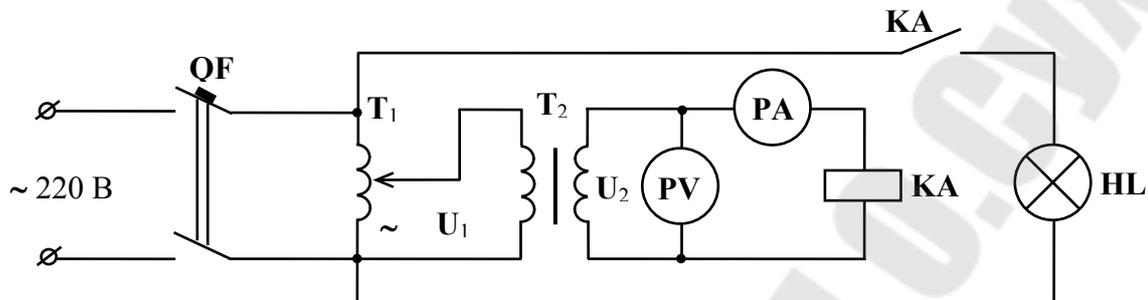


Рис. 12.3. Электрическая схема исследования токового реле

3.2.2. Установить ток уставки реле $I_{уст} = 6$ А и, установив ручкой регулировки $U_{вых}$ ЛАТРа, $U_{вых} = 0$, включить тумблеры питания ЛАТРа и тумблер $U_{вых}$.

3.2.3. Увеличивая ток через обмотку реле регулятором Т1 (ручкой ЛАТРа), зафиксировать значение тока $I_{срб}$ реле по показанию амперметра и записать в табл. 12.2.

3.2.4. Уменьшая регулятором Т1 величину тока до момента отпущения реле (индикатор погаснет), зафиксировать величину $I_{возвр}$ и также записать в табл. 12.2.

3.2.5. Повторить п.п. 3.2.2÷3.2.4 для значений тока уставки $I_{уст} = 8, 10$ А. Занести данные в таблицу, аналогичную табл. 12.2.

Таблица 12.2

№ опыта	1	2	3	4	5	$I_{ср.срб.}, А$ $I_{ср.возвр}, А$
$I_{срб.}, А$						
$I_{возвр.}, А$						

3.2.6. По данным измерений определить:

- среднее значение тока срабатывания $I_{ср.срб.} = \frac{\sum_{k=1}^5 I_k}{5}$;

- коэффициент возврата $K_e = I_{ср.возвр.} / I_{ср.срб.}$;

- относительную погрешность $\Delta I \left[(I_{уст.} - I_{ср.срб.}) / I_{уст.} \right] \cdot 100\%$.

3.3. Исследовать экспериментально работу теплового реле РТМ-40А. Для этого:

3.3.1. Собрать электрическую цепь рис. 12.4.

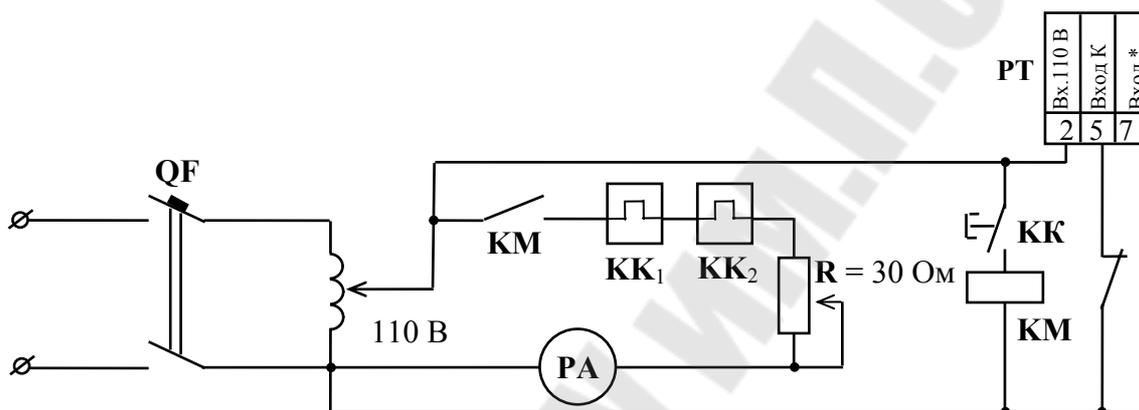


Рис. 12.4. Электрическая схема исследования теплового реле

3.3.2. Включить питание автотрансформатора средним тумблером и, включив второй (правый) тумблер выходного напряжения, установить $U_{вых} = 110$ В. Выключить тумблер выходного напряжения и включить питание секундомера РТ, нажав кнопку “Сеть”.

3.3.3. Установить реостат R в положение, отвечающее току нагрузки $I_n \approx 5$ А. Нажав кнопку “КК” коммутирующих контактов реле и установив в нуль счетчик времени РТ (нажав кнопку “0”), включить правый тумблер ЛАТРа. Дождавшись срабатывания реле, записать в таблицу 12.3 показание счетчика РТ. Выключить правый тумблер ЛАТРа.

3.3.4. Повторить действия п.3.3.3, устанавливая реостат по очереди в положения, отвечающие току нагрузки $I_n = 6, 7, 8, 9$ А. Перед каждым повтором выдержать 5 минут для охлаждения нагревательных элементов теплового реле.

Таблица 12.3

№ опыта	1	2	3	4	5
$U_{\text{вых}}$, В					
$I_{\text{нагр}}$, А					
$I_{\text{нагр}} / I_{\text{ном}}$					
Время срабатывания реле $t_{\text{срб}}$, с					

3.3.5. По данным табл. 12.3 построить зависимость $t_{\text{срб}} = f(I_{\text{нагр}} / I_{\text{н}})$.

3.4. Исследовать экспериментально работу электронного реле времени ВЛ67УХЛ4

3.4.1. Собрать электрическую цепь рис. 12.5.

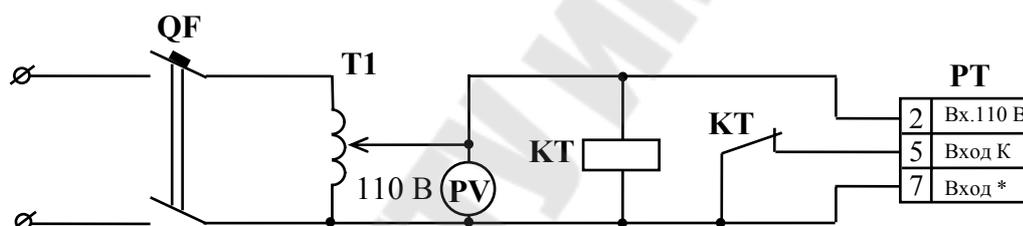


Рис. 12.5. Электрическая схема исследования реле времени

3.4.2. Установив регулятор $U_{\text{вых}}$ автотрансформатора в положение, отвечающее $U_{\text{вых}} = 0$, включить тумблер сетевого питания и тумблер $U_{\text{вых}}$ и, плавно вращая ручку $U_{\text{вых}}$ трансформатора, установить по вольтметру $U_{\text{вых}} = 110$ В и выключить тумблер $U_{\text{вых}}$.

3.4.3. Включить шнур питания электронного секундомера в розетку ~ 220 В, нажать на кнопку “Сеть” на лицевой панели счетчика, а затем на кнопку “0”.

3.4.4. Установить уставку реле $t_{\text{уст}} = 25$ с и, включив тумблер $U_{\text{вых}}$ трансформатора, дождаться остановки подсчета времени секундомером. Сняв отсчет времени срабатывания $t_{\text{срб}}$ с индикаторной панели счетчика, записать его в табл. 12.4.

3.4.5. Выключить тумблер $U_{\text{вых}}$ трансформатора и, нажав на кнопку “0” счетчика, установить его в нуль.

3.4.6. Повторить п.п. 3.4.4 и 3.4.5 три раза, занося данные в табл. 12.4 для всех указанных значений $t_{уст}$.

Таблица 12.4

Уставка времени $t_{уст}$, с	25			50			75			100		
Время срабатывания $t_{срб}$, с												
Погрешность срабатывания $\Delta t_{срб}$, с												
Относительная погрешность Δ , %												

3.4.7. По результатам измерений рассчитать абсолютную ($\Delta t_{срб}$, с) и относительную (δt , %) погрешность срабатывания реле по формулам

$$\Delta t_{срб} = (t_{уст} - t_{срб}), \text{ с}; \quad \delta t = \frac{\Delta t_{срб}}{t_{уст}} \cdot 100 \text{ \%}. \text{ Вычислить также среднюю от-}$$

носительную погрешность по формуле $\delta t_{ср} = \sum_{k=1}^4 \Delta t_{срб.к} / 4$.

4. Контрольные вопросы.

- 4.1. Из каких основных частей состоит магнитный пускатель ?
- 4.2. Каково назначение главных контактов магнитного пускателя ?
- 4.3. Что называют коэффициентом возврата ?
- 4.4. Какие виды защиты выполняет магнитный пускатель ?
- 4.5. Как расшифровываются типы магнитных пускателей ПМЛ-1100 и ПМЛ-2501 ?
- 4.6. По каким параметрам выбирают магнитные пускатели ?
- 4.7. Какие функции выполняют тепловые реле в схемах электротехнических устройств ?
- 4.8. По какому принципу устроены нагревательные элементы тепловых реле ?
- 4.9. Какой вид имеет защитная (время-токовая) характеристика тепловых реле ?
- 4.10. Как устроено тепловое реле серии РТН ?
- 4.11. Как устроено токовое реле ? Из каких элементов состоит реле серии РТ-40 ?
- 4.12. Как влияет схема соединения двух обмоток токового реле (последовательное, параллельное) на пределы регулирования уставок тока срабатывания токового реле ?

- 4.13. Какие серии реле времени выпускаются электротехнической промышленностью ?
- 4.14. Какие принципы лежат в основе получения регулируемой выдержки времени в различных типах реле времени (электромеханических, пневматических, электронных и др.) ?
- 4.15. Для каких целей применяются автоматические выключатели ?
- 4.16. Какие распространенные серии автоматических выключателей применяются в схемах электротехнических устройств ?
- 4.17. Как устроен тепловой расцепитель автоматических выключателей ?
- 4.18. Как устроен электромагнитный расцепитель автоматических выключателей ?
- 4.19. Приведите классификацию электрических аппаратов по их назначению ?
- 4.20. Каково назначение контролирующих аппаратов (измерительных преобразователей или датчиков) ?

5. Требования к содержанию отчета.

- 5.1. Титульный лист.
- 5.2. Цель работы.
- 5.3. Расшифровка марок аппаратов по п. 2.2 и номинальные параметры аппаратов.
- 5.4. Электрические схемы исследования параметров и характеристик электрических аппаратов.
- 5.5. Результаты эксперимента в виде заполненных таблиц, рассчитанных параметров и характеристик (графиков).
- 5.6. Выводы по данным исследований, по цели работы.

Литература

1. Елкин В.Н., Елкина Т.В. Электрические аппараты. – Мн.: Дизайн ПРО, 2003 – 168 с.
2. Родштейн Л.А. Электрические аппараты. – Л.: Энергоиздат, 1981 – 304 с.

Содержание

Лабораторная работа № 9. Трансформаторы	4
Лабораторная работа № 10. Асинхронные электродвигатели	17
Лабораторная работа № 11. Электрические машины постоянного тока ...	28
Лабораторная работа № 12. Электрические аппараты	45

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ

Часть 2

**Практическое пособие
по одноименному курсу
по выполнению лабораторных работ
для студентов машиностроительного
и механико-технологического факультетов**

Авторы-составители: **Тиличенко** Михаил Павлович
Грачев Станислав Анатольевич
Соленков Виталий Владимирович

Подписано в печать 01.02.06.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 3,49. Уч.-изд. л. 3,6.

Изд. № 233.

E-mail: ic@gstu.gomel.by

<http://www.gstu.gomel.by>

Отпечатано на цифровом дуплекаторе
с макета оригинала авторского для внутреннего использования.

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

246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.