

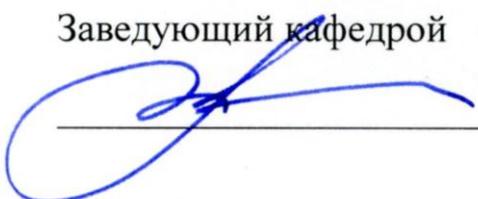
МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Тульский государственный университет»

Институт высокоточных систем им. В.П. Грязева  
Кафедра систем автоматического управления

Утверждено на заседании кафедры  
«Системы автоматического управления»  
«13» января 2021 г., протокол № 8

Заведующий кафедрой



\_\_\_\_\_ О.В.Горячев

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
**по выполнению лабораторных работ**  
**по дисциплине (модулю)**

**«Электромеханические системы управления летательными аппаратами»**

**основной профессиональной образовательной программы**  
**высшего образования – программы специалитета**

по специальности

**24.05.06 Системы управления летательными аппаратами**

со специализацией

**Системы управления беспилотными летательными аппаратами**

Форма обучения: очная

Идентификационный номер образовательной программы: 240506-01-21

Тула 2021 год

**Разработчик методических указаний:**

Илюхина Наталья Сергеевна, профессор, к.т.н., доцент.  
(ФИО, должность, ученая степень, ученое звание)



(подпись)

Настоящие методические указания предназначены для использования при выполнении лабораторных работ по курсам «Основы электромеханики», «Электромеханические системы СУЛА». Эти дисциплины посвящены изучению различных свойств, динамических особенностей, методов построения математических моделей электромеханических устройств индуктивного типа, получивших широкое распространение в мехатронных, автоматических системах и системах автоматического управления. К таким устройствам можно отнести микромашины постоянного и переменного тока, информационные машины, электромагниты, электромагнитные преобразователи, представляющие собой вырожденный тип электромеханического преобразователя энергии.

Цикл лабораторных работ включает:

1. Анализ схемных решений конструкций электромеханических преобразователей (ЭМП) различного назначения.
2. Исследования характеристик ЭМП в установившихся и переходных режимах.

Каждая лабораторная работа рассчитана на одно двухчасовое занятие. Учитывая многообразие типов и большие различия в требованиях к специальным микроэлементам, в каждой работе содержится краткое описание принципа действия и основных свойств исследуемых объектов.

Лабораторные работы по дисциплинам «Основы электромеханики», «Электромеханические системы СУЛА» предназначены для студентов специальностей 15.03.06 – «Мехатроника», 24.05.06 – «Системы управления летательными аппаратами»

## *Лабораторная работа № 1*

### ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИЙ И ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

#### Программа работы

#### 1. Теоретические исследования

1.1. Изучить конструкции, составить конструктивные и принципиальные схемы исполнительных двигателей постоянного тока серий Д, СД, СЛ, ДП, ДП2, ДПМ, ДПР, тахогенераторов серий ТД, ТПП.

1.2. Пользуясь справочными данными, определить номинальные значения эксплуатационных параметров машин. Установить связь конструктивной схемы машины с ее функциональным назначением.

1.3. Ознакомиться с конструкциями и схемами обмоток электрических машин постоянного тока.

#### 2. Пояснения и указания к работе

##### 2.1. Принцип действия и основные уравнения двигателя постоянного тока

Электрические машины постоянного тока мехатронных систем и систем автоматического управления весьма разнообразны по своему назначению. К ним относятся исполнительные двигатели коллекторные и бесконтактные, генераторы и тахогенераторы, электромашинные усилители.

Принцип действия двигателя постоянного тока основан на взаимодействии тока проводников обмотки якоря с магнитным полем возбуждения, в результате чего на каждый проводник обмотки якоря действует электромагнитная сила (рис. 1.1). Совокупность всех сил, действующих на проводники обмотки якоря, создает электромагнитный момент, который приводит якорь двигателя во вращение;

$$M = C_m \Phi I_a \quad (1.1)$$

где  $C_m = \frac{pN}{2 \cdot \pi \cdot a}$  - коэффициент момента, величина которого постоянна для данной машины,  $p$  - число пар полюсов;  $N$  - число активных проводников обмотки,  $2a$  - число параллельных ветвей обмотки;  $\Phi$  - магнитный поток, Вб;  $I_a$  - ток якоря, А.

Помимо вращающего момента, на вал двигателя действуют тормозящие моменты: момент холостого хода  $M_0$ , обусловленный механическими и магнитными потерями, противодействующий момент, создаваемый механизмом, который приводится в движение двигателем.

Если двигатель работает в установившемся режиме с постоянной частотой вращения, то вращающий момент равен сумме противодействующих моментов:

$$M = M_0 + M_n = M_c \quad (1.2)$$

Если двигатель работает в переходном режиме, то на вал двигателя дей-

стствует еще динамический момент  $M_g$ .

$$M = M_c \pm M_g \quad (1.3)$$

Величина этого момент пропорциональна моменту инерции  $J$  вращающихся частей двигателя и нагружающего устройства:

$$M_g = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1.4)$$

где  $\omega$  - угловая скорость двигателя.

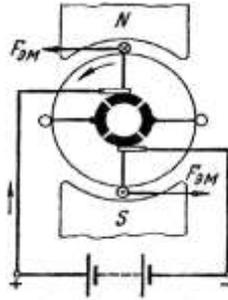


Рис. 1.1. Принцип действия двигателя постоянного тока.

В процессе работы двигателя якорь вращается в магнитном поле. При этом в его обмотке наводится э.д.с., которая всегда направлена навстречу току якоря. Именно поэтому ее называют противоэ.д.с.

$$E_a = C_e \Phi n \quad (1.5)$$

$C_e = \frac{pN}{60a}$  - коэффициент противоэ.д.с., постоянная для данной машины величина,  $n$  - частота вращения якоря, об/мин.

Напряжение, подведенное к цепи якоря двигателя  $U$ , уравнивается противоэ.д.с.  $E_a$  и падением напряжения на сопротивлении цепи якоря  $\Sigma r$ :

$$U = E_a + I_a \Sigma r \quad (1.6)$$

Выражение для тока якоря имеет вид:

$$I_a = \frac{U - E_a}{\Sigma r} \quad (1.7)$$

Подставив (1.5) в (1.7), запишем соотношение

$$U = C_e \Phi n + I_a \Sigma r,$$

преобразовав которое, найдем выражение для частоты вращения:

$$n = \frac{U - I_a \Sigma r}{C_e \Phi} \quad (1.8)$$

Из выражения (1.8) следует, что частоту вращения можно регулировать изменением подводимого к электродвигателю напряжения, сопротивления цепи якоря, магнитного потока.

## 2.2. Устройство электрической машины постоянного тока

Электрическая машина постоянного тока состоит из двух основных частей – неподвижной, называемой статором, и вращающейся, называемой якорем. Эти части разделены воздушным зазором. На рис. 1.2 показаны статоры машин постоянного тока: сборный (а) и шихтованный (б). Статор состоит из станины 1, на внутренней поверхности которой расположены полюсы 2. Главные полюсы машины состоят из сердечников и обмоток возбуждения 3. В нижней части сердечника имеется полюсный наконечник 4, который обеспечивает нужное распределение магнитной индукции в воздушном зазоре.

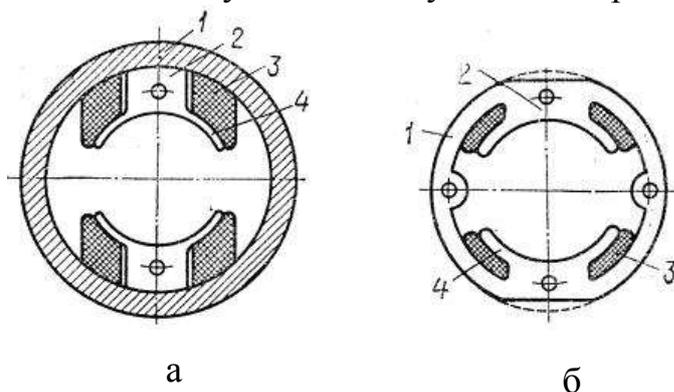


Рис. 1.2. Статоры машин постоянного тока.

Станина (1) электрической машины постоянного тока служит для крепления всех частей машины, является элементом магнитной цепи и изготавливается из стали или чугуна. Сердечник полюса (2) может быть любым, но чаще его набирают из штампованных листов электротехнической стали, шихтуя (собирая) их в пакет, стягиваемый шпильками. Полюсные наконечники (4) иногда выполняют как одно целое с сердечниками полюсов, а иногда шихтуют отдельно и крепят к сердечникам, обмотки полюсов (3) изготавливают из медного изолированного провода.

Якорь машины постоянного тока состоит из сердечника, обмотки якоря, коллектора и вала. Сердечник якоря представляет собой цилиндр, набранный из штампованных листов электротехнической стали толщиной 0,35...0,5 мм, которые перед сборкой покрывают специальным изолирующим лаком, чтобы уменьшить вихревые токи, возникающие в результате перемагничивания якоря, вызванного его вращением в магнитном поле (рис. 1.3).

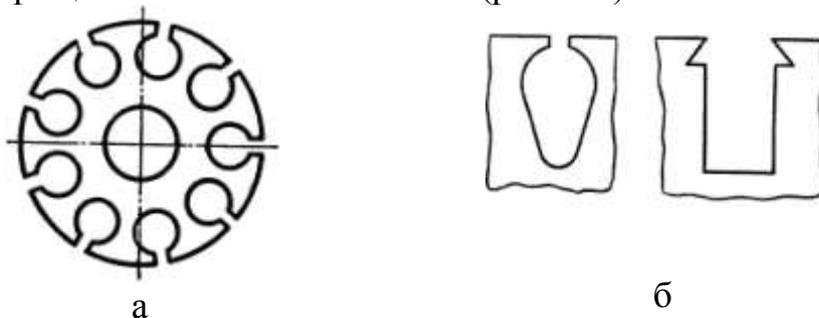


Рис. 1.3. Сердечник якоря:

а - лист сердечника якоря, б - форма пазов сердечника якоря.

После сборки сердечника якоря в его пазы укладывают активные стороны секций обмотки якоря. В машинах малой мощности пазы делают полузакрытыми, а в машинах средней и большой мощности – открытыми (рис. 1.36). Часто пазы якоря делают со скосом, что ослабляет пульсацию магнитной индукции в воздушном зазоре и способствует уменьшению вибраций и шума в процессе работы машины. Обмотка якоря состоит из секций, выполненных из медного изолированного провода круглого или прямоугольного сечения. Концы секций припаивают к пластинам коллектора (рис. 1.4).

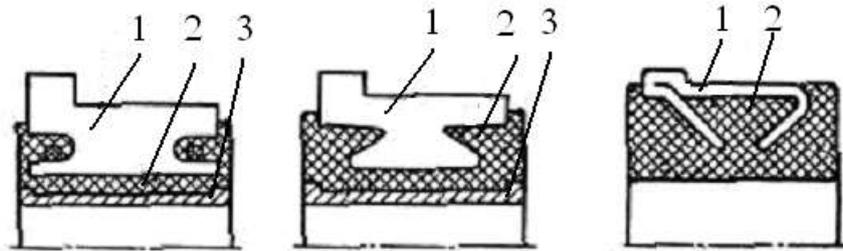


Рис. 1.4. Устройство коллектора.

Коллектор состоит из коллекторных пластин 1, изготовленных из холоднокатаной меди клинообразного профиля. Основанием коллектора служит втулка 3. У двигателей малой мощности пластины коллектора запрессовывают в пластмассу 2. Пластины коллектора изолируются друг от друга чаще всего с помощью миканита (склеенных специальным лаком пластинок следы). Коллектор, так же как и сердечник якоря, жестко закрепляют на валу.

Внешняя цепь машины связана с коллектором с помощью щеток. Щетки располагаются в щеткодержателях и прижимаются к коллектору пружинами. В машинах малой мощности щеткодержатели монтируются непосредственно в подшипниковом щите. Подшипниковых щитов два: передний - со стороны коллектора, задний – с противоположной стороны. Для присоединения обмоток машины к электрической сети машина снабжена коробкой выводов – клеммной платой.

Для работы электрической машины необходимо наличие магнитного поля. В большинстве машин постоянного тока это поле создается обмоткой возбуждения, питаемой постоянным током. По способам возбуждения различают:

- машины независимого возбуждения, в которых обмотка возбуждения ОВ питается от источника, электрически несвязанного с обмоткой якоря Я (рис. 1.5а),
- машины параллельного возбуждения, в которых обмотка возбуждения и обмотка якоря соединены параллельно (рис. 1.5,б),
- машины последовательного возбуждения, в которых обмотка возбуждения и обмотка якоря соединены последовательно (рис. 1.5,в),
- машины смешанного возбуждения, имеющие две обмотки возбуждения, одна из которых включена параллельно (ОВ1), а другая (ОВ2) - последовательно с обмоткой якоря (рис. 1.5,г).

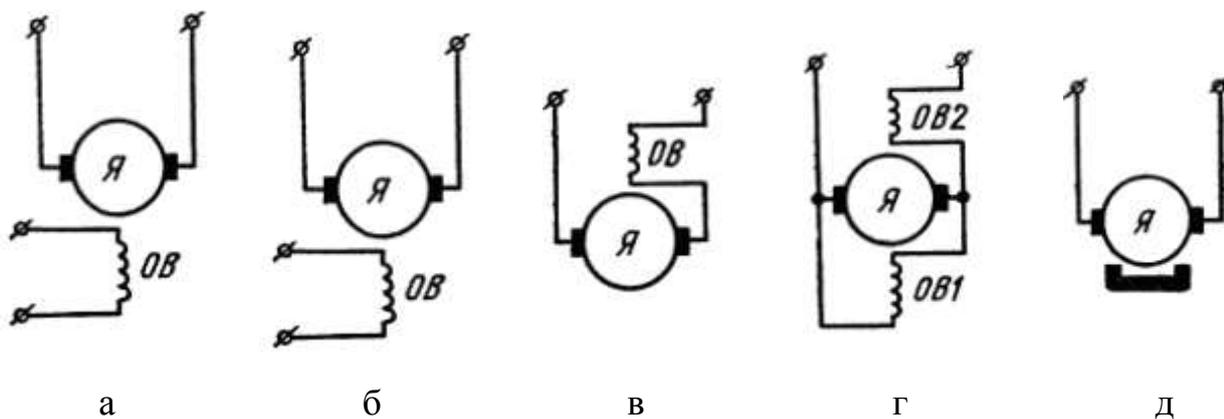


Рис. 1.5. Способы возбуждения электрических машин постоянного тока

Все перечисленные выше машины являются машинами с электромагнитным возбуждением. В последнее время широкое распространение получили машины с возбуждением постоянными магнитами (рис. 1.5, д).

Обмотка якоря машины постоянного тока представляет собой замкнутую систему проводников, уложенных в пазы якоря и соединенных с коллектором. Она состоит из секций – катушек. Каждая секция соединена с двумя коллекторными пластинами. Форма секций и порядок присоединения их к коллекторным пластинам определяется типом обмотки. Наибольшее распространение получили петлевая и волновая обмотки (рис. 1.6.)

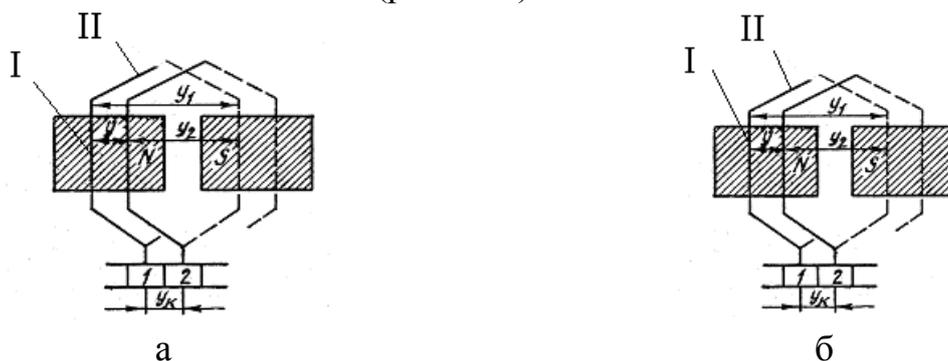


Рис. 1.6. Шаги простой петлевой и волновой обмоток

Концы секций простой петлевой обмотки (рис. 1.6а) присоединяются к соседним коллекторным пластинам. Каждая секция состоит из активных сторон I, располагающаяся в пазах, и лобовых частей II, посредством которых секции соединяются между собой и присоединяются к коллекторным пластинам. Чтобы выполнить схему простой петлевой обмотки, необходимо знать ее параметры:  $y_1$ ,  $y_2$ ,  $y$  – первый, второй и результирующий шаги по якорю;  $y_k$  – шаг по коллектору. Петлевые обмотки применяются в электрических машинах, рассчитанных на работу при сравнительно небольших напряжениях, но значительных токах.

В простой волновой обмотке (рис. 1.6,б) каждая секция присоединяется к двум коллекторным пластинам, расстояние между которыми соответствует двойному полюсному делению. Волновые обмотки применяются в электрических машинах повышенного напряжения при сравнительно небольшом токе.

### 2.3. Характеристики электрических машин постоянного тока.

Рассмотрим, характеристики электрических машин постоянного тока в зависимости от типа и назначения машины.

На рис. 1.7,а – г приведены рабочие и механические характеристики двигателя параллельного возбуждения.

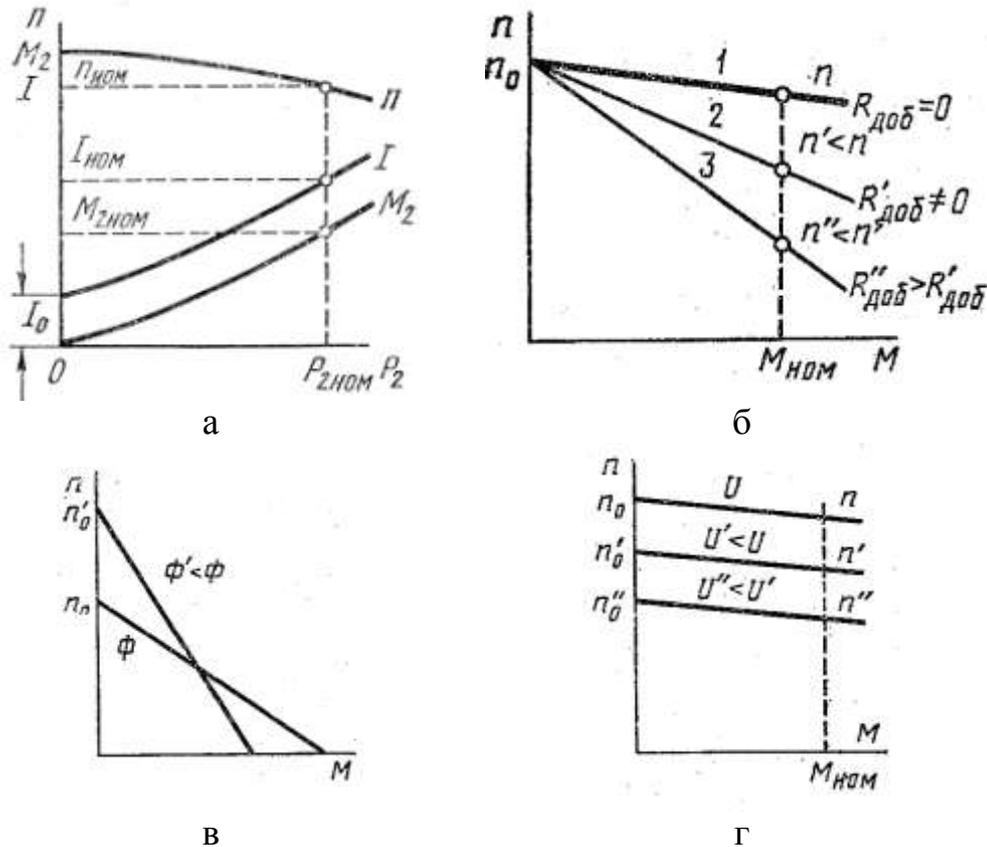


Рис. 1.7. Характеристики двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.

К рабочим характеристикам относят зависимость частоты вращения  $n$ , величины потребляемого тока  $I$  и полезного (нагрузочного) момента  $M_2$  от полезной мощности  $P_2$  при неизменных напряжении  $U$  и токе возбуждения  $I_v$ .

Механическая характеристика двигателя представляет собой зависимость частоты вращения якоря от момента  $n=f(M)$  при неизменных напряжении сети и сопротивлении цепи возбуждения. Если в цепь якоря ввести дополнительное сопротивление  $R_{доб}$ , то полученные механические характеристики (кривые 2 и 3 на рис. 1.7,б) будут искусственными в отличие от естественных характеристик при  $R_{доб} = 0$  (кривая 1).

Естественная характеристика двигателя параллельного возбуждения является «жесткой», т.к. при изменении момента нагрузки частота вращения изменяется незначительно (на 5-10 %). Искусственные характеристики двигателя с увеличением  $R_{доб}$  становится «мягкими».

На вид характеристики  $n=f(M)$  влияет также величина магнитного пото-

ка. Так, при уменьшении потока  $\Phi$ , увеличивается частота вращения идеального холостого хода  $n_0$  и одновременно повышается  $\Delta n$ . Это приводит к резкому изменению жесткости механической характеристики (рис. 1.7,в).

При изменении напряжения на якоре двигателя  $U$  изменяется частота  $n_0$ , а величина  $\Delta n$  остается постоянной. Следовательно, жесткость механических характеристик не меняется – они смещаются по высоте, оставаясь параллельными друг другу (рис. 1.7г).

Регулирование частоты вращения двигателей параллельного возбуждения осуществляется изменением подводимого напряжения, изменением сопротивления в цепи якоря, изменением магнитного потока.

Помимо указанных способов регулирования частоты вращения двигателей параллельного возбуждения, существует еще импульсный способ регулирования частоты вращения. Сущность этого способа иллюстрируется схемой, изображенной на рис. 1.8,а. Изменения тока в цепи обмотки якоря иллюстрируются графиком на рис. 1.8,б.

На рис. 1.9 приведены рабочие и механические характеристики двигателя последовательного возбуждения.

Ток возбуждения двигателя равен току якоря ( $I_b = I_a$ ), что придает этим двигателям особые свойства. Рабочие характеристики их нелинейны (рис. 1.9,а). Механические характеристики двигателя (рис. 1.9,б)  $n = f(M)$  также нелинейны. При введении добавочного сопротивления  $R_{доб}$  в цепь якоря механическая характеристика смещается, в область меньших частот вращения (кривая 2 на рис. 1.9,б). Регулирование частоты вращения в двигателе возможно тремя способами: изменением напряжения возбуждения, сопротивления цепи якоря, магнитного потока. Причем регулирование частоты вращения изменением напряжения и сопротивления цепи якоря производится так же, как и в двигателе параллельного возбуждения.

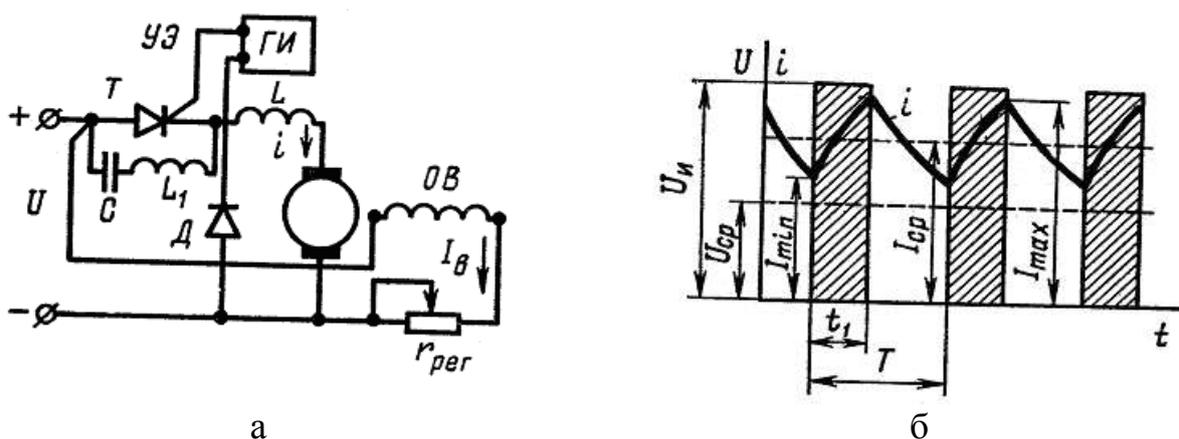


Рис. 1.8. Импульсное регулирование частоты вращения двигателя постоянного тока

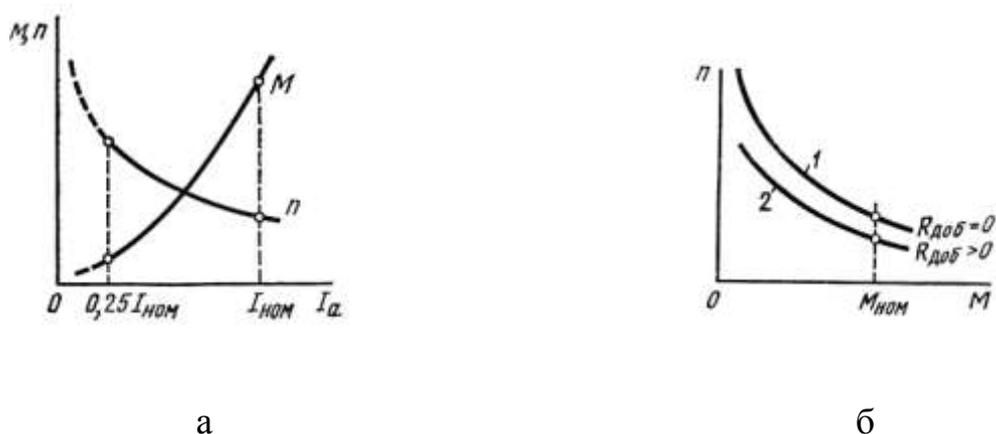


Рис. 1.9. Характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.

Двигатели постоянного тока с механическим коммутатором – коллектором – имеют ряд существенных недостатков, обусловленных наличием щеточно-коллекторного узла, что значительно ограничивает область их применения, особенно в тяжелых условиях эксплуатации (агрессивные среды, пониженное давление воздуха, тряска, вибрации и т.п.).

Для обеспечения надёжной работы в тяжелых условиях эксплуатации в системах автоматики применяются *бесконтактные двигатели постоянного тока*, у которых щеточно-коллекторный узел заменен полупроводниковым коммутатором, что обеспечивает высокую надежность работы. Бесконтактные двигатели постоянного тока, как правило, состоят из следующих основных элементов (рис. 1.10,а): бесконтактного двигателя (Д) с однофазной обмоткой на статоре и ротором в виде постоянного магнита, датчика положения ротора (ДПР), вырабатывающего сигналы управления, бесконтактного коммутатора (БК), осуществляющего по сигналам ДПР коммутацию токов в обмотках статора двигателя.

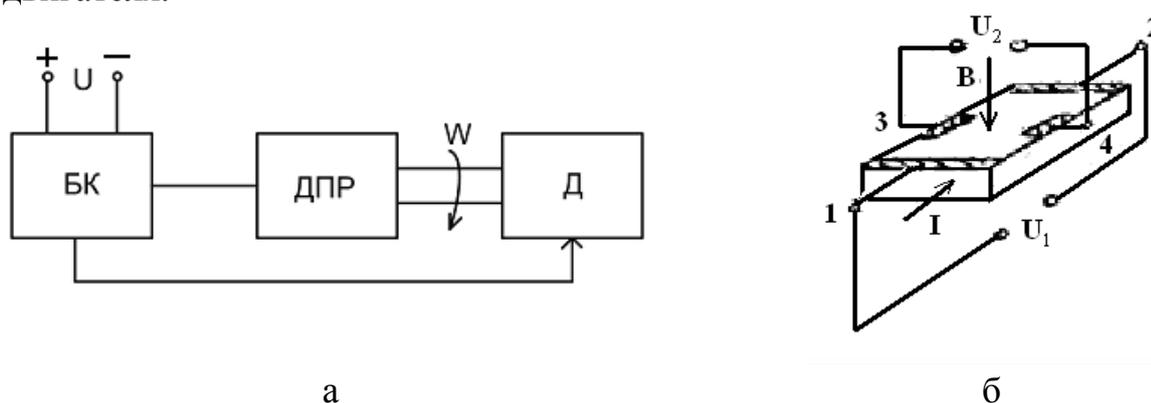


Рис. 1.10. Бесконтактный, двигатель постоянного тока: а – блок-схема, б – чувствительный элемент ДПР – датчик ЭДС Холла.

В качестве датчиков положения ротора применяют различные чувствительные бесконтактные элементы. Наиболее целесообразно использовать датчики ЭДС Холла (рис.1.10,б), представляющие собой тонкую полупроводниковую пластину с нанесенными на ней контактными площадками, к которым

припаяны выводы 1-2, подключенные к источнику напряжения  $U_1$ , и выводы 3-4, с которых снимают выходной сигнал  $U_2$ . Если в цепи 1-2 протекает ток  $I$ , а датчик находится в магнитном поле, вектор индукции  $B$  которого перпендикулярен плоскости пластины датчика, то в датчике наводится ЭДС и на выводах 3-4 появляется напряжение  $U_2$ .

На рис. 1.11 приведена принципиальная схема бесконтактного двигателя постоянного тока, для управления которым применяют датчики Холла и коммутатор, выполненный на транзисторах

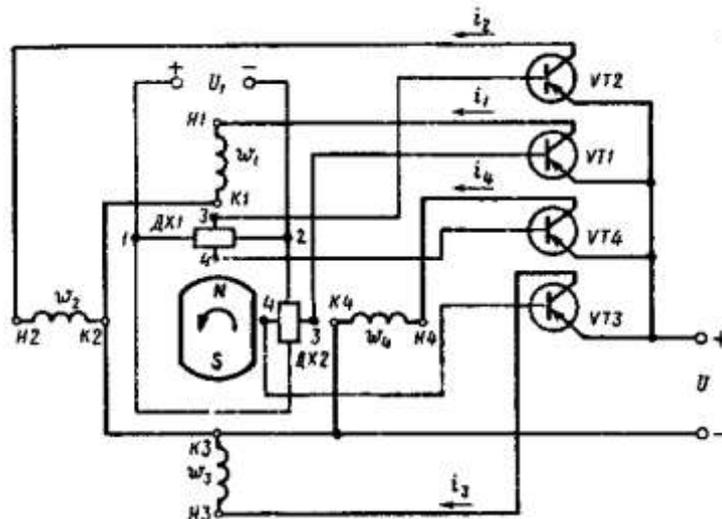


Рис. 1.11. Принципиальная схема БДПТ.

Четыре обмотки фазы двигателя  $W_1 - W_4$  расположены на явно выраженных полюсах шихтованного сердечника статора. Датчики Холла ДХ1 и ДХ2 установлены в пазах полюсных наконечников двух смежных полюсов. Силовые транзисторы VT1-VT4 работают в релейном (ключевом) режиме. Сигнал на открытие транзистора поступает от соответствующего датчика Холла. Питание датчиков Холла осуществляется от источника напряжения  $U_1$ . Число обмоток статора обычно не превышает четырех, но они имеют большое количество витков и, следовательно, повышенную индуктивность.

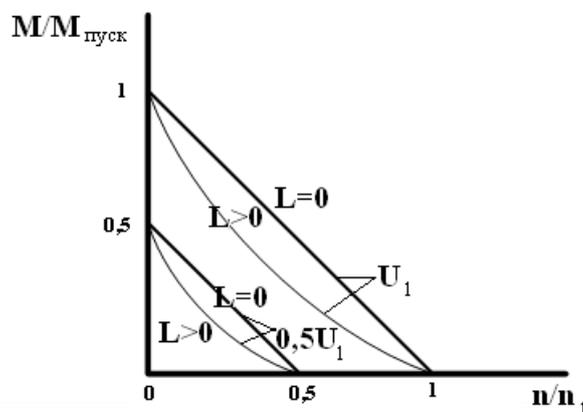


Рис. 1.12. Механические характеристики бесконтактного двигателя постоянного тока

Эта особенность отражается на характеристиках бесконтактного двигателя (рис. 1.12), которые в целом сходны с характеристиками коллекторных дви-

гателей постоянного тока. Недостатком бесконтактных двигателей постоянного тока является сложность устройства и высокая их стоимость.

В устройствах автоматики в настоящее время широко применяются управляемые электрические двигатели небольшой мощности, преобразующие электрический сигнал (напряжение управления) в механическое перемещение. Такие двигатели называются исполнительными. К ним предъявляются повышенные по сравнению с обычными двигателями требования. Поскольку они применяются обычно в следящих системах, то для них характерны частые пуски, остановки, реверсы.

Частота вращения этих двигателей, как правило, невелика и знакопеременна, поэтому их не снабжают вентилятором. Для сокращения времени переходных процессов исполнительные двигатели выполняются малоинерционными. Основными требованиями, предъявляемыми к этим двигателям, являются следующие:

- широкий диапазон регулирования частоты вращения;
- линейность регулировочных и механических характеристик;
- большой пусковой момент;
- малая мощность управления;
- быстроедействие;
- надежность в работе;
- малые габариты и масса.

Различают исполнительные двигатели постоянного тока с независимым возбуждением или с возбуждением от постоянных магнитов. При независимом возбуждении обмотка возбуждения постоянно подключена к сети, а на обмотку управления сигнал подается, когда необходимо вращение вала. В зависимости от того, на какую обмотку подают управляющий сигнал, различают два способа управления исполнительными двигателями: якорное и полюсное (рис.1.13).

Для исполнительных двигателей с постоянными магнитами управляющий сигнал подают на обмотку якоря. Коэффициент сигнала для двигателей с якорным управлением  $\alpha = \frac{U_y}{U_{\text{в}}}$ . Для двигателей, с постоянными магнитами

$\alpha = \frac{U_y}{U_{\text{ном}}}$ . Когда напряжение  $U_y=0$ , ток в обмотке якоря  $i_y$  и вращающий момент двигателя  $M$  равны нулю, а, следовательно, самоход исключается.



Рис. 1.13. Схемы включения двигателей постоянного тока при якорном (а) и полюсном (б) управлении

Изменяя  $U_y$ , можно регулировать частоту вращения двигателя. Уравнение механической характеристики имеет вид

$$m = \alpha - v \quad (1.9)$$

где  $m$  – относительное значение момента,  $m = \frac{M}{M_e}$ ;

$v$  – относительная частота вращения,  $v = \frac{n}{n_{ск}}$ ;

$M_k$  – момент, развиваемый двигателем при частоте вращения  $n = 0$  и коэффициенте сигнала  $\alpha=1$ .

$n_{ск}$  – частота вращения холостого хода двигателя при  $\alpha=1$

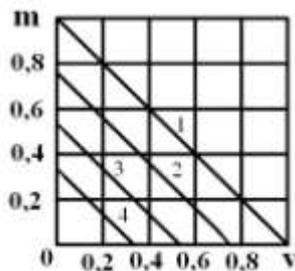
Из (1.9) следует, что механические характеристики двигателя при различных значениях  $\alpha$  линейны и параллельны (рис. 1.14,а). Регулировочные характеристики (1.10)

$$v = \alpha - m \quad (1.10)$$

при различных значениях  $m$  также линейны и параллельны (рис. 1.14,б),

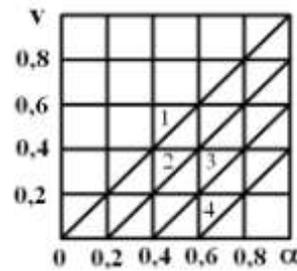
В двигателе с полюсным управлением напряжение управления подают на обмотку главных полюсов. Чтобы ограничить ток якоря  $i_a$ , при  $n=0$  в его цепь включают дополнительный резистор  $r_{доб}$ . Регулирование частоты вращения осуществляется путем изменения напряжения управления  $U_{\delta} = \alpha U_{\hat{a}}$ , т.е. изменением магнитного потока двигателя. Уравнение механической характеристики двигателя с полюсным управлением имеет вид:

$$m = \alpha - \alpha^2 v$$



а

- 1 –  $\alpha=1$
- 2 –  $\alpha=0,75$
- 3 –  $\alpha=0,5$
- 4 –  $\alpha=0,25$



б

- 1 –  $m=1$
- 2 –  $m=0,75$
- 3 –  $m=0,5$
- 4 –  $m=0,25$

Рис. 1.14. Механические и регулировочные характеристики двигателя при якорном управлении

Механические характеристики также линейны, но в отличие от двигателя с якорным управлением жесткость их при изменении  $\alpha$  не остается постоянной (рис. 1.15,а). Уравнение регулировочной характеристики имеет вид:

$$v = (\alpha - m) / \alpha^2 \quad (1.12)$$

Из уравнения (1.12) видно, что регулировочные характеристики двигателя с полюсным управлением нелинейны (рис; 1.15,б).

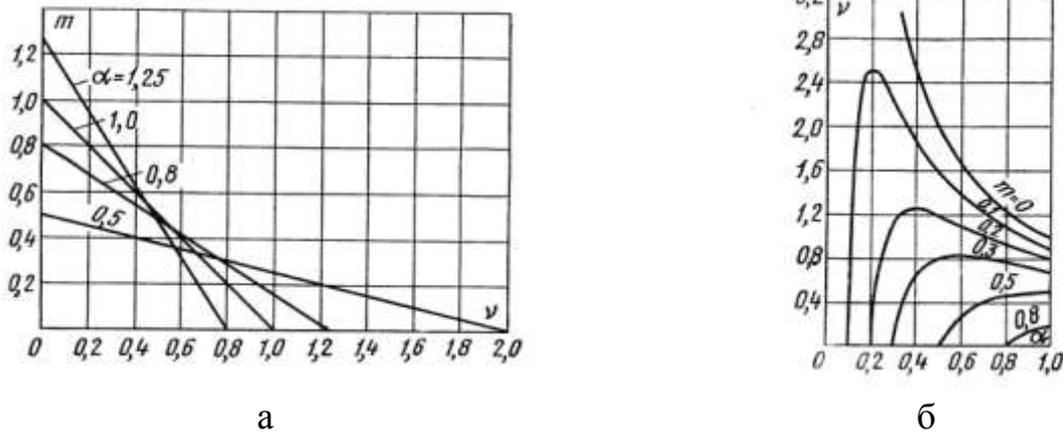


Рис. 1.15. Механические и регулировочные характеристики двигателя с полюсным управлением

Среди генераторов постоянного тока наибольший интерес представляют тахогенераторы. Они предназначены для преобразования механического перемещения в электрический сигнал. Основное требование, предъявляемое к тахогенераторам, линейность выходной характеристики

$$U_{mz} = kn = k \frac{d\alpha}{dt} \quad (1.13)$$

где  $U_{mz}$  – выходное напряжение тахогенератора,  $n$  – частота вращения ротора,  $k$  – коэффициент пропорциональности;  $\alpha$  – угол поворота.

Тахогенераторы используются для различных целей: измерения частоты вращения, осуществления обратной связи по скорости в системах автоматического регулирования, выполнения электрического дифференцирования (1.13) и интегрирования в схемах счетно-решающих устройств. Тахогенераторы постоянного тока имеют независимое возбуждение (рис. 1.16а) или возбуждение от постоянных магнитов.

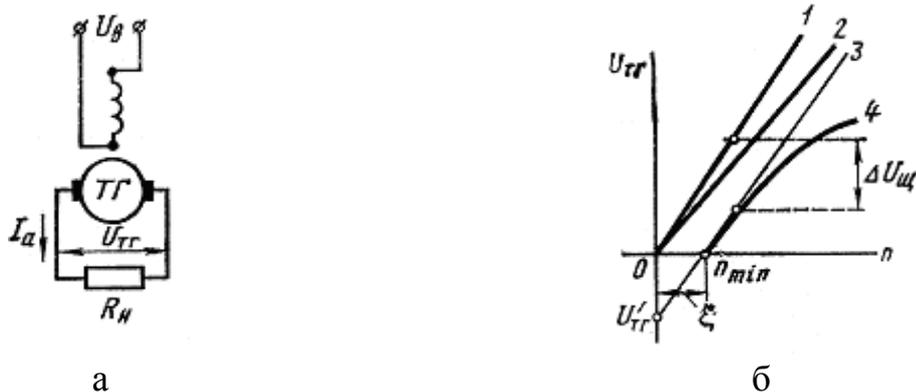


Рис. 1.16. Тахогенератор постоянного тока

Зависимость напряжения на выходе тахогенератора  $U_{mz}$  от частоты вращения  $n$  называется выходной характеристикой (рис. 1.16,б). Величина  $k = U_{mz}/n$  называется крутизной выходной характеристики. У современных тахогенераторов значение крутизны составляет 3...300 мВ/об/мин. Крутизна выходной характеристики зависит от сопротивления нагрузки  $r_n$ . При  $r_n = \infty$   $k$  имеет наибольшее значение (прямая 1, рис. 1.16,б). С уменьшением  $r_n$  уменьшается вели-

чина  $k$  (прямая 2, рис. 1.16,б).

За счет падения напряжения на щеточном контакте у тахогенератора появляется зона нечувствительности  $\xi$ , где  $U_{mz} = 0$  (прямая 3, рис. 1.16,б). Если магнитная система тахогенератора насыщена и сопротивление нагрузки  $r_n$  невелико, выходная характеристика отклоняется от линейной (прямая 4, рис. 1.16,б) за счет размагничивающего действия якоря.

### 3. Содержание отчета

В отчете должны быть приведены конструктивные схемы электрических машин постоянного тока, указанных в п. 1.1, описание принципа действия и особенностей функционирования устройств, таблицы номинальных эксплуатационных параметров, проведен анализ особенностей конструкций и номинальных значений эксплуатационных параметров и основных характеристик электрических машин различного функционального назначения.

### Библиографический список

1. Микроэлектродвигатели для систем автоматики: Технический справочник/ Под ред. Э.А. Лодочникова, Ф.М. Юферова. - М.: Энергия, 1969. - 765 с.
2. Верхопятницкий П.Д. Электрические элементы автоматики. - М.: Судпромгиз, 1963. - 535 с.
3. Электротехнический справочник/ Под ред. П.Г. Дудинского, Г.Н. Петрова, - М: Энергия, 1974. - 368 с.
4. Иванов-Смоленский А.И. Электрические машины. - М.: Энергия, 1980. - 928 с.
5. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. - М.: Высшая школа, 1987. - Ч.1. - 319 с.; Ч.2 -335 с.
6. Справочник по электрическим машинам в двух томах / Под общ.ред. И.П. Копылова., Б.К. Клокова. -М.: Энергоатомиздат, Т.1., 1988. - 456 с.; Т.2, 1989. - 688 с.

## *Лабораторная работа № 2*

### ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИЙ И ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

#### Программа работы

#### 1. Теоретические исследования

1.1. Изучить конструкции, составить конструктивные и принципиальные схемы исполнительных двигателей серии МО, 2АСМ, ДАТ, УАД, ЭМ, АДП, ДИД, тахогенераторов серий АТ, ТГ, ТД-2, тахометрических агрегатов серии ДГ; вращающихся трансформаторов и сельсинов ВТ, ВТМ, БС, СТСМ, СС, ЭД, ДС.

1.2. Пользуясь справочными данными, определить номинальные значения эксплуатационных параметров машин. Установить связь конструктивной схемы машины с ее функциональным назначением.

1.3. Ознакомиться с конструкциями и схемами обмоток электрических машин переменного тока.

#### 2. Пояснения и указания к работе

##### 2.1. Асинхронные машины. Назначение, устройство и принцип действия асинхронных машин

Асинхронные машины – наиболее распространенные электрические машины. Особенно широко они используются как электродвигатели. На долю асинхронных двигателей приходится не менее 80%, всех электродвигателей, выпускаемых электропромышленностью. Они широко используются в устройствах автоматики, бытовых и медицинских приборах, устройствах звукозаписи и т.д. Широкое распространение асинхронных двигателей объясняется простотой их конструкции, надежностью в работе, хорошими эксплуатационными свойствами, невысокой стоимостью и простотой в обслуживании. В настоящее время появилось большое количество разновидностей и модификаций асинхронных машин, в частности, асинхронные исполнительные двигатели, тахогенераторы, сельсины, вращающиеся трансформаторы и др.

Основным частями любого асинхронного двигателя является (рис. 2.1): неподвижная часть 1, называемая статором, и вращающаяся часть 2, называемая ротором. Статор и ротор разделены воздушным зазором, величина которого изменяется в диапазоне 0,1 ...1,5 мм в зависимости от мощности машины. Корпус машины 3 изготавливают из стали или алюминия. Статор машины выполняется шихтованным из листов электротехнической стали, что уменьшает потери на вихревые токи. Листы пакета статора штампуются толщиной 0,35 или 0,5 мм и имеют на внутренней стороне пазы, в которые укладывают обмотку статора. Листы стали перед сборкой в пакет изолируют, покрывая слоем лака.

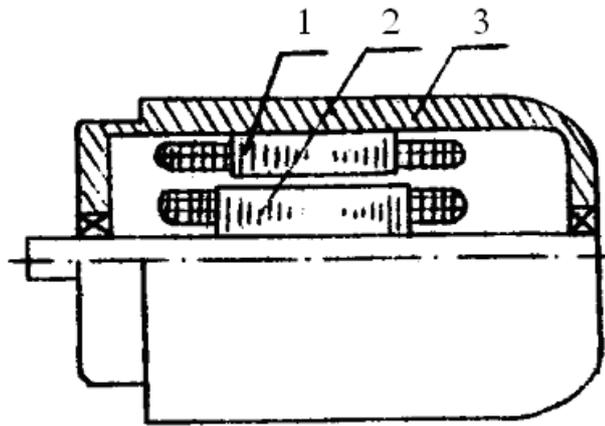


Рис. 2.1. Принципиальная схема асинхронного двигателя

Пазы статора могут быть открытыми, полуоткрытыми или полузакрытыми (рис. 2.2,а). В машинах малой мощности применяются полузакрытые пазы.



Рис. 2.2. Форма пазов статора и ротора.

Ротор асинхронного двигателя обычного исполнения представляет собой набранный из штампованных листов электротехнической стали сердечник с пазами. В зависимости от тока обмоток роторы асинхронных двигателей делятся на короткозамкнутые и фазные. В машинах малой мощности обычно применяют короткозамкнутые роторы, в пазах которых расположены медные или алюминиевые стержни, соединенные с торцов короткозамыкающими кольцами (рис. 2.3 а,б). Обмотка в этом случае имеет вид беличьей клетки. Форма пазов ротора может быть самой различной (рис. 2.2,б). В двигателях с фазным ротором ротор имеет трехфазную обмотку, с таким же числом полюсов, что и обмотка статора. Обмотку ротора соединяют по схеме «звезда», три конца которой выводят к трем контактными кольцам, вращающимся вместе с валом машины

Асинхронные исполнительные двигатели часто имеют полый немагнитный ротор, которым выполняется в виде тонкостенного алюминиевого стакана и не имеет сердечника (рис. 2.3 в, г). Такая конструкция обладает малым моментом инерции и обеспечивает весьма ценное свойство – быстродействие. Эти двигатели выпускаются мощностью от долей до сотен ватт, как на промышленную, так и на повышенные частоты – 400, 500, 800 и 1000 Гц. Внутренний статор служит для уменьшения магнитного сопротивления на пути рабочего магнитного потока.

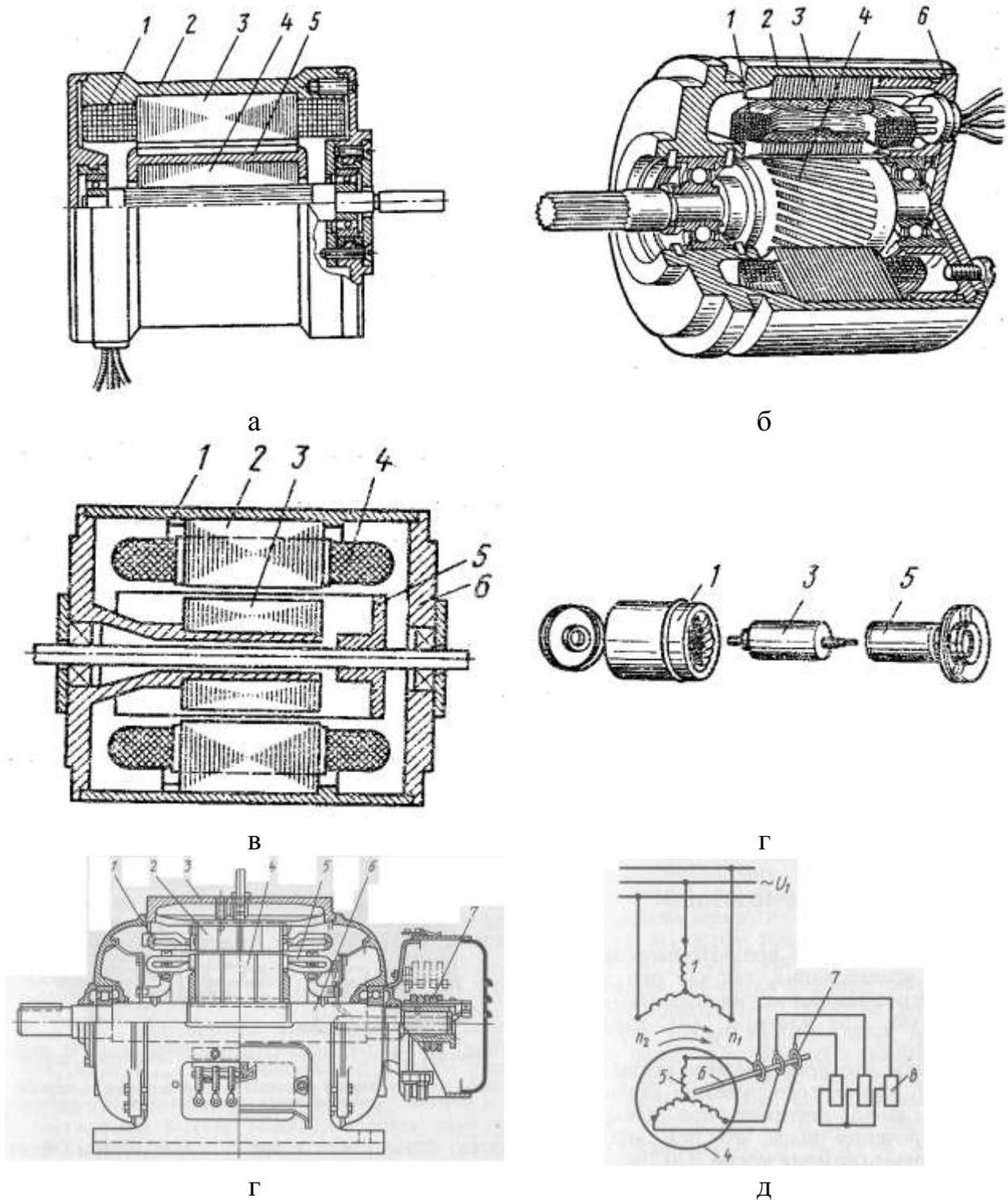


Рис. 2.3. Асинхронные двигатели: с беличьей клеткой на роторе (а, б, где 1 – обмотка статора, 2 – корпус, 3 – статор, 4 – ротор, 5 – беличья клетка, 6 – подшипниковый щит), с полым немагнитным ротором (в, г, где 1 – корпус, 2 – внешний статор, 3 – внутренний статор, 4 – обмотка статора, 5 – полый немагнитный ротор, 6 – подшипниковый щит), с фазным ротором (г, где 1 – обмотка статора, 2 – сердечник статора, 3 – корпус, 4 – сердечник ротора, 5 – обмотка ротора, 6 – вал, 7 – кольца, 8 – пусковой реостат; д – схема включения)

Наряду с двигателями, имеющими полые немагнитные и короткозамкнутые роторы (рис. 2.3), в качестве исполнительных и силовых двигателей применяются двигатели с полыми ферромагнитными роторами. Статоры таких двигателей ничем не отличаются от статоров двухфазных асинхронных машин, а ротор выполняется в виде полого ферромагнитного цилиндра, который укрепляется на валу с помощью двух или одной металлических пробок. Так как ротор ферромагнитный и магнитный поток замыкается непосредственно по ротору, отпадает необходимость во внутреннем статоре.

Рассмотрим принцип действия асинхронного двигателя на примере трехфазного двигателя с короткозамкнутой обмоткой ротора. На статоре трехфазной машины расположены три смещенные друг относительно друга на 120 эл. градусов обмотки. Токи фаз сдвинуты друг относительно друга во времени на  $1/3$  периода. В результате создается вращающееся магнитное поле, частота вращения которого, или синхронная частота

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} \quad (2.1)$$

где  $f_1$  - частота питающего тока;  $p$  - число пар полюсов обмотки статора, определяется длиной шага обмотки и схемой ее соединения.

Если ротор неподвижен или частота его вращения меньше синхронной, то вращающееся магнитное поле пересекает проводники обмотки ротора и индуцирует в них э.д.с., направление которой определяется правилом правой руки. На проводники с током, расположенные в магнитном поле, действуют электромагнитные силы, направление которых определяется правилом левой руки. Если момент этих сил достаточно велик, то ротор приходит во вращение и его установившаяся частота вращения  $n_2$  соответствует условию равенства электромагнитного момента тормозному,  $M = M_T$ . Тормозной момент создается внутренними силами трения и силами нагрузки механизма, приводимого во вращение. Такой режим работы называется двигательным. Относительную разность частот вращения магнитного поля и ротора называют скольжением

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

Часто скольжение выражают в процентах. Очевидно, что в двигательном режиме  $1 > S > 0$ .

Если ротор асинхронной машины разогнать, например, с помощью двигателя, до частоты больше синхронной, то асинхронная машина перейдет в генераторный режим, при этом  $S < 0$ . Если изменить направление вращения ротора (или магнитного поля) так, чтобы магнитное поле и ротор вращались в противоположных направлениях, то машина будет получать из сети активную мощность. Однако в этом случае электромагнитный момент  $M$  направлен против вращения ротора, т.е. является тормозящим. Этот режим называют режимом электромагнитного торможения, для него  $n_2 < 0$ ,  $S > 1$ .

Таким образом, характерной особенностью асинхронной машины являет-

ся наличие скольжения, т.е. неравенство частот вращения  $n_1$  и  $n_2$ . Поэтому машину называют асинхронной.

## 2.2. Механические характеристики асинхронных двигателей

Чаще всего свойства асинхронных двигателей оцениваются зависимостью частоты вращения ротора  $n_2$  от вращающего момента  $M$ ,  $n_2 = f(M)$  или  $M = f(n_2)$ . Иногда эта зависимость выражается в виде  $M = f(s)$  или  $M = f(v)$ , где  $v = n_2/n_1$ . При этом

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = 1 - v \quad (2.3)$$

Механическая характеристика (рис. 2.4.а, б, в) имеет максимальный момент при частоте вращения  $n_2 \approx (0,8 \dots 0,9)n_1$ , при частоте вращения  $n_2 = n_1$  вращающий момент  $M = 0$ , а при  $n_2 = 0$  определяется пусковой момент, который составляет  $M_{II} = (0,3 \dots 0,7)M_{max}$ .

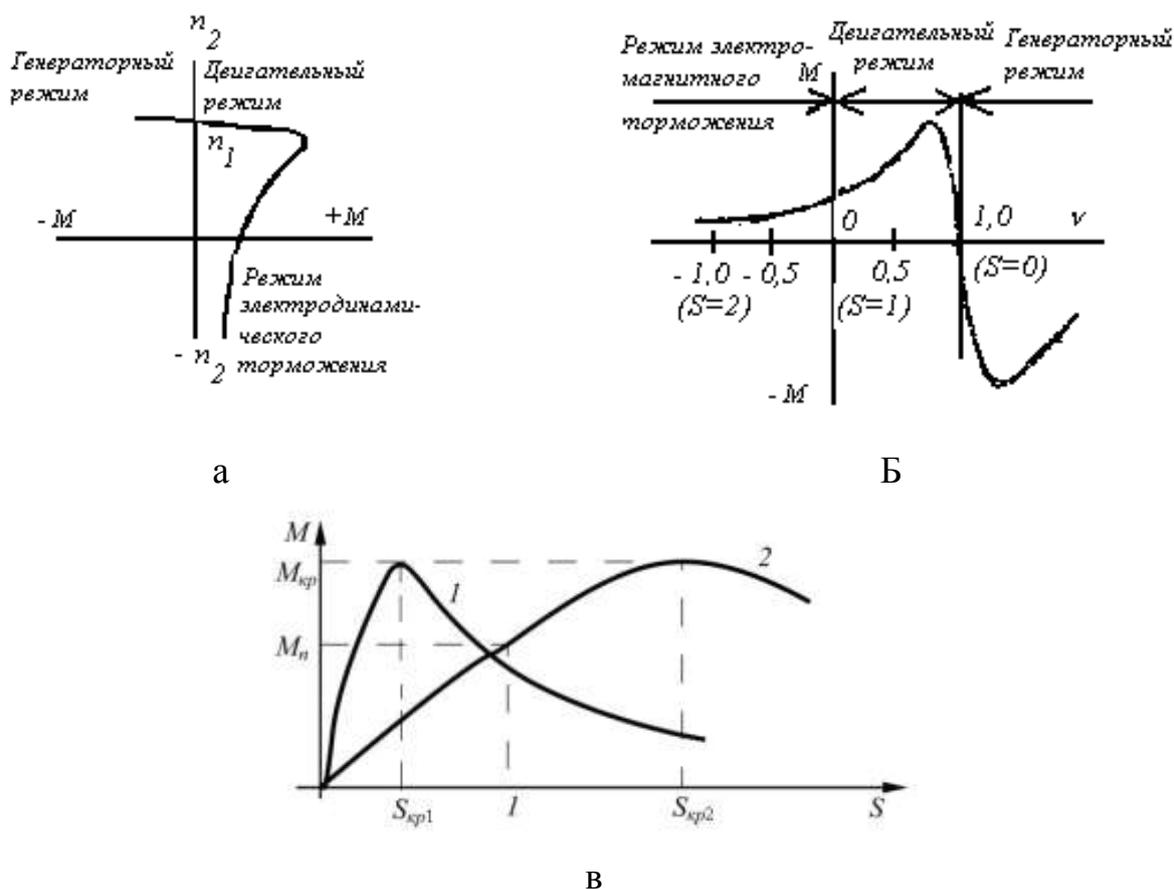


Рис. 2.4. Механические характеристики асинхронной машины

Скольжение, при котором момент имеет максимальное значение, называется критическим,  $S_{кр}$ .

## 2.3. Способы управления исполнительными двигателями.

Асинхронные исполнительные двигатели, применяемые в устройствах автоматики, являются управляемыми. Главным образом это двухфазные двига-

тели с полым немагнитным ротором (рис. 2.5,а). Одна из обмоток статора, обмотка возбуждения, подключается к сети переменного тока с напряжением  $U_в$ . К обмотке управления статора подводится напряжение управления  $U_y$ . Различают три основных способа управления частотой вращения исполнительного двигателя: амплитудный, фазовый, амплитудно-фазовый.

При амплитудном управлении изменяется только амплитуда напряжения управления  $U_y$ . Векторы напряжений управления и возбуждения при всех значениях напряжения  $U_y$  образуют угол  $90^\circ$  (рис. 2.5,б).

Напряжение управления обычно выражают в относительных единицах как отношение  $U_y$  к  $U_в$ , приведенное к числу витков обмотки управления

$$\alpha = \frac{kU_y}{U_в} \quad (2.4)$$

где  $k = W_в / W_y$  - коэффициент трансформации.

Величину  $\alpha$ , называют эффективным коэффициентом сигнала управления.

Фазовое управление характерно тем, что  $U_y$  остается неизменным по величине и равным  $U_в/k$ , а регулирование частоты вращения достигается путем изменения угла сдвига фаз  $\varphi$  между векторами  $U_y$  и  $U_в$  (рис. 2.5,в). При амплитудно-фазовом управлении изменяются как амплитуда, так и угол сдвига фаз между  $U_y$  и  $U_в$ .

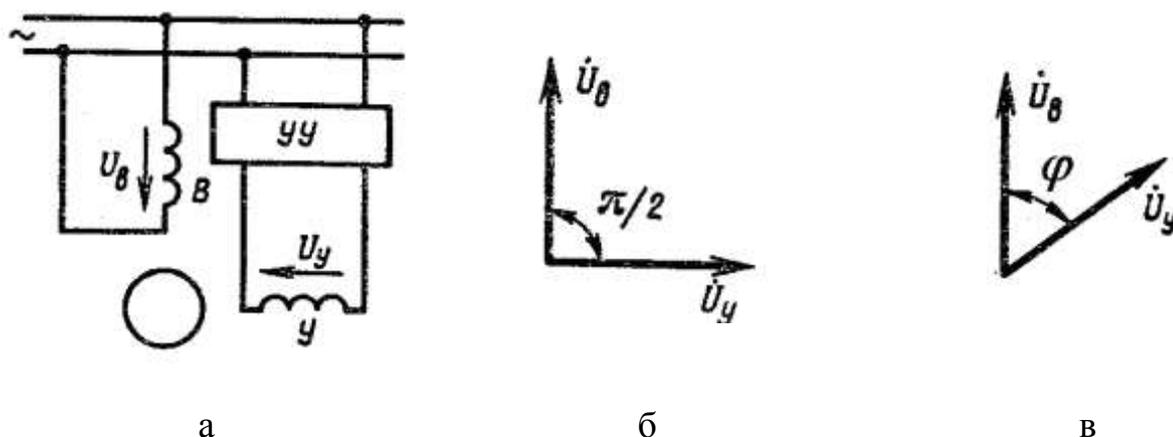


Рис. 2.5. Двухфазный асинхронный двигатель с полым немагнитным ротором

На рис. 2.6 приведены механические и регулировочные характеристики двигателя с амплитудно-фазовым управлением. Достоинствами амплитудно-фазового управления является сравнительная простота схемы и возможность получения значительных пусковых моментов.

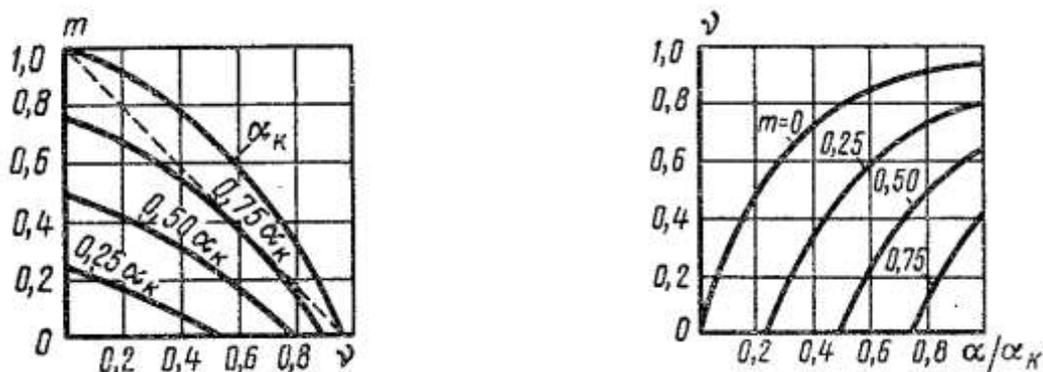


Рис. 2.6. Характеристики с амплитудно-фазовым управлением.

Помимо перечисленных выше способов управления асинхронными двигателями для трехфазных двигателей применяют еще два способа: регулирование частоты вращения изменением частоты тока в статоре и изменением числа полюсов обмотки статора.

Частотное регулирование основано на изменении синхронной частоты вращения  $n = \frac{60f_1}{p}$ . Для осуществления этого способа регулирования необходим источник питания двигателя переменным током с регулируемой частотой. В качестве таких источников могут применяться электромашинные или полупроводниковые преобразователи частоты.

Регулирование частоты вращения изменением числа полюсов обмотки статора дает ступенчатую регулировку. Изменять число полюсов в обмотке статора можно либо укладкой на статоре двух обмоток с разным числом полюсов, либо укладкой одной обмотки, конструкция которой позволяет путем переключения катушечных групп получать различное число полюсов. Последний способ получил наибольшее применение.

#### 2.4. Быстродействие исполнительных двигателей

Время разгона исполнительного двигателя определяется главным образом электромеханическими процессами, т.к. из-за большого активного сопротивления ротора электромагнитные процессы очень быстротечны. Обычно быстродействие двигателя характеризует его электромеханическая постоянная времени  $T_{эм}$ , которая примерно на порядок выше электромагнитной постоянной времени  $T_s = \frac{L}{R}$ , обусловленной индуктивностью двигателя. Значение  $T_{эм}$  определяется из условий разгона ротора двигателя при статическом моменте на валу  $M_{cm}=0$ . При этом уравнение, описывающее процессы в механической подсистеме

$$J \frac{d\omega}{dt} + M_{cm} = M \quad (2.5)$$

принимает вид

$$J \frac{d\omega}{dt} = M \quad (2.6)$$

где  $J$  – момент инерции вращающихся масс. Для идеализированного двигателя линейная механическая характеристика имеет вид

$$M = M_n \left(1 - \frac{\omega}{\omega_0}\right) \quad (2.7)$$

где  $M_n$  – пусковой момент,  $\omega_0$  – угловая скорость холостого хода.

Тогда с учетом (2.7) уравнение (2.6) можно преобразовать к виду

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_0 - \omega}{T_{эм}} \quad (2.8)$$

где

$$T_{эм} = \frac{J\omega_0}{M_n} \quad (2.9)$$

Решив уравнения (2.8), получим

$$\omega = \omega_0(1 - e^{-t/T_{эм}}) \quad (2.10)$$

уравнение кривой разгона двигателя (рис. 2.7).

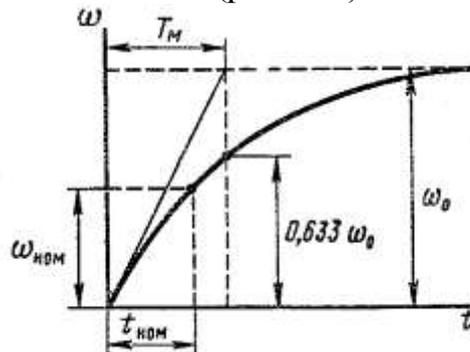


Рис. 2.7. Кривая разгона исполнительного двигателя.

Угловая скорость вращения  $\omega$  асимптотически стремится к установившемуся значению  $\omega_0$ , при  $t=T_{эм}$ ,  $\omega = \omega_0(1 - e^{-1}) = 0,633 \omega_0$ . Следовательно,  $T_{эм}$  можно рассматривать как время разгона двигателя до угловой скорости, соответствующей  $0,633 \omega_0$ .

## 2.6. Асинхронный тахогенератор

Асинхронный тахогенератор подобно тахогенераторам постоянного тока применяют в мехатронных системах для преобразования механического вращения в электрический сигнал. В идеальном случае тахогенератор должен давать на выходе напряжение, пропорциональное частоте вращения:

$$U = kn \quad \text{или} \quad U = k \frac{d\Theta}{dt} \quad (2.11)$$

Эту зависимость называют выходной характеристикой тахогенератора. Конструкция асинхронного тахогенератора аналогична конструкции асинхронного исполнительного двигателя с полым немагнитным ротором. На статоре в пазах уложены две обмотки, сдвинутые в пространстве на  $90^\circ$ . Одна из обмоток возбуждения постоянно включена в сеть, другая, генераторная, присоединена к нагрузке, т.е. является выходной. Основным показателем качества работы тахогенератора является линейность выходной характеристики. На рис.2.8 изобра-

жены выходные характеристики некалиброванного (а) и калиброванного (б) асинхронного тахогенератора.

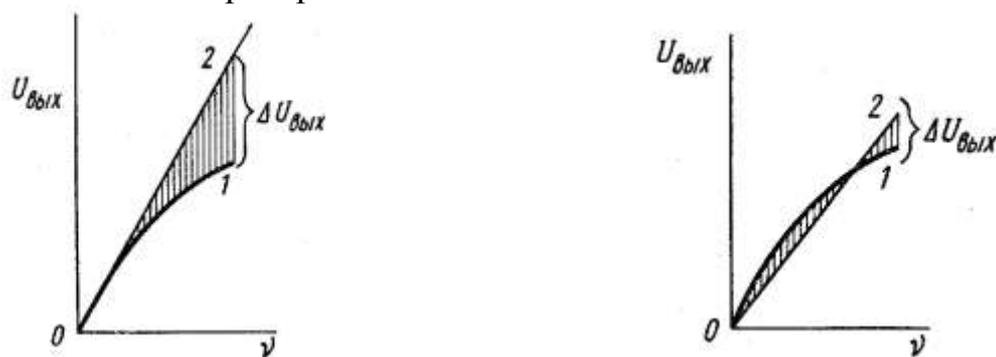


Рис. 2.8. Реальная (1) и идеальная (2) выходная характеристика асинхронного тахогенератора

Причинами, вызывающими погрешности тахогенератора, являются: технологические неточности изготовления, электромагнитная реакция ротора, изменение сопротивления ротора при изменении частоты вращения, изменение сопротивления обмоток и магнитного сопротивления по различным осям под влиянием температуры, насыщения и др.

## 2.6. Вращающиеся трансформаторы и сельсины

Вращающимися (поворотными) трансформаторами называют электрические микромашины переменного тока, преобразующие угол поворота ротора в напряжение, пропорциональное этому углу или некоторым его функциям. Подробно устройство, принцип действия и характеристики вращающихся трансформаторов изложены в лабораторной работе № 6.

Электрические машины синхронной связи служат для синхронного и синфазного поворота или вращения двух или нескольких осей механически не связанных между собой. В простейшем случае синхронную связь представляют с помощью двух одинаковых, электрически соединенных между собой индукционных машин, называемых сельсинами. Одну из машин, механически соединенную с ведущей осью, называют датчиком, а другую, соединенную с ведомой осью, – приемником. Эта система работает так, что при повороте ротора сельсина-датчика на какой-либо угол  $\Theta_d$ , ротор сельсина-приемника поворачивается на такой же угол  $\Theta_n$ . Следовательно, система стремится ликвидировать рассогласование между положениями роторов датчика и приемника. Системы синхронной связи подразделяют на два основных вида: синхронного поворота (передачи угла) и синхронного вращения (электрического вала). Различают два основных режима работы сельсинов: индикаторный и трансформаторный. При индикаторном режиме (рис. 2.9) ротор сельсина-приемника соединяют непосредственно с ведомой осью. Его применяют при малом значении тормозного момента на ведомой оси, обычно в тех случаях, когда на оси укреплен хорошо уравновешенная стрелка индикатора (отсюда название – индикаторный). При трансформаторном режиме (рис. 2.10) – сигнал о наличии рассогласования между положениями роторов датчика и приемника подается через усилитель на

исполнительный двигатель, который поворачивает ведомую ось и ротор сельсина-приемника, ликвидируя рассогласование. При этом выходной сигнал приемника пропорционален синусу угла рассогласования подобно вращающемуся трансформатору, поэтому такой режим получил название трансформаторного.

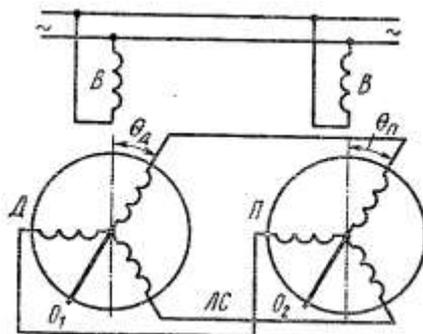


Рис. 2.9. Схемы включения сельсинов в индикаторном режиме

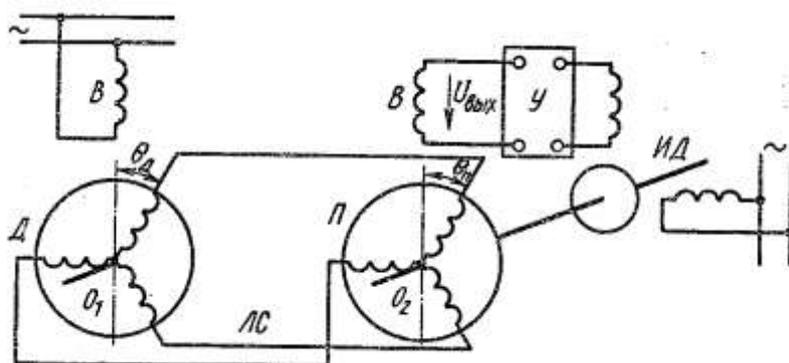


Рис. 2.10. Схема включения сельсинов в трансформаторном режиме

Сельсины имеют две обмотки: первичную, или обмотку возбуждения и вторичную, или обмотку синхронизации. В зависимости от числа фаз обмотки возбуждения различают одно- и трехфазные сельсины. Обмотку синхронизации в обоих случаях выполняют трехфазной. Трехфазные сельсины по конструкции подобны трехфазным асинхронным двигателям с контактными кольцами на роторе. Однофазные сельсины аналогичны однофазным асинхронным машинам. В системах автоматики применяют контактные и бесконтактные сельсины. Помимо этого используют дифференциальные сельсины, когда требуется поворачивать ведомую ось на угол, равный сумме или разности углов поворота двух ведущих осей. Еще одной разновидностью сельсинов являются магнесины – миниатюрные бесконтактные сельсины, применяемые в системах передачи угла при весьма малых моментах сопротивления на валу приемника и малом расстоянии между датчиком и приемником.

## 2.7. Синхронные машины

Синхронными машинами называют электрические машины переменного тока, у которых магнитное поле, созданное обмоткой переменного тока, враща-

ется в пространстве с той же частотой, что и ротор, т.е. синхронно с ротором. В мехатронных системах широко применяются синхронные микродвигатели. Они используются там, где необходимо поддерживать постоянную частоту вращения (в лентопротяжных механизмах самопишущих приборов, радиоаппаратуре, программных устройствах и др.). В ряде случаев синхронные микромашины применяются как генераторы, например, для получения переменного тока повышенной частоты (индукторные генераторы) и измерения частоты вращения (синхронные тахогенераторы).

В зависимости от особенностей электромагнитной системы синхронные микромашины подразделяют на следующие типы: двигатели и генераторы с постоянными магнитами, реактивные двигатели, гистерезисные двигатели, индукторные генераторы и двигатели; шаговые двигатели.

Любая синхронная машина состоит из двух основных частей: неподвижного статора и вращающегося ротора, разделенных воздушным зазором (рис. 2.11).

Конструктивно статор синхронной машины аналогичен статору асинхронной машины. Сердечник статора набирают из штампованных изолированных листов электротехнической стали, в пазах его размещают обмотку переменного тока (обычно трехфазную). На валу укрепляют ротор с обмоткой возбуждения, концы которой подводят к контактным кольцам. Постоянный ток, проходя по обмотке возбуждения, создает магнитное поле ротора – поле возбуждения. В синхронных машинах применяют два способа возбуждения: электромагнитный или постоянными магнитами. Выше описано электромагнитное возбуждение.

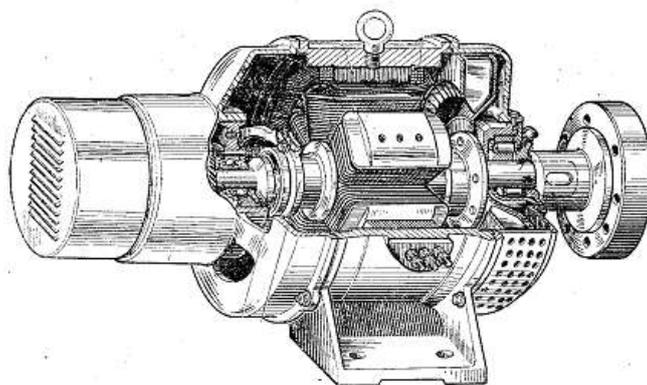


Рис.2.11. Устройство синхронной машины

В случае возбуждения постоянными магнитами ротор не имеет обмотки возбуждения, а его полюса представляют собой постоянный магнит. Это дает возможность получить машину без контактных колец, а, следовательно, повысить ее надежность и к.п.д. Наибольшее применение получили двигатели двух конструктивных исполнений: с радиальным (рис.2.12, а) и аксиальным (рис.2.12, б) расположением блока постоянных магнитов и стального пакета ротора с короткозамкнутой обмоткой.

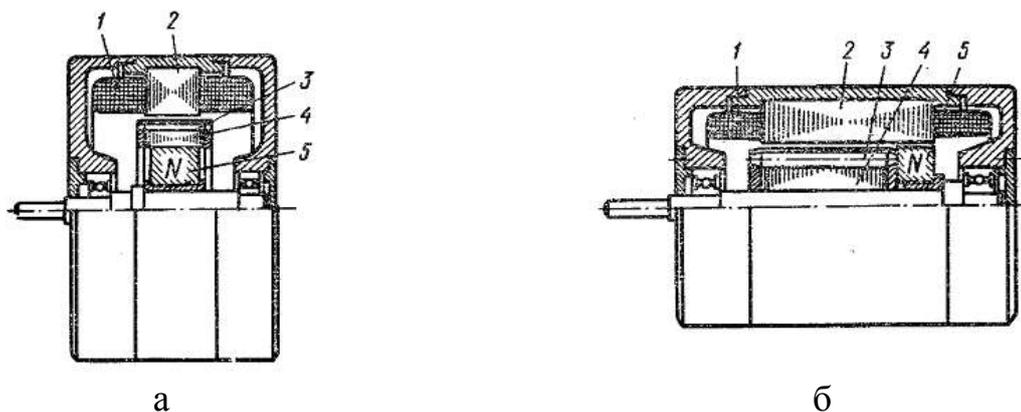


Рис. 2.12. Устройство синхронного двигателя с постоянными магнитами: 1 – обмотка статора, 2 – статор, 3 – пусковая обмотка типа «беличья клетка», 4 – пакет ротора, 5 – постоянные магниты.

Ротор синхронного генератора приводится в движение первичным двигателем. Магнитное поле ротора, созданное постоянным током, подведенным к обмотке возбуждения, вращаясь вместе с ротором, пересекает проводники обмотки статора и наводит в ее фазах э.д.с. одинаковой величины и частоты, но сдвинутые по фазе на  $120^\circ$  относительно друг друга. При подключении к выводам обмотки статора потребителя энергии в цепи генератора появляются токи.

Таким образом, синхронный генератор, потребляя механическую энергию первичного двигателя, отдает электрическую энергию переменного тока.

Обмотка статора синхронного двигателя создает вращающееся магнитное поле с тем же числом полюсов, что и на роторе. Благодаря магнитной связи этого поля с полюсами ротора возникает электромагнитный момент. В результате электрическая энергия, поступающая из сети в обмотку статора синхронного двигателя, преобразуется в механическую энергию вращения ротора. Существенным недостатком синхронных двигателей является отсутствие у них пускового момента. Инерционность ротора не позволяет ему мгновенно развить частоту вращения, равную частоте вращения поля, которая устанавливается, как только в обмотке статора появляется ток. В результате над полюсами ротора проходят полюсы поля статора разной полярности. Поэтому между полем статора и полюсами ротора не возникает устойчивой магнитной связи, способной создать электромагнитный момент, действующий в одном направлении.

Для пуска синхронного двигателя необходимо предварительно привести ротор во вращение с частотой, близкой к синхронной. В этом случае при медленном перемещении поля относительно ротора он втягивается в синхронизм, т.е. начинает вращаться с синхронной частотой. Для получения пускового момента на роторе (рис. 2.12) кроме блока постоянных магнитов устанавливают собранный из листовой стали пакет, в пазах которого размещают пусковую короткозамкнутую обмотку типа «беличья клетка», которая по окончании процесса пуска служит демпфером, препятствующим качаниям ротора. Пуск синхронного двигателя с электромагнитным возбуждением осуществляется в следующем порядке: замкнув обмотку возбуждения на сопротивление  $r$  (рис. 2.13), подключают к сети обмотку статора. Вращающееся поле статора наводит в

пусковой обмотке э.д.с., которые создают в стержнях токи. В результате взаимодействия этих токов с вращающимся полем статора образуется вращающий момент, который заставляет ротор двигателя вращаться. Рассмотренный способ пуска синхронного двигателя называют асинхронным, так как в этот период двигатель работает как асинхронный. Когда частота вращения ротора достигнет величины, близкой к синхронной ( $n_2 \approx 0,95n_1$ ), обмотку возбуждения подключают к источнику постоянного тока, и возбужденный ротор втягивается в синхронизм.

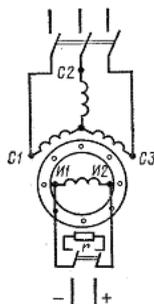


Рис. 2.13. Схема включения синхронного двигателя при асинхронном пуске.

В процессе асинхронного пуска двигатель должен быть невозбужденным, в противном случае магнитный поток возбуждения наводит в обмотке статора э.д.с., которая создает ток. Взаимодействие последнего с полем ротора образует тормозящий момент. Этим моментом обусловлены худшие пусковые характеристики синхронных двигателей с постоянными магнитами. Кроме того, в процессе пуска двигателя нельзя оставлять разомкнутой обмотку возбуждения, так как в начальный момент пуска в ней наводится э.д.с. величина которой может оказаться опасной для изоляции обмотки. Поэтому обмотку возбуждения перед пуском двигателя замыкают на сопротивление  $r$ , примерно в десять раз большее сопротивления обмотки возбуждения.

Кроме асинхронного пуска, синхронные двигатели могут быть пущены в ход еще двумя способами с помощью вспомогательного (разгонного) двигателя и плавным повышением частоты тока – частотный пуск.

Рабочие характеристики синхронного двигателя (рис. 2.14) представляют собой зависимости частоты вращения  $n_1$ , потребляемого тока  $I_1$ , полезного момента  $M_2$  и коэффициента мощности  $\cos \varphi$  от полезной мощности  $P$  при неизменных напряжении  $U_1$ , частоте сети  $f_1$ , а также величине тока возбуждения  $I_6$ .

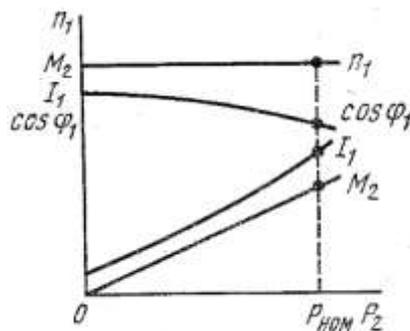


Рис. 2.14. Рабочие характеристики синхронного двигателя.

Поскольку частота вращения синхронного двигателя  $n_2$  равна синхронной частоте  $n_1 = 60f_1/p$ , следовательно, ее можно регулировать путем изменения частоты питающего напряжения  $f_1$  или числа полюсов  $2p$ . Регулировать частоту вращения путем изменения числа полюсов в синхронном двигателе нецелесообразно, так как в отличие от асинхронного здесь требуется изменять число полюсов как на статоре так и на роторе, что приводит к значительному усложнению конструкции ротора. Поэтому практически используют лишь изменение частоты питающего напряжения. К синхронному двигателю применимы все основные положения теории частотного регулирования асинхронного двигателя, однако в чистом виде этот способ применим лишь при малых мощностях двигателя, когда нагрузочные моменты невелики, а инерция приводного механизма мала.

Для синхронных двигателей, применяемых в электроприводах с большим моментом инерции приводного механизма, необходимо очень плавно менять частоту питающего напряжения, чтобы двигатель не выпал из синхронизма.

### 3. Содержание отчета

В отчете должны быть приведены конструктивные схемы электрических машин постоянного тока, указанных в п. 1.1, описание принципа действия и особенностей функционирования устройств, таблицы номинальных эксплуатационных параметров, проведен анализ особенностей конструкций и номинальных значений эксплуатационных параметров и основных характеристик электрических машин различного функционального назначения.

### Библиографический список

7. Микроэлектродвигатели для систем автоматики: Технический справочник/ Под ред. Э.А. Лодочникова, Ф.М. Юферова. - М.: Энергия, 1969. - 765 с.
8. Верхопятницкий П.Д. Электрические элементы автоматики. - М.: Судпромгиз, 1963. - 535 с.
9. Электротехнический справочник/ Под ред. П.Г. Дудинского, Г.Н. Петрова, - М: Энергия, 1974. - 368 с.
10. Иванов-Смоленский А.И. Электрические машины. - М.: Энергия, 1980. - 928 с.
11. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. - М.: Высшая школа, 1987. - Ч.1. - 319 с.; Ч.2 -335 с.
12. Справочник по электрическим машинам в двух томах / Под общ.ред. И.П. Копылова., Б.К. Клокова. -М.: Энергоатомиздат, Т.1., 1988. - 456 с.; Т.2, 1989. - 688 с.

### Лабораторная работа № 3

## ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИЙ И ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ЭЛЕКТРОМАГНИТАМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА.

### Программа работы

#### 1. Теоретические исследования

1.1. Ознакомиться с конструкциями электромагнитов. Определить тип электромагнита, отметить особенности конструкций их рабочих зазоров.

1.2. Составить принципиальные схемы электромагнитов. Провести сравнительный анализ эксплуатационных параметров электромагнитов.

1.3. Составить схемы замещения магнитных цепей электромагнитов. Записать уравнения движения электромагнитов с учетом основных особенностей их функционирования.

#### 2. Пояснения и указания к работе

##### 2.1. Назначение, устройство, принцип действия электромеханических преобразователей

Условно различают следующие группы электромеханических преобразователей (ЭМП): силовые и управляющие. В качестве примера использования ЭМП как управляющего элемента рассмотрим его работу в контуре пневматической силовой системы управления (рис.3.1).

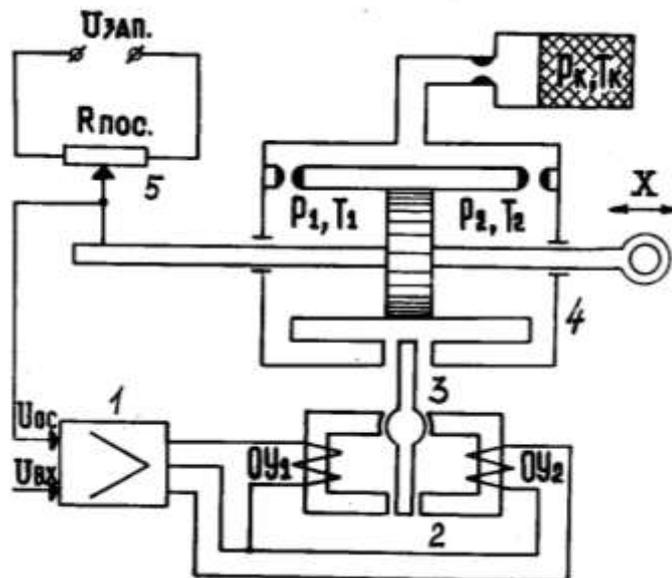


Рис. 3.1. Принципиальная схема пневматической силовой системы управления

Сигналы управления  $U_{вх}$  и обратной связи  $U_{ос}$  поступают на усилительное устройство 1, где ошибка рассогласования  $U_e$  преобразуется, усиливается и подается на электромагнит 2. Здесь электрический сигнал преобразуется в механическое перемещение якоря, на оси которого расположено распределительное устройство. При этом заслонка распределительного устройства 3 перекрывает выход из одной из полостей и поршень пневматического двигателя 4 переместится в направлении, соответствующем уменьшению ошибки рассогласования. Если ошибка рассогласования равна нулю, т.е.  $U_{ос} = U_{вх}$  то поршень двигателя и движок потенциометра обратной связи 5 остаются неподвижными. В этой схе-

ме электромагнит 2 и усилитель 1 образуют единую динамическую систему – электромеханический преобразователь. Объектами исследования настоящей лабораторной работы являются электромагниты.

Принцип действия электромагнитов основан на возникновении силы, действующей на подвижный ферромагнитный элемент (якорь) в результате изменения энергии, запасенной в системе, при его перемещении. Электромагниты, в которых направление силы не зависит от направления тока в управляющих обмотках, относятся к типу нейтральных (рис. 3.2,а); электромагниты, в которых направление силы определяется направлением тока в управляющей обмотке – к типу поляризованных (рис. 3.2,б). Поляризованные электромагниты выполняются, как правило, с якорем, расположенным под полюсами, нейтральные – с поворотным или поступательно движущимся якорем. Магнитопроводы электромагнитов обычно не шихтуются.

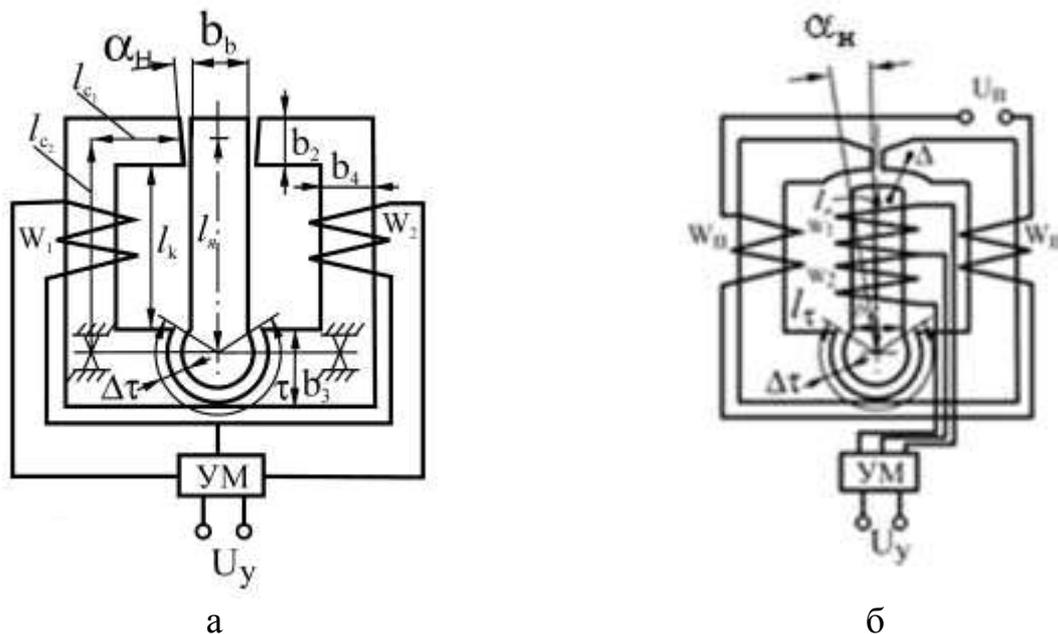


Рис. 3.2. Принципиальные схемы электромагнитов: а – нейтрального, б – поляризованного.

## 2.2. Характеристики и параметры ЭМП

Чтобы успешно решать вопросы анализа и синтеза мехатронных систем необходимо располагать характеристиками ЭМП.

Статические характеристики преобразователя определяют его работу в установившихся режимах и позволяют судить о законе изменения механической координаты или движущего момента в зависимости от величины и знака управляющего сигнала, об их номинальных и максимальных значениях, а также о размерах порога чувствительности и гистерезиса. К статическим характеристикам относят внешнюю характеристику  $\alpha = f(i)$  и моментную характеристику  $M_{\text{я}} = f(i, \alpha)$ .

Вид моментной характеристики (рис. 3.3,а) нейтрального преобразователя обусловлен нелинейной зависимостью проводимости рабочего зазора и насыщением материала магнитопровода.

Неоднозначность внешней характеристики (рис. 3.3,б) нейтрального ЭМП определяется соотношением значений момента движущего  $M_{эм}$  и момента пружины  $M_{np}$  при  $\alpha = \alpha_{max}$ . При отсутствии тока управления якорь электромагнита удерживается пружиной в нейтральном положении. По мере нарастания тока угол поворота якоря увеличивается до тех пор, пока  $M_{эм}$  не станет равным  $M_{np}$ . При некотором токе, называемом током срабатывания  $i_{сп}$ , якорь срыгается на упор, а  $M_{эм} > M_{np}$  при всех значениях  $\alpha$ . Движущий момент вследствие уменьшения зазора до минимального значения, определяемого толщиной пластины от залипания, значительно возрастает при  $\alpha = \alpha_{max}$ . Поэтому при последующем уменьшении тока якорь продолжает находиться на упоре до тех пор, пока ток не упадет до значения, называемого током отпускания  $i_{отп}$ , при этом токе  $M_{np} > M_{эм}$ . Якорь в этом случае сойдет с упора.

Характер переходных процессов в нейтральном ЭМП (рис. 3.3,в) показывает, что существенное влияние на них оказывают насыщение материала магнитопровода, вихревые токи, противо-э.д.с., наводимая в обмотках при движении якоря, параметры усилителя мощности.

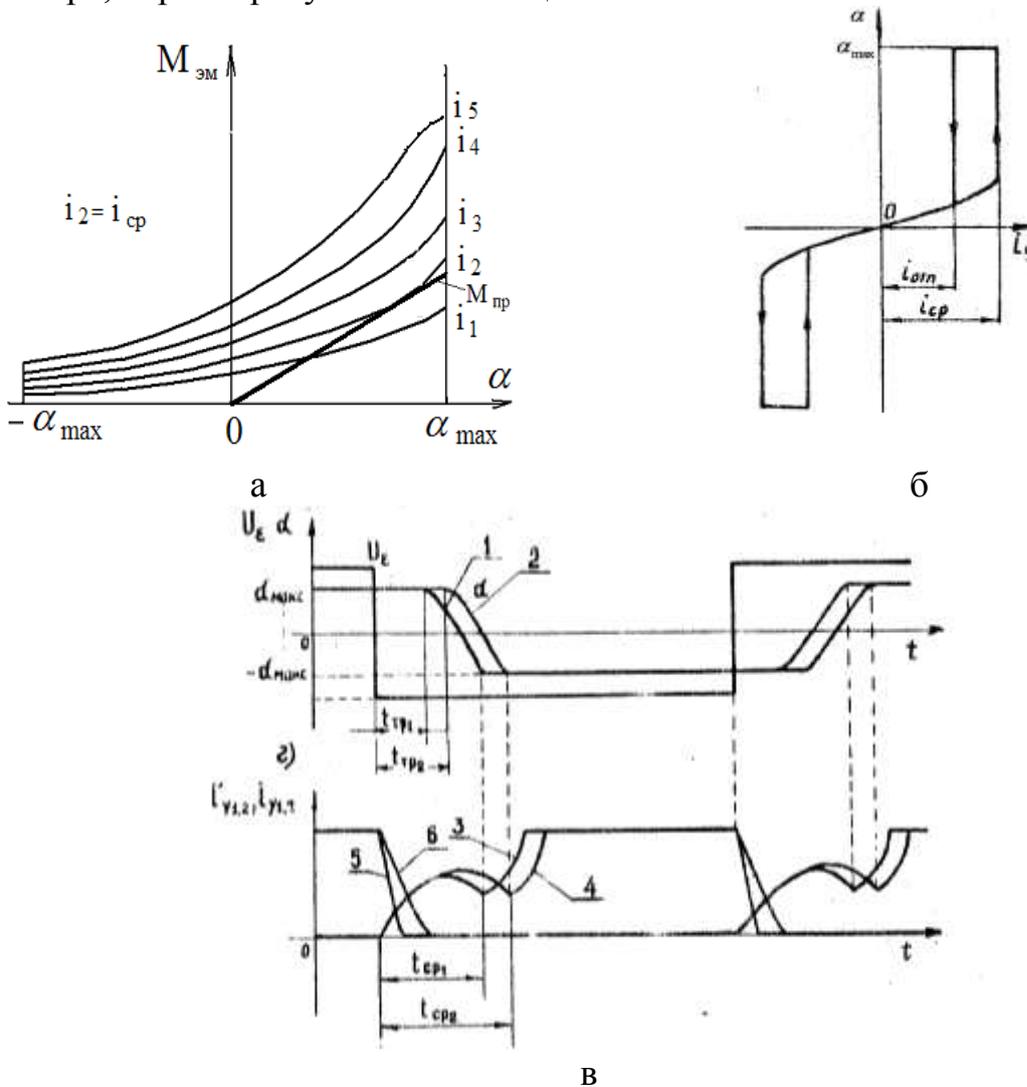


Рис. 3.3. Типовые характеристики ЭМП с нейтральными электромагнитами.

Неоднозначность и некоторая нелинейность характеристик  $\alpha = f(i)$  и  $M_o = f(i)$  поляризованных пропорциональных ЭМП (рис. 3.4,а,б) объясняется гистерезисом и нелинейностью кривой намагничивания материалов магнитопровода.

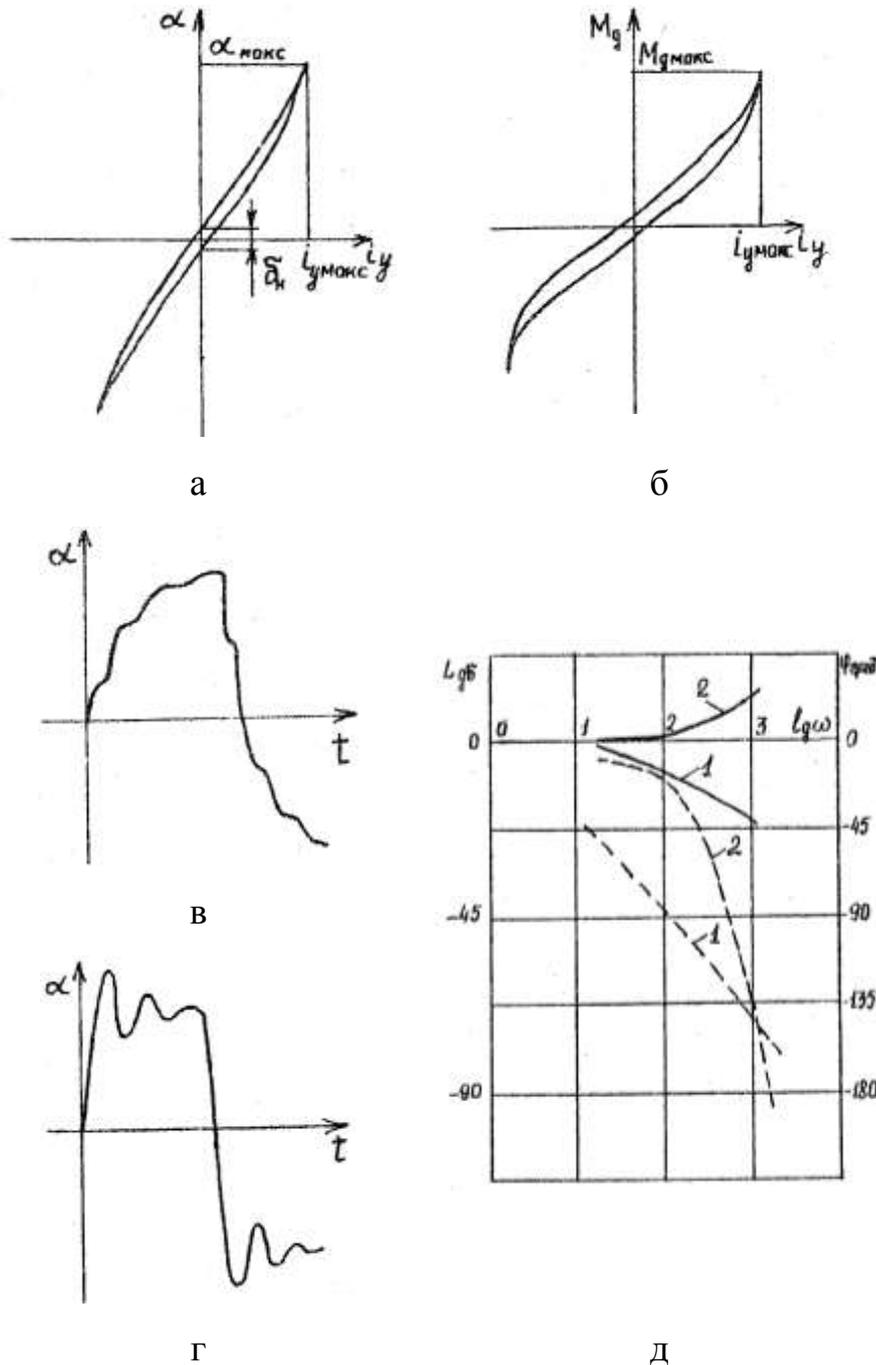


Рис. 3.4. Типовые характеристики ЭМП с поляризованными электромагнитами

Сравнение графиков переходных процессов (рис. 3.4,в,г) и частотных характеристик (рис. 3.4,д) поляризованных ЭМП с усилителями мощности, обладающими высокими (2) и низкими (1) выходными сопротивлениями, показывает, что увеличение выходного сопротивления усилителя мощности приводит к повышению быстродействия ЭМП, т.е. к уменьшению времени срабатывания  $t_{cp}$  и расширению полосы пропускания  $\omega_n$ .

### 3. Содержание отчета

В отчете должны быть приведены принципиальные схемы, схемы замещения магнитных цепей и характеристики различных типов ЭМП, записаны их уравнения движения.

#### Библиографический список.

1. Шорников Е.Е. и др. Электромеханические элементы следящих систем: Учебное пособие. - Тула: ТулПИ, 1982. - 94 с.
2. Елецкая Г.П. Основы электромеханики: Учебное пособие. - Тула: ТулПИ, 1984. - 87 с.
3. Елецкая Г.П., Илюхина Н.С., Панков А.П. Математические модели электромеханических систем: Учебное пособие / Тула: ТулГТУ, 1988. - 64 с.
4. Елецкая Г.П., Илюхина Н.С., Панков А.П. Электромеханические системы: Учебное пособие. - Тула: ТулГТУ, 1990. - 104 с.
5. Елецкая Г.П., Илюхина Н.С., Панков А.П. Электромеханические устройства мехатронных систем: Учебное пособие. - Тула: ТулГТУ, 2018. - 224 с.

**Лабораторная работа № 4****ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА МАЛОЙ МОЩНОСТИ**

## Программа работы

## 1. Экспериментальные исследования

1.1. Провести опыт холостого хода, определить мощность потерь  $P_0$ , ток холостого хода  $i_0$ , напряжение вторичной обмотки  $U_2$  при изменении  $U_1$  в диапазоне  $(0,5 \dots 1,1)U_n$ .

1.2. Провести испытания трансформатора в режиме нагрузки при  $U_1=(0,5 \dots 1,0)U_n$ .

## 2. Теоретические исследования

2.1. Составить схему замещения электрической цепи трансформатора с индуктивной связью. Записать дифференциальные уравнения его обмоток для случая  $\mu_r=const$ ,  $r_g=\infty$ . Получить комплексные уравнения, перейти от исходной схемы замещения к схеме замещения приведенного трансформатора с электрической связью цепей.

2.2. Вычислить коэффициенты трансформации.

2.3. По данным экспериментальных исследований рассчитать параметры схемы замещения  $z_m$ ,  $r_m$ ,  $x_m$  и построить характеристики холостого хода.

2.4. По характеристике холостого хода для  $U_{1н}$  определить потери в стали  $P_{ст}$ , коэффициент мощности холостого хода  $\cos \varphi_0$  и процентное значение реактивной составляющей  $i_{po}$  тока холостого хода от первичного тока  $i_1$ .

2.5. По данным опытов подсчитать изменение напряжения на вторичной обмотке при переходе от холостого хода к номинальной нагрузке.

2.6. Определить коэффициент полезного действия трансформатора при  $U_1=U_{1н}$ ,  $I_1=I_{1н}$ .

## Пояснения и указания к работе

## 1. Краткая характеристика объекта исследования

Трансформатор является статическим электромагнитным аппаратом, преобразующим переменный электрический ток одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты.

В простейшем случае трансформатор имеет одну первичную обмотку, к которой подводится электрическая энергия, и одну вторичную обмотку, от которой энергия отводится к потребителю (нагрузке). Передача энергии из одной обмотки в другую производится путем электромагнитной индукции. Для усиления электромагнитной связи между обмотками последние обычно располагаются на замкнутом ферромагнитном магнитопроводе.

При подключении первичной обмотки трансформатора к сети с синусоидальным напряжением  $U_1$  в обмотке возникает ток  $i_1$ , который создает синусоидально изменяющийся магнитный поток  $\Phi$ , замыкающийся по магнитопроводу. Поток  $\Phi$  индуцирует э.д.с. как в первичной, так и во вторичной обмотке.

При подключении к вторичной обмотке нагрузки, в этой обмотке возникает вторичный ток  $i_2$  и на ее зажимах устанавливается некоторое напряжение  $U_2$ . Результирующий магнитный поток магнитопровода  $\Phi_c$  создается током обеих обмоток. При частоте сигнала  $f \leq 150$  Гц для уменьшения потерь на перемагничивание магнитопровод изготавливается из листов электротехнической стали толщиной 0,35-0,50 мм.

В автоматических устройствах, в различных схемах с электронными и ионными приборами широко применяются силовые трансформаторы малой мощности. Такие трансформаторы изготавливаются мощностью от нескольких единиц до нескольких сотен вольт-ампер на промышленную частоту 60 и повышенную частоту 400-600 Гц.

Поскольку силовые трансформаторы малой мощности работают совместно с электронной аппаратурой, являются ее частью, то к этим трансформаторам предъявляются особые требования, отличные от предъявляемых к мощным силовым трансформаторам.

Трансформатор должен иметь минимальную стойкость, так как срок его службы ограничен, поскольку он связан со сроком службы электронной аппаратуры, которая сравнительно быстро устаревает и изнашивается.

В схеме питания радиоэлектронной аппаратуры важно также иметь трансформатор минимальных габаритов с максимально возможным коэффициентом полезного действия.

Указанные требования достигаются путем максимального использования активных материалов и упрощения конструкций. Однако следует отметить, что стремление получить трансформатор с малыми стоимостью и массой путем повышения электромагнитных нагрузок приводит к некоторому снижению  $\cos\varphi$  и коэффициента полезного действия.

Испытуемый однофазный силовой трансформатор ТС-330К-1 мощностью  $P = 330$  Вт и первичным напряжением  $U_1 = 220$  В рассчитан на длительную активную нагрузку при частоте 50 Гц и температуре окружающей среды  $\leq 50^\circ\text{C}$ . Основные данные трансформатора приведены в табл. 4.1.

Трансформатор имеет две основные части: ленточный сердечник (ЛС) и обмотки (рис. 4.1).

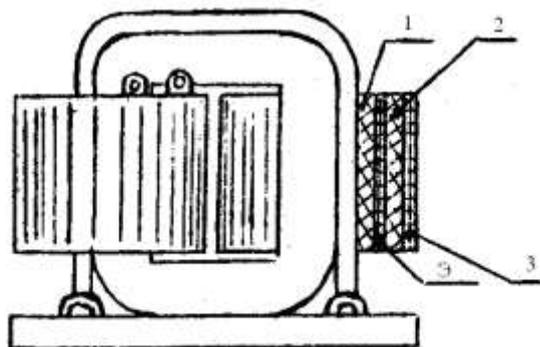
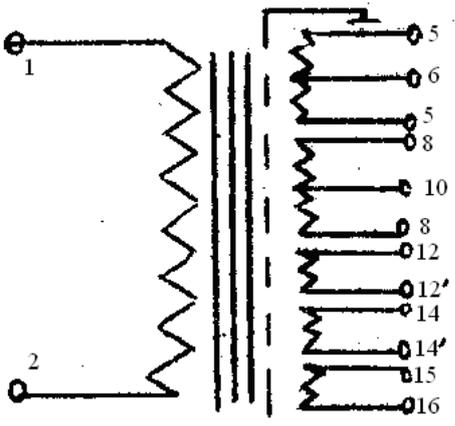


Рис. 4.1. Общий вид исследуемого стержневого трансформатора с ленточным сердечником (ЛС) и концентрическими обмотками: 1 - первичная обмотка; 2 - вторичные обмотки; 3 - изоляционный буртик, Э - экран.

Таблица 4.1

Обмотки	Выводы	Номинальные переменные напряжения, В	Номинальные токи, А	Число витков	Сопротивление обмоток, Ом
	1 – 2	220	1,65	578	2,5
	5 – 6 – 5	120	0,75	316	2,4
	8 – 10 – 8	32	0,9	84	0,6
	12 – 12'	17,6	0,2	46	1
	14 – 14'	6,5	1,2	17	0,1
	15 – 16	6,5	8	17	0,6

ЛС изготавливают из узкой ленты электротехнических сталей или сплавов различной толщины. Наиболее распространены ЛС из холоднокатанной анизотропной стали марок 20895. Применение ЛС по сравнению с ШС (шихтованные сердечники из листовой стали) позволяют существенно снизить массу и габариты трансформатора. Обмотку с меньшим диаметром провода как более дорогую для снижения стоимости трансформатора располагают ближе к стержню. Обмотку с большим диаметром провода делают наружной, при этом конструкция обмоток приобретает большую механическую прочность.

Для защиты от помех, проникающих через электросеть, между первичной и вторичной обмотками помещен электростатический экран Э. Экран выполняется из изолированного провода в виде однослойной обмотки, один из концов которой заземляется.

## 2. Уравнения трансформатора. Схемы замещения

Рабочие процессы трансформатора исследуются с помощью уравнений напряжений обмоток. К общепринятым допущениям, используемым при записи дифференциальных уравнений трансформатора на основе законов Кирхгофа, относятся допущения, приведенные в [1,2].

1. Емкостные токи между витками обмоток и между обмотками магнитопроводов пренебрежимо малы ( $f \geq 1-5$  кГц).

2. Магнитная проницаемость, индуктивности и взаимоиндуктивности обмоток считаются постоянными величинами.

3. Потери на вихревые токи в материале магнитопровода пренебрежимо

малы.

Схему замещения электрической цепи с индуктивной связью и дифференциальные уравнения обмоток однофазного трансформатора составить самостоятельно. При этом использовать обозначения:

$U_1, U_2, i_1, i_2$  - мгновенные значения напряжений и токов первичной и вторичной обмоток;  $r_1, r_2, L_{11}, L_{22}$  - активные сопротивления и собственные индуктивности, обмоток;  $L_{12}=L_{21}=M$  - взаимная индуктивность обмоток;  $W_1, W_2$  - число витков обмоток.

Обычно силовые трансформаторы, а также ряд видов специальных трансформаторов работают с синусоидально-изменяющимися токами и напряжениями. В этом случае для анализа установившихся режимов работы трансформатора вместо дифференциальных уравнений удобно пользоваться комплексными уравнениями для действующих значений токов и напряжений. Для получения этих уравнений в дифференциальные уравнения трансформатора следует подставить выражения:

$$\begin{aligned} u_1 &= \sqrt{2}U_1^{\&}e^{j\omega t}; & u_2 &= \sqrt{2}U_2^{\&}e^{j\omega t} \\ i_1 &= \sqrt{2}I_1^{\&}e^{j\omega t} & i_2 &= \sqrt{2}I_2^{\&}e^{j\omega t} \end{aligned}$$

После преобразований получают уравнение трансформатора в **комплексной форме**:

$$\left. \begin{aligned} U_1^{\&} &= r_1 I_1^{\&} + jX_{11} I_1^{\&} + jX_{12} I_2^{\&} \\ -U_2^{\&} &= r_2 I_2^{\&} + jX_{22} I_2^{\&} + jX_{12} I_1^{\&} \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

где

$$X_{11} = \omega L_{11}, \quad X_{22} = \omega L_{22}, \quad X_{12} = \omega M$$

представляют собой полные собственные и взаимные индуктивные сопротивления обмоток.

Дифференциальные уравнения трансформатора и уравнения (4.1) полностью определяют процессы, происходящие в трансформаторе при указанных выше допущениях, и позволяют решать задачи, связанные с работой трансформатора в переходных и установившихся режимах работы.

Однако, на практике расчеты статических характеристик трансформатора по формулам, получаемым непосредственно из (4.1), не могут быть выполнены с необходимой точностью, вследствие наличия членов, представляющих собой разность величин, близких по значению. Кроме того, расчеты неудобны в связи с тем, что при неравенстве числа витков  $W_1 \neq W_2$  параметры  $r, L, M, X$ , напряжения  $U, U^{\&}$  и токи  $i, I^{\&}$  первичной и вторичной обмоток могут сильно различаться по значению. Поэтому вместо реального трансформатора рассматривается эквивалентный ему, так называемый приведенный трансформатор, первичная и приведенная вторичная обмотки которого имеют одинаковое число витков  $W_2' = W_1$ , при этом число витков вторичной обмотки изменится в  $k$  раз:

$$k = \frac{W_2'}{W_2} = \frac{W_1}{W_2} \quad (4.2)$$

Величина  $k$  называется коэффициентом приведения или трансформации.

В результате такой замены или приведения получают:

$$U_2' = kU_2 \quad (4.3)$$

Чтобы мощности приведенной и реальной обмоток при всех режимах работы были равны, соблюдают равенство

$$I_2' U_2' = I_2 U_2 \quad (4.4)$$

Тогда

$$I_2' = \frac{I_2}{k}, \quad r_2' = k^2 r_2 \quad (4.5)$$

Магнитодвижущие силы приведенной и реальной обмоток на основании (4.2) и (4.5) равны:

$$I_2' W_2' = I_2 W_2 \quad (4.6)$$

В соответствии с зависимостями (4.3), (4.5) в уравнениях (4.1) делают подстановку, а после преобразования получают систему уравнений, которой соответствует схема замещения, приведенная на рис. 4.2а, где:

$$X_1 = X_{11} - kX_{12}; \quad X_2' = k^2 \left( X_{22} - \frac{X_{12}}{k} \right); \quad X_{12}' = kX_{12} \quad (4.7)$$

**Дифференциальные уравнения** приведенного трансформатора записывают, используя подстановку

$$U_2 = \frac{U_2'}{k}, \quad i_2 = ki_2' \quad (4.8)$$

Полученным уравнениям соответствует схема замещения, представленная на рис. 4.2б, где

$$S_1 = L_{11} - kM; \quad S_2' = k^2 \left( L_{22} - \frac{M}{k} \right); \quad M_{12}' = kM \quad (4.9)$$

Комплексные и дифференциальные уравнения приведенного трансформатора подучить самостоятельно, проверить их соответствие схемам замещения рис. 4.2а,б.

Схема замещения трансформатора может быть построена с учетом магнитных потерь в стали. В этом случае в схеме замещения параллельно  $X_{12}'$  включается активное сопротивление, потери в котором пропорциональны магнитным потерям. Тогда намагничивающий ток  $I_M' = I_1' + I_2'$  разделяется на активную  $I_{mo}'$  (через  $r_{mo}$ ) и реактивную  $I_{mp}'$  (через  $X_{12}'$ ) составляющие.  $I_{mo}'$  определяет мощность магнитных потерь  $P_m$ ,  $I_{mp}'$  создает магнитный поток. Общее сопротивление двух параллельных ветвей определяется зависимостью:

$$z_m = \frac{r_{ma} jX_{12}'}{r_{ma} + jX_{12}'} = r_m + jX_m', \quad r_m = \frac{X_{12}'^2}{r_{ma}}, \quad X_m = X_{12}' \quad (4.10)$$

так как

$$r_{ma} \gg X_{12}'$$

Тогда схема замещения (рис. 4.2а) примет вид (рис.4.2в) или (4.2г), где:

$$z_1 = r_1 + jX_1, \quad z_2 = r_2 + jX_2', \quad z_m = r_m + jX_m'$$

Для упрощения расчетов часто полагают  $z_m = \infty$  так как  $z_m \gg z_1 \approx z_2$ . Тогда

трансформатор представляется эквивалентным сопротивлением

$$z_k = z_1 + z_2' \quad (4.11)$$

Определение параметров схемы замещения трансформатора может быть проведено опытным путем.

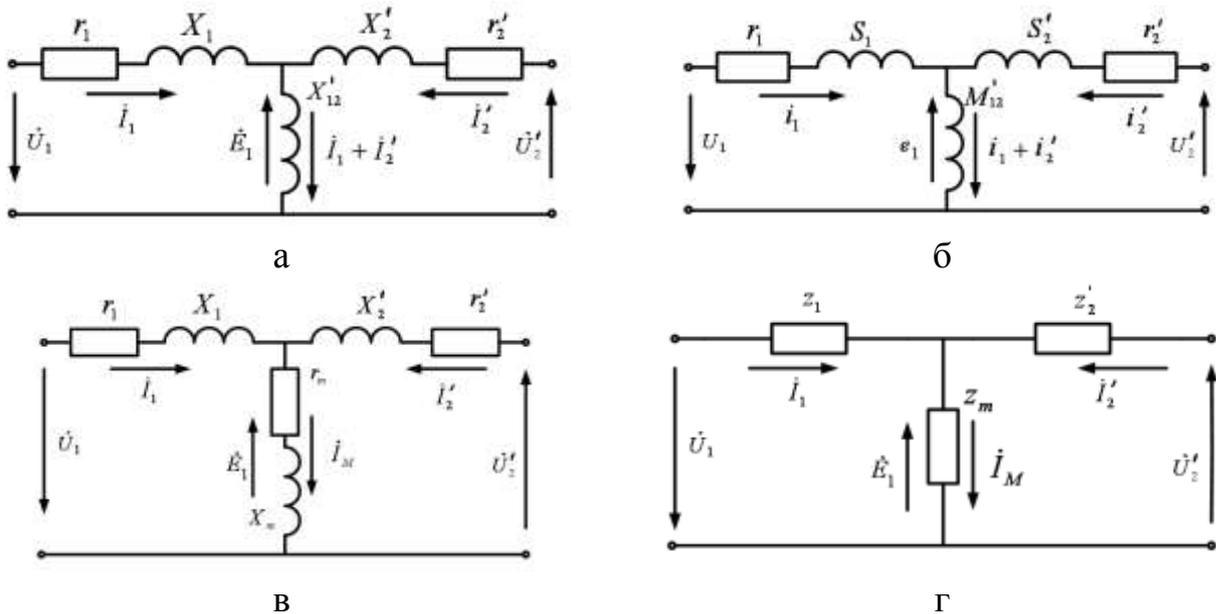


Рис. 4.2. Схемы замещения двухобмоточного трансформатора без учета (а, б) и с учетом (в, г) магнитных потерь.

### 3. Опыт холостого хода

Режимом холостого хода трансформатора называют режим, при котором, его вторичные обмотки разомкнуты и вторичные токи равны нулю.

В этом случае трансформатор может быть представлен схемой замещения лишь с двумя последовательно соединенными сопротивлениями  $z_1$  и  $z_m$  (рис 4.2г). Тогда полное сопротивление трансформатора, его активная и индуктивная составляющие в режиме холостого хода определяются зависимостями:

$$z_0 = z_1 + z_m, \quad r_0 = r_1 + r_m, \quad X_0 = X_1 + X_m \quad (4.12)$$

В силовых трансформаторах  $r_1 \gg r_m$ ;  $x_1 \gg x_m$ , поэтому с высокой точностью можно считать, что параметры холостого хода полностью определяют параметры намагничивающей цепи схемы замещения:

$$z_m = z_0, \quad r_m = r_0, \quad X_m = X_0 \quad (4.13)$$

По этой же причине можно сказать, что мощность холостого хода  $P_c$  определяет магнитные потери  $P_m$

$$P_m = P_0 \quad (4.14)$$

Схема проведения опыта холостого хода приведена на рис. 4.3.

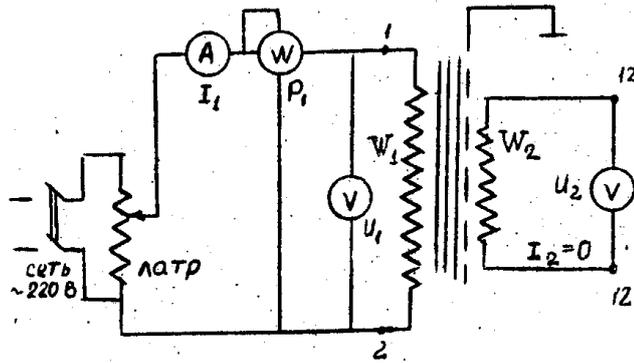


Рис. 4.3. Схема проведения опыта холостого хода.

Из данных опыта для номинального напряжения  $U_{1н}=220$  В, однофазного трансформатора определяются полное, активное и индуктивное сопротивления холостого хода:

$$z_0 = \frac{U_{10}}{I_{10}}, r_0 = \frac{P_0}{I_{10}^2}, x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2} \quad (4.15)$$

коэффициент трансформации

$$k = \frac{W_1}{W_2} \approx \frac{U_{10}}{U_{20}} \quad (4.16)$$

коэффициент мощности холостого хода

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_0 I_0}, I_0 = \sqrt{I_{a0}^2 + I_{p0}^2} \quad (4.17)$$

При исследовании трансформатора не ограничиваются определением тока холостого хода и потерь холостого хода для номинального напряжения, а проводят "опыт холостого хода".

При опыте холостого хода напряжение первичной обмотки изменяют от  $1,0U_{1н}$  до  $0,5U_{1н}$  и снимают с шагом 10 В. По данным опыта получают зависимости  $I_0$ ,  $P_0$ ,  $\cos \varphi_0 = f(U_1)$

Данные опыта рекомендуется записать в табл. 4.2.

Таблица 4.2.

Данные опыта					Расчетные данные		
$U_{10}$ , В	$I_{10}$ , А	$P_0$ , Вт	$U_{20}$ , В	$I_2$ , А (для опыта нагрузки)	$\cos \varphi_0$	$z_0$ , Ом	$R_0$ , Ом
110							
.....							
220							

На основании опыта холостого хода для  $U_{1н}$  определяются  $I_{a0}$ ,  $I_{p0}$ ,  $P_0$  и  $\cos \varphi_0$ .

На рис. 4.4 показан примерный вид характеристик холостого хода. На кривых рис. 4.4 видно, что сопротивления  $z_0 = \frac{U_{10}}{I_0}$  и  $r_0 = \frac{P_0}{I_0^2}$  сильно зависят от насыщения стали сердечника.

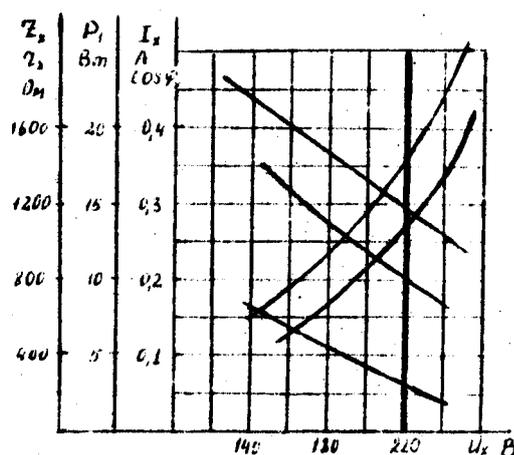


Рис. 4.4. Характеристики и параметры холостого хода.

#### 4. Испытания трансформатора в режиме нагрузки.

Силовой трансформатор малой мощности в большинстве случаев работает при номинальной нагрузке, обычно эта нагрузка активная. Схема проведения опыта представлена на рис. 4.5.

Испытание трансформатора в режиме нагрузки проводится с целью определения; изменения напряжения на вторичных обмотках при переходе от холостого хода к номинальной нагрузке; коэффициента полезного действия и коэффициента мощности первичной цепи. Опыт проводится при значении  $U_1 = U_{1н} = 220\text{В}$ .

Коэффициент полезного действия трансформатора при номинальной активной нагрузке определяется как отношение полезной мощности  $P$  и потребляемой из сети  $P_1$ .

$$\eta = \frac{P}{P_1} 100\% = \frac{P_1 - P_{эл} - P_m}{P_1} 100\% \quad P_{эл} = \sum_{j=1}^N I_j^2 r_j + P_{дон} \quad (4.18)$$

где  $P_m$  определяется зависимостью (4.14).

Коэффициент мощности первичной цепи и изменения напряжения на зажимах обмоток при переходе от холостого хода к нагрузке определяются по следующим формулам:

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{U_1 I_1}, \quad \Delta U_{2i} = \frac{U_{2i0} - U_{2i}}{U_{2i}} \quad (4.19)$$

где  $U_{2i}$  - напряжение на вторичных обмотках при одновременной номинальной нагрузке всех обмоток.

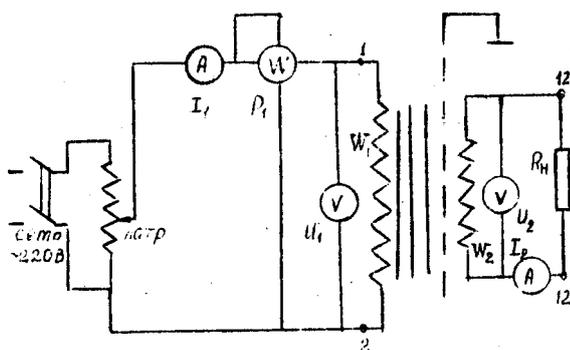


Рис. 4.5. Схема испытаний трансформатора в режиме нагрузки.

### 5. Содержание отчета

В отчете приводятся: принципиальная электрическая схема трансформатора и его паспортные данные, схема замещения электрической цепи трансформатора с индуктивной, связью и его дифференциальные уравнения: вывод комплексных уравнений приведенного трансформатора и его схемы замещения без учета и с учетом потерь на перемещение, схема испытаний холостого хода трансформатора, результаты опыта и их анализ, рассчитанные значения коэффициентов трансформации и параметров схемы замещения  $z_m, r_m, X_m$ , схемы испытаний и результаты опыта режима нагрузки, рассчитанные значения параметров упрощенной схемы замещения трансформатора  $z_k, r_k, X_k$ , к.п.д.,  $\cos\varphi$  и  $\Delta U_{2i}$ , осциллограммы изменения первичного и вторичного напряжений в режимах, предусмотренных программой работы. Выводы.

### Библиографический список

1. Вольдек А.И. Электрические машины. -М.: Энергия, 1978. - 782 с.
2. Бальян Р.Х. Трансформаторы малой мощности. - Л.: Судпромгиз, 1961. - 720 с.
3. Иванов-Смоленский А.И. Электрические машины. - М.: Энергия, 1980. - 928 с.
4. Брускин Д.Э.» Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. - М.: Высшая школа, 1987. 4.1. - 319 с., Ч.П. -335 с.
5. Кацман М.М. Электрические Мишины. - М.: Высшая школа, 1990. - 413 с.53

**Лабораторная работа № 5**  
**ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО**  
**ТАХОМЕТРИЧЕСКОГО АГРЕГАТА.**

Программа работы

1. Экспериментальные исследования

1.1. Ознакомиться с паспортными данными и конструкцией агрегата, используя материалы стенда-витрины.

1.2. Снять регулировочную характеристику асинхронного двигателя при амплитудно-фазовом способе управления. Исследовать самоход (самоход отсутствует, если при  $U_y=0, n=0$ )

$$n = f(U_y), M_n = 0 \quad (5.1)$$

1.3. Снять внешнюю характеристику тахогенератора

$$U_{mz} = f(n); M_n = 0 \quad (5.2)$$

1.4. Снять на кальку с экрана - осциллографа переходную характеристику асинхронного двигателя

$$n = f(t) \text{ при } U_y=8 \cdot 1(t) \quad (5.3)$$

здесь  $n$  - частота вращения вала двигателя;  $U_y$  - напряжение управления двигателя,  $U_{тг}$  - выходное напряжение тахогенератора;  $z_m$  - сопротивление нагрузки,  $M_n$  - момент нагрузки на валу двигателя.

2. Расчеты и построения

2.1. На основании результатов экспериментального исследования построить статические характеристики двигателя и тахогенератора (5.1) и (3.2) и определить зону пропорционального регулирования двигателя, допуская погрешность в изменении скорости  $\Delta = \pm 5\%$ .

2.2. Провести графическую линеаризацию характеристик (5.1), (5.2) и представить их в виде (5.4)

$$n = k_\omega U_\omega; U_{mz} = k_{mz} n, k_{mz} = \omega \quad (5.4)$$

Определить коэффициент передачи двигателя и тахогенератора  $k_\omega, k_{mz}$ . Величина  $k_{mz}$  определяет крутизну  $\omega$

2.3. Для переходной характеристики (5.3) рассчитать масштабы, построить кривую  $n = f(t)$ . Определить графически значение электромеханической постоянной времени двигателя  $T_{эм}$ .

Пояснения и указания к работе

1. Краткая характеристика объекта исследования.

В маломощных следящих системах электроавтоматики и САУ широко применяются двигатели - тахогенераторы типа ДГ - двухмашинные агрегаты, состоящие из асинхронного двухфазного управляемого исполнительного электродвигателя и асинхронного тахогенератора с полыми немагнитными роторами. Тахогенератор при этом выполняет функции датчика скорости. Роторы

электродвигателя и тахогенератора, выполненные в виде полых немагнитных стаканов, расположены на одном валу. Статоры двухмашинного агрегата набираются из изолированных листов электротехнической стали. В пазах внешнего статора располагаются обмотки управления и возбуждения асинхронного электродвигателя, сдвинутые в пространстве относительно друг друга на 90 эл.град., и две обмотки асинхронного тахогенератора - возбуждения и выходная, также сдвинутые в пространстве на 90 эл.град. Внутренний статор служит для уменьшения магнитного сопротивления системы. Принципиальная схема тахометрического агрегата приведена на рис. 5.1.

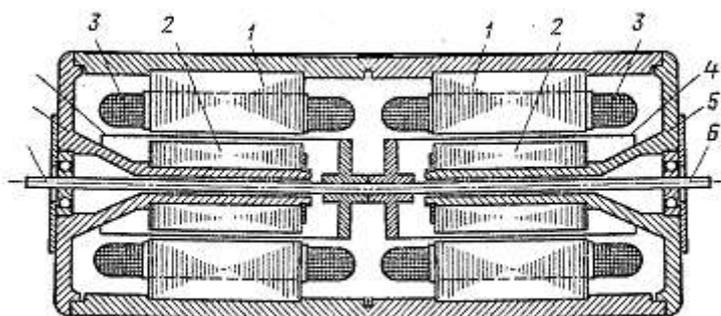


Рис. 5.1. Принципиальная схема асинхронного тахометрического агрегата: 1,2 - внешние и внутренние статоры, 3 - обмотки статоров, 4 – полые роторы.

Принцип действия асинхронного двигателя состоит в следующем. Пульсирующие потоки, создаваемые токами в обмотках возбуждения и управления, сдвинуты в пространство на угол  $90^\circ$ , создают в общем случае эллиптическое вращающееся поле, которое наводит вихревые токи в роторе. Взаимодействие поля статора с токами ротора обуславливает возникновение вращающего момента, равного разности моментов от прямого и обратного полей, на которые можно разложить эллиптическое вращающееся поле статора.

Для создания вращающегося поля, кроме пространственного сдвига статорных обмоток, необходим временной сдвиг напряжений и токов в обмотках возбуждения и управления, т.е. необходимо, чтобы фазовый сдвиг  $\psi \neq 0$  и напряжение обмотки управления  $U_y \neq 0$ . При  $\psi = 0$  или при  $U_y = 0$  вращающий момент исчезнет, а при  $\psi = \pi/2$ ,  $U_y = U_g$  и  $U_y = -jU_g$  вращающий момент будет максимален.

Таким образом, при изменении  $U_y$  изменяется степень эллиптичности поля, что влечет за собой изменение скорости вращения вала двигателя.

Отсюда следуют три способа управления асинхронными двигателями: амплитудный, фазовый и амплитудно-фазовый.

При амплитудном способе управления  $U_y = var$ ,  $\psi = const$ . Необходимое смещение  $\psi = \pi/2$  создается фазосмещающим устройством.

При фазовом способе управления  $U_y = const$ ,  $\psi = var$ . Изменение фазы напряжения осуществляется с помощью фазовращающего устройства.

При амплитудно-фазовом управлении  $U_y = var$ ,  $\psi = var$ .

Основные свойства двигателя с полым ротором могут быть получены из рассмотрения такого идеального двигателя, у которого сопротивление ротора  $r_{py}$  во много раз превышает сопротивление всех других обмоток, критическое скольжение  $S_{кр} \rightarrow \infty$  потери в статоре отсутствуют [ 1 ].

Широкое распространение асинхронных двигателей с полым ротором обусловлено целым рядом преимуществ, которые выгодно отличают их от исполнительных двигателей других типов:

1. Малый момент инерции, что достигается выполнением ротора в виде тонкостенного стакана из немагнитного материала с малой плотностью (алюминий или дюралюминий). Толщина стенки ротора колеблется в пределах 0,2-0,8 мм.

2. Большой пусковой момент вследствие повышенного сопротивления ротора, что в совокупности с малым моментом инерции, обеспечивает малую электромеханическую постоянную времени двигателя, его быстродействие и повышение устойчивости следящих систем.

3. Механическая характеристика двигателя приближается к прямолинейной, что достигается за счет большого критического скольжения (скольжения при максимальном моменте):  $S_{кр} > 1$  (обычно  $S_{кр} = 4...7$ ).

4. Широкий диапазон плавного регулирования скорости, обусловленный возможностью изменений в больших пределах поля обратной последовательности. Кратность регулирования скорости достигает  $n_{max}/n_{min} = 100...200$ ; наличие зоны пропорционального регулирования скорости вращения при изменении управляющего напряжения  $n = k_d U_d$ . Быстрое изменение направления вращения двигателя. Плавный и бесшумный ход из-за отсутствия зубцовых высших гармонических в кривой поля.

5. Способность двигателя к самоторможению, т.е. к остановке ротора при снятии напряжения сигнала с обмотки управления, что достигается за счет большого критического скольжения (отсутствие самохода).

6. Стабильность рабочих свойств двигателя при колебаниях температуры.

7. Отсутствие трущихся контактов, что обеспечивает малый момент трения и малые напряжения трогания, стабильность параметров, отсутствие искровой коммутации и связанных с ней радиопомех, повышение надежности и эксплуатации.

8. Возможность применения в цепи управления простых и надежных усилителей переменного тока.

9. При повышении частоты до  $f = 400...500$  Гц снижается масса двигателей и усилителей и повышается точность отработки.

К недостаткам двигателя с полым ротором следует отнести:

1. Большой немагнитный зазор ( $\delta = 0,6-1,3$  мм), обуславливающий большой намагничивающий ток и сравнительно низкий коэффициент мощности.

2. Относительно низкий коэффициент полезного действия, т.к. двигатели потребляют сравнительно большой ток и работают при больших скольжениях – большом сопротивлении ротора (номинальное скольжение около 50%), что приводит к большим потерям в статоре и роторе.

3. Относительно большая масса и размеры двигателя. Асинхронный тахо-

генератор с полым ротором конструктивно не отличается от двигателя подобного типа и представляет собой электрическую машину, работающую в генераторном режиме. В тахогенераторе происходит дифференцирование механической величины, основанное на том, что э.д.с., индуцируемая при постоянном потоке  $\Phi$ , пропорциональна частоте вращения вала машины  $n$ :

$$E = c_1 \dot{\Theta} n = c_2 \frac{d\Theta}{dt}$$

где  $c_1, c_2$  - коэффициенты пропорциональности,  $\Theta$  - угол поворота вала машины.

Главным техническим показателем качества работы асинхронного тахогенератора, как и любого типа тахогенератора переменного и постоянного тока, является линейность выходной характеристики, представляющей зависимость выходного напряжения от частоты вращения  $U_{mz}=f(n)$  или  $U_{mz}=f(v)$ , где  $v=n/n_c$  - относительная частота вращения;  $\bar{U}_{\delta\bar{a}} = \frac{U_{\delta\bar{a}}}{U_{\delta\bar{a}}}$  - относительное напряжение.

Только в "идеальном" тахогенераторе зависимость выходной э.д.с. или выходного напряжения от частоты вращения можно считать строго линейной. У реального же тахогенератора имеют место погрешности выходных величин, вызываемые рядом факторов.

Причинами, вызывающими погрешности, т.е. отклонение выгодной характеристики от линейной являются:

1. Электромагнитная реакция якоря (или ротора);
2. Изменение параметров (сопротивления обмоток) под влиянием температуры, насыщения и др. причин;
3. Изменение некоторых параметров в функции скорости вращения (например, сопротивления полого ротора);
4. Падение напряжения при включении выходной обмотки на нагрузку;
5. Неизбежные технологические неточности при изготовлении тахогенераторов.

Для повышения точности и стабильности характеристики  $U_{mz}=f(n)$  ротор выполняется обычно из материала с большим удельным сопротивлением, а также с малым температурным коэффициентом сопротивления  $\alpha \leq 10^{-4} \dots 10^{-5} \text{ Ом}/^\circ\text{C}$  (например, из фосфористой, марганцовистой бронзы или из сплавов типа манганин, нейзильбер).

В асинхронных тахогенераторах, как и в машинах переменного тока, погрешность выходной характеристики  $\Delta U_v$ , т.е. отклонение от линейности, определяется по амплитуде и фазе и является комплексной величиной.

В современных асинхронных тахогенераторах с полым ротором полная погрешность при максимальной рабочей, частоте вращения составляет

$$|\Delta U_v| = 0,1 \dots 2,5\%$$

Меньшие значения погрешности  $|\Delta U_v|$  относятся к точным тахогенераторам, применяемым в интегрирующих и дифференцирующих звеньях счетно-решающих устройств, большие - к тахогенераторам для обратных связей.

Строго говоря, оценить степень линейности тахогенератора по выходным

характеристикам, нельзя, т.е. обычные способы измерения напряжения  $U_{mg}$  и частоты вращения  $n$  с помощью нормальных приборов (даже класса 0,2) для указанных целей не пригодны. Поэтому эта задача в лабораторных работах не рассматривается.

Важным техническим показателем качества работы тахогенератора является крутизна (или удельная э.д.с.)  $\omega$ , т.е. э.д.с. (или напряжение) тахогенератора, отнесенная к одному обороту в минуту.

Крутизна выходной характеристики асинхронного тахогенератора зависит от изменения параметров схемы замещения машины под влиянием температуры, насыщения и других причин.

У современных асинхронных тахогенераторов отечественного производства крутизна, лежит в пределах от 1 до 10 мВ/об/мин (большие значения относятся к тахогенераторам для обратных связей).

Кроме двух вышеуказанных технических показателей (линейность и крутизна), качество работы тахогенератора в автоматических устройствах зависит от наличия так называемой остаточной э.д.с. (нулевого сигнала).

Остаточная э.д.с. (напряжение)  $E_0$  в генераторной обмотке асинхронного тахогенератора, называемая иначе нулевым сигналом, соответствует неподвижному положению ротора ( $n = 0$ ).

У современных типов тахогенераторов остаточная э.д.с. составляет 25...100 мВ.

Применение в мехатронных системах агрегатов двигатель–тахогенератор позволяет снизить их массу и габариты, существенно повысить точность за счет исключения люфта между валами двигателя и тахогенератора.

## 2. Лабораторный стенд и средства исследования

Лабораторный стенд включает тахометрический агрегат переменного тока ДГ-1ТА и синусно-косинусный вращающийся трансформатор ВТ-1, служащий регулятором амплитуды, управляющего напряжения  $U_y$ . Схема стенда реализует один из способов управления - амплитудно-фазовое управление с конденсатором в цепи возбуждения (конденсаторное) рис. 5.2).

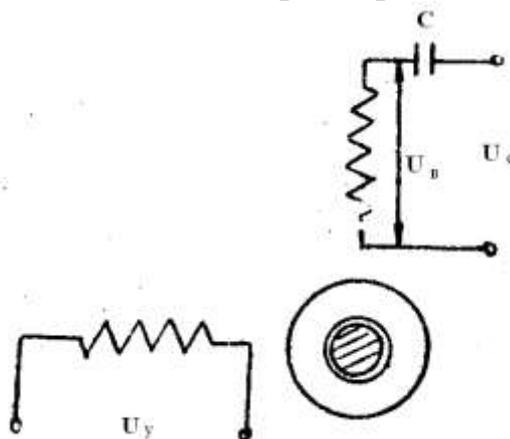


Рис. 5.2. Схема включения обмоток асинхронного двигателя при амплитудно-фазовом управлении.

Напряжение управления  $U_y$  совпадает по фазе с напряжением питающей сети  $U_c=36$  В (400 Гц). Сдвиг по фазе тока, а, следовательно, и напряжения на обмотке возбуждения осуществляется конденсатором, включенным последовательно с обмоткой возбуждения, питаемой от той же сети. Управление двигателем производится за счет изменения значения напряжения управления, при этом конденсатор при пуске, когда скольжение равно 1, обеспечивает временный сдвиг  $90^\circ$ , при изменении скольжения временный сдвиг изменяется. Значения  $U_y$  регистрируются с помощью вольтметров ВЗ-38. Диапазон изменения  $U_y=0...12$  В; измерение скорости производится строботаксометром. Замеры необходимо начинать с максимального значения, т.е. при положении переключателя "шкала 3". Действительное значение  $n$  считывается с соответствующей шкалы прибора, когда при снижении частоты световых импульсов получается неподвижное изображение риски на валу двигателя.

Измерение напряжения  $U_{m2}$  производится с помощью вольтметра ВЗ-38 при снятии статических характеристик и осциллографа С1-196 при снятии переходных характеристик.

### 3. Статические характеристики тахометрического агрегата.

При получении статических характеристик двигателя и тахогенератора одновременно замеряются скорость  $n$  и напряжение тахогенератора  $U_{m2}$  при изменении управляющего напряжения  $U_y$ . Результаты опыта сводятся в табл. 5.1.

Таблица 5.1

$U_y$ (В)							
$n$ , об/мин							
$U_{m2}$ , В							

При получении регулировочных характеристик следует проверить, имеет ли двигатель самоход. Если при снятии сигнала двигатель продолжает вращаться, то активное сопротивление ротора недостаточно велико. При наличии в машине короткозамкнутых витков в обмотках статора, асимметрии магнитной цепи или замыкании отдельных листов в пакете статора возможен технологический самоход, т.е. вращение двигателя при включении в сеть только одной обмотки статора.

По данным опыта в относительных единицах строятся графики:

регулировочная характеристика двигателя  $v=f(\alpha)$  и внешняя характеристика тахогенератора  $U_{m2}=f(v)$ .

Относительные единицы определяются зависимостями:

$$v = \frac{n}{n_c}, \quad n_c = \frac{2\pi f}{P}, \quad \alpha = \frac{U_y}{U_c}, \quad \bar{U}_{m2} = \frac{U_{m2}}{U_{m2н}} \quad (5.5)$$

где:  $v$ ,  $\bar{U}_{m2}$  - относительная скорость и напряжение,  $\alpha$  - коэффициента сигнала;  $n$ ,  $U_y$ ,  $U_{m2}$  - текущее значение скорости, напряжения управления и на-

пряжения тахогенератора;  $U_c$  - синхронная скорость;  $U$  - напряжение сети;  $U_{m2}$  - номинальное напряжение тахогенератора,  $p$  - число пар полюсов двигателя,  $f$  - частота сети.

Для сравнения рассчитывается и строится на графике регулировочной характеристики реального двигателя характеристика идеального двигателя при нулевом относительном моменте нагрузки  $m=0$ :

$$v = \frac{2(\alpha - m)}{1 + \alpha^2} \quad (5.6)$$

Определяется зона пропорционального регулирования идеального и реального двигателей, т.е. диапазон изменения  $\alpha$ , при котором скорость меняется пропорционально сигналу с погрешностью

$$\Delta v \leq \pm 5\%$$

Проводится линеаризация характеристик двигателя и тахогенератора графическим способом и по зависимостям (5.4) рассчитываются коэффициенты передачи двигателя  $k_\delta$  и тахогенератора  $k_{m2}$ ,  $\omega = k_{m2}$ .

#### 4. Переходная характеристика асинхронного двигателя

Переходной характеристикой системы  $n(t)$  называется изменение во времени ее выходной координаты при подаче на вход системы единичного ступенчатого воздействия  $I(t)$ .

При определении  $n(t)$  двигателя,  $I(t)$  имитируется мгновенным включением управляющего напряжения  $U_y = 8$  В тумблером "вкл". Значение  $n$  измеряется тахогенератором, подается на вход "Y" осциллографа, работающего в режиме "развертка". Вид  $n=f(t)$  и методика определения  $T_{эм}$  приведены на рис. 6.3.

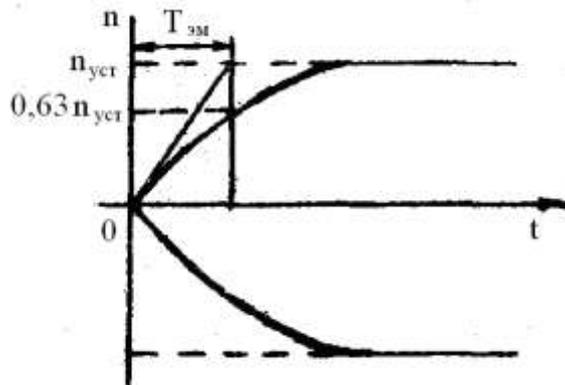


Рис. 5.3. Вид переходной характеристики асинхронного двигателя.

Согласно виду  $n=f(t)$  асинхронный двигатель может быть приближенно описан дифференциальным уравнением вида:

$$T_{y\delta} \ddot{\delta} + \dot{\delta} = k_\delta U_\delta \quad (5.7)$$

### 5. Содержание отчета

В отчете приводятся краткий перечень основных достоинств и недостатков асинхронных двигателей и тахогенератора с полым ротором, графики и уравнение, определяющие статические и динамические их характеристики, рассчитанные параметры  $k_d$ ,  $k_{тг}$ ,  $a$ ,  $T_{эм}$ . Выводы по результатам сравнительного анализа свойств реального и идеального асинхронного двигателя.

#### Библиографический список

1. Чечет Ю.С. Электрические микромашины автоматических устройств. - М.: Госэнергоиздат, 1957.-286 с.
2. Юферов Т.К. Электрические двигатели автоматических устройств. - М.: Высшая школа, 1976. - 416 с.
3. Хрущев В.В. Электрические микромашины автоматических устройств. -Л.: Энергия, 1976. - 583 с.

## Лабораторная работа №6

### ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ТРАНСФОРМАТОРА

#### Программа работы

#### 1. Экспериментальные исследования

1.1. Ознакомиться с конструкцией и паспортными данными исследуемого вращающегося трансформатора (ВТ), используя материалы стенда - витрины.

1.2. Исследовать работу ВТ - по схеме рис. 6.2, провести симметрирование ВТ, определить остаточную э.д.с.

1.3. Снять синусно-косинусную характеристику ВТ.

#### 2. Расчеты и построения

2.1. Рассчитать значение остаточной э.д.с. в процентах от значения напряжения питания обмотки возбуждения синусно-косинусного вращающегося трансформатора (СКВТ).

2.2. Построить графики зависимостей  $U_R=f(\alpha)$  для синусной и косинусной обмоток при наличии и отсутствии первичного симметрирования.

2.3. Рассчитать характеристику и построить график зависимости  $U_R=f(\alpha)$  для линейного ВТ.

#### Пояснения и указания к работе

#### 1. Краткая характеристика объекта исследования

Вращающиеся (поворотные) трансформаторы (ВТ) являются приборами нового типа, впервые созданными в нашей стране. Теория ВТ как индукционного прибора, теория и анализ схем, а также сами схемы, в которых работают ВТ, созданы и разработаны отечественными учеными.

Вращающийся трансформатор представляет собой индукционный прибор, конструктивно сходный с асинхронным двигателем с фазным ротором (рис. 6.1).

В процессе работы положение ротора ВТ относительно статора задается исполнительным двигателем, который поворачивает ротор на определенные углы.

Ротор ВТ может поворачиваться относительно статора на некоторый угол или вращаться. Электрический контакт с обмотками ротора осуществляется либо посредством контактных колец и щеток (рис. 6.1), либо посредством спиральных пружин, если ВТ работает в режиме ограниченного поворота. В последнем случае угол поворота ротора ограничивается максимальным углом закручивания спиральных пружин.

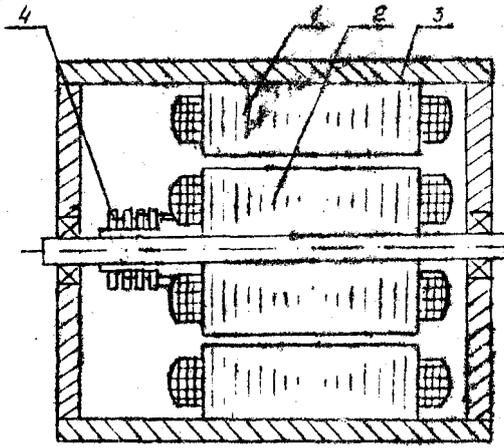


Рис. 6.1. Вращающийся трансформатор: 1,2 - обмотки статора и ротора, 3 - корпус, 4 - контактные кольца.

В пазы статора ВТ уложены обычно две обмотки, сдвинутые в пространстве на  $90^\circ$ . Одна из этих обмоток (обмотка возбуждения) питается переменным током. Другая обмотка - квадратурная, замыкается на сопротивление  $z_k$  (часто  $z_k=0$ ) и компенсирует действие поперечных полей обмоток ротора. В некоторых случаях обе статорные обмотки получают независимое питание переменным током.

В основных типах ВТ в пазах ротора также уложены обмотки, сдвинутые в пространстве на угол  $90^\circ$ , одна из которых называется синусной, другая - косинусной (см. рис. 6.2).

В специальных типах ВТ на статоре и роторе могут быть несколько обмоток (более 2-х), сдвинутых на произвольные углы друг относительно друга.

В зависимости от положения ротора взаимоиндуктивность между обмотками статора и ротора изменяется, вследствие чего изменяется и действующее значение э.д.с., наводимой в роторных обмотках. Характер изменения э.д.с.  $E_R=f(\alpha)$  зависит от схем соединений обмоток друг с другом и взаимного их расположения.

В зависимости от закона изменения напряжения на выходе различают три основных типа ВТ:

а) синусно-косинусный ВТ, позволяющий получить два напряжения на выходе  $E_{R1}=E_{Rm}\sin\alpha$ ;  $E_{2R}=E\cos\alpha$

б) линейный ВТ (ЛВТ)  $E_R=E_{Rm}\alpha$ ;

в) ВТ-построитель, для решения тригонометрических задач.

У СКВТ и ЛВТ к сети подключается только одна обмотки возбуждения.

Для получения ВТ различных типов можно использовать одну и ту же машину с двумя обмотками на статоре и двумя на роторе при различных способах их включения. Эти трансформаторы применяют в автоматических и вычислительных устройствах, предназначенных для решения геометрических и тригонометрических задач, выполнения различных математических операций, построения треугольников, преобразования координат, разложений и построения векторов и пр. В системах автоматического регулирования их используют в качестве измерителей рассогласования, фиксирующих отклонений системы от

некоторого заданного положения.

ВТ обычно работают в устройствах и приборах высокой точности, где вопрос погрешностей является одним из основных. Погрешности преобразования углового перемещения в напряжение в ВТ в зависимости от их физической природы можно подразделить на 4 группы:

1. Погрешности, определяемые принципом работы ВТ в данном режиме (отклонение выходной характеристики от синусоидального или линейного закона).

2. Погрешности, определяемые конструкцией. Они вызываются в основном несинусоидальностью распределения э.д.с. обмоток вдоль окружности машины, изменением магнитного сопротивления воздушного зазора вследствие наличия пазов на поверхностях статора и ротора, нелинейностью кривой намагничивания и явлением гистерезиса.

3. Погрешности, определяемые технологией изготовления. Основными источниками этих погрешностей являются эксцентриситет расточек статора и ротора, асимметрия магнитопровода, неточность расположения и скоса пазов, наличие короткозамкнутых витков в обмотках и листов в магнитопроводе, ошибки при выполнении обмотки. Для уменьшения этих погрешностей требуется устанавливать жесткие допуски на эксцентриситет и эллиптичность статора. Сборку пакетов статора и ротора следует производить веерным способом с учетом магнитной анизотропии листов. Не допускать возникновения короткозамкнутых витков и листов или несовпадения чисел витков в обмотках.

Влияние технологических погрешностей можно представить как появление некоторой добавочной э.д.с.  $\Delta E_{доб}$  в выходных обмотках, э.д.с.  $\Delta E_{доб}$  имеет в общем случае две составляющие: э.д.с. (напряжение) ошибки  $\Delta E_{ош}$ , совпадающую по фазе с выходной э.д.с. и остаточную э.д.с.  $\Delta E_{ост}$ , сдвинутую по фазе на  $90^\circ$ . При этом в расчетных точках с нулевым выходным напряжением (нулевых точках) э.д.с. становится отличной от нуля.

Э.д.с. ошибки обуславливает асимметрию нулевых точек. Асимметрия характеризует в основном неперпендикулярность обмоток статора и ротора.  $\Delta E_{i\phi}$  может быть скомпенсирована основной выходной э.д.с. путем дополнительного поворота на угол, при котором  $E_{вых} = -\Delta E_{ош}$ . Остаточная э.д.с.  $\Delta E_{i\dot{\theta}}$  не компенсируется дополнительным поворотом ротора. Поэтому в ВТ выходное напряжение никогда не обращается в нуль в пределах оборота, а лишь приобретает некоторое минимальное значение.

Технологические погрешности приводят также к тому, что обмотки статора (ротора) оказываются неперпендикулярными. При этом поток возбуждения наводит э.д.с. во вспомогательной (квадратурной) обмотке.

4. Погрешности, определяемые условиями эксплуатации. При изменении температуры окружающей среды меняется активное сопротивление обмоток. Колебания частоты напряжения сети вызывают изменение индуктивных сопротивлений. Изменение амплитуды напряжения сети автоматически сказывается на значении выходного, напряжения. Класс точности поворотных трансформаторов устанавливается для нормальных условий эксплуатации. При определе-

нии класса точности поворотных трансформаторов учитываются следующие показатели

1) ошибка в выработке синусоидальной (косинусоидальной) зависимости в процентах от  $U_{\dot{a}\dot{a}\dot{o}_{\max}}$  (0,005-0,2%);

2) ошибка в выработке линейной зависимости в процентах от  $U_{\dot{a}\dot{a}\dot{o}_{\max}}$  соответствующего концу линейной зоны (0,05-0,2);

3) асимметрия нулевых точек, в угловых единицах, под которой понимается максимальное отклонение углов с минимальным напряжением выходных обмоток от расчетных 0, 90, 180 и 270° (10" - 6'40");

4) максимальное значение э.д.с. в квадратуру обмотке в процентах от напряжения возбуждения  $U_a$ , при разомкнутых роторных обмотках (0,04-1,2%);

5) остаточная э.д.с. в нулевых точках в процентах от напряжения возбуждения  $U_a$  (0,003-0,1%).

Класс точности устанавливается по наихудшему из параметров [1].

## 2. Лабораторный стенд и средства исследования

Лабораторный стенд содержит исследуемый ВТ типа ВТМ5П. Обмотка возбуждения ВТ питается от сети напряжением  $U_g = 36 В$ , 400 Гц.

Значения угла поворота ротора считываются со шкалы делительной головки, установленной на оси редуктора ВТ. Причем, 6 оборотов диска делительной головки соответствуют одному обороту ротора ВТ. Угол поворота ротора измеряется в относительных единицах - т.д. (тысячных дистанций). 1 т.д. соответствует 1/6000 окружности, т.е. 100 т.д. – 6°

Измерение напряжений на статорной и роторной обмотках производится поочередно с помощью электронного вольтметра

## 3 Симметрирование ВТ

Обмотка возбуждения ВТ питается от сети переменного тока со стабилизированным напряжением. Пульсирующее магнитное поле, образуемое этой обмоткой, индуцирует в обмотке ротора  $a$  э.д.с.,  $E_0$  пропорциональную  $\cos \alpha$ , и в обмотке ротора  $b$ , э.д.с.  $E_a$ , пропорциональную  $\sin \alpha$ . При подключении к обмоткам ротора нагрузки в виде сопротивлений  $Z_a$  и  $Z_b$  в них появляются токи, и образуется вторичное магнитное поле. Во избежание искажения вторичным полем. Косинусной или синусной зависимости э.д.с,  $E_0$  и  $E_a$  от угла  $\alpha$  прибегают к так называемым вторичному и первичному симметрированию поворотного трансформатора.

Вторичное симметрирование ВТ - это подбор таких сопротивлений цепей его вторичных (роторных) обмоток, при которых отсутствует поперечный магнитный поток (направленный перпендикулярно направлению э.д.с. обмотки

возбуждения статора). Условием вторичного симметрирования, обеспечивающего равенство нулю суммы поперечных составляющих э.д.с. обмоток ротора, является равенство полных сопротивлений цепей вторичных обмоток ВТ (их «симметрия»).

Особенностью вторичного симметрирования является то, что при его осуществлении входное сопротивление ВТ, а следовательно в потребляемый из сети ток при постоянном напряжении питания  $U_6$  не зависит от угла поворота ротора  $\alpha$ . При вторичном симметрировании выходное сопротивление  $z_{вых}$  в отличие от входного  $z_{вх}$  не является постоянной величиной - оно зависит от угла поворота ротора  $\alpha$ . Последнее для целого ряда схем является весьма нежелательным. Непостоянство  $z_{вых}$  ограничивает области применения СКВТ со вторичной симметрией.

Первичное симметрирование ВТ производится путем замыкания квадратурной обмотки на сопротивление, равное по величине внутреннему сопротивлению источника питания обмотки возбуждения.

В случае, когда ВТ питается от источника большой мощности, сопротивление которого  $z_{ист} = 0$ , для осуществления первичного симметрирования достаточно замкнуть накоротко квадратурную обмотку, что чаще всего и делается на практике.

Физическую сущность первичного симметрирования можно объяснить тем, что вносящий погрешность поперечный поток ротора демпфируется токами квадратурной обмотки статора, которые возникают при наличии поперечного потока  $\Phi_\delta$ . Вследствие этого поперечный поток при первичном симметрировании очень мал (рис. 6.2,а).

Особенностью первичного симметрирования является то, что при его осуществлении выходные сопротивления СКВТ не зависят от угла поворота ротора ( $z_{вых} = const$ ). Это является положительным свойством СКВТ с первичной симметрией.

Не очень существенным недостатком СКВТ с первичной симметрией является зависимость его входного, сопротивления  $z_{вх}$  от угла  $\alpha$

На практике там, где это возможно, применяют одновременно и первичное и вторичное симметрирование. Такое симметрирование обеспечивает наилучшие характеристики СКВТ.

В работе проводится опыт по первичному симметрированию СКВТ. Схема опыта приведена на рис. 6.2а. Вторичное симметрирование проводится при снятии характеристик ВТ (рис. 6.2б).

1-1 – обмотка возбуждения

2-2 – квадратурная обмотка

3-3, 4-4 – синусная и косинусная обмотки

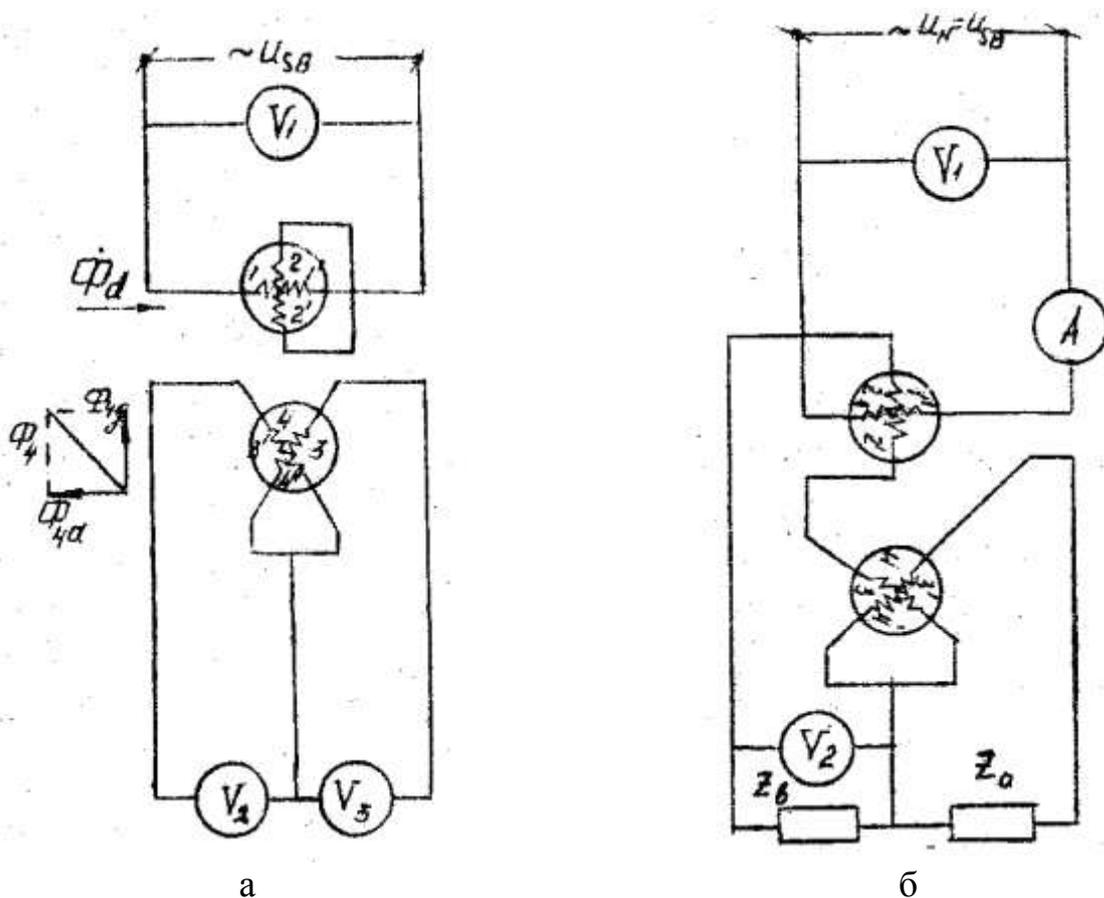


Рис. 6.2. Схемы вращающегося трансформатора: а) синусно-косинусного ВТ с первичным симметрированием; б) линейного ВТ со вторичным симметрированием.

#### 4. Синусно-косинусные характеристики ВТ

Синусная, а затем косинусная характеристики снимаются по схеме рис. 6.2. При этом вольтметр включается поочередно в цепь синусной и косинусной обмоток.

Перед началом опыта необходимо подать и проконтролировать значение напряжения сети  $U_{\text{в}}$ , а затем выставить "нуль" шкалы диска измерительной головки. "Нуль" выставляется поворотом ротора до положения, при котором в синусной обмотке напряжение  $U_{Rc} \cong 0$  (фактически  $U_{Rc} = \Delta U_{\text{осм}}$ ).

Так как ВТ имеет технологические погрешности, то вращением ротора удастся уменьшить напряжения лишь до значения

$$U_{Rc} = \Delta E_{\text{доб}}; \Delta E_{\text{доб}} = \Delta E_{\text{ош}} + \Delta E_{\text{осг}}$$

Компенсируя  $\Delta E_{\text{ош}}$  дополнительным поворотом корпуса статора ВТ относительно ротора, считываем со шкалы вольтметра значение  $\Delta E_{\text{осг}}$  и отмечаем "нуль" шкалы.

Изменяя положение ротора, измеряем  $U_{Rc}$  не более чем через каждые  $30^\circ$  (500тд). Данные замера заносим в таблицу и строим график  $U_{Rc} = f(\alpha)$ . Затем опыт проводится для косинусной обмотки и строится график  $U_{Rk} = f(\alpha)$ .

Для оценки влияния симметрирования на устранений погрешностей ВТ в

воспроизведении синусно-косинусной зависимости повторить один из опытов и построить график  $U_{Rc}=f(\alpha)$  при разомкнутой квадратурной обмотке. Сравнить график  $U_{Rc}=f(\alpha)$  в первом и втором опытах.

#### 5. Линейная характеристика ВТ.

Линейная характеристика снимается по схеме рис. 6.2б. Как видно из этой схемы ЛВТ получается из СКВТ простым переключением обмотки. Квадратурная обмотка соединяется последовательно с синусной обмоткой. Обе эти обмотки включены на сопротивление  $z_g$ . Косинусная обмотка подключается на сопротивление  $z_a$ . При протекании токов по этим обмоткам напряжение на  $z_g$ :

$$U_{RB} = U_{Rm} \frac{\sin \alpha}{1 + m \cos \alpha}$$

где  $m$  - некоторая постоянная.

Обычно берут  $m=0,54$  и получают линейность с точностью до 1% в пределах от 0 до 60°, т.е. до 1000тд. Линейная характеристика показана на рис. 6.3.

При неизменном  $z_g$  ЛВТ должен иметь вторичную симметрию. Достижение симметрии можно проверить, включив амперметр в цепь возбуждения последовательно с обмоткой 1-1 (метод амперметра). При достижении симметрии значение тока не зависит от положения ротора.

Экспериментальное определение линейной характеристики проводят при  $U_g=36$  В, 400 Гц. За начало отсчета принимают предварительно установленный "нуль" шкалы. Замер проводят через каждые 15° (250 тд) поворота ротора ВТ. По данным замера составляют таблицу и строят  $U_R=f(\alpha)$ . На графике указывают диапазон изменения  $\alpha$ , при котором  $U_R=-k\alpha$ ,  $k=const$ .

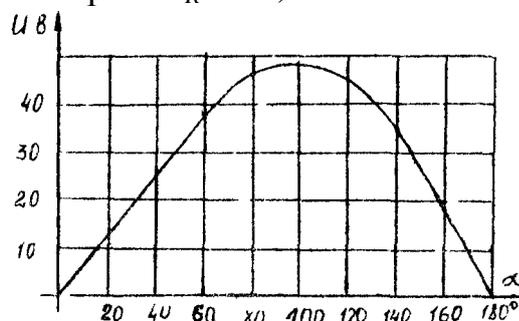


Рис. 6.3. Примерный вид линейной характеристики.

#### 6. Правила оформления отчета

В отчете приводятся: принципиальная схема ВТ и перечень видов погрешностей ВТ, электрические схемы СКВТ ЛВТ и их характеристики с анализом влияния погрешностей, определяемых принципом работы ВТ и технологией изготовления. Кратко поясняются методы устранения погрешностей (симметрирование). Приводятся таблицы и графики синусной, косинусной и линейной характеристик.

## Библиографический список.

1. Чечет К.С. Электрические микромашины автоматических устройств. - М: Госэнергоиздат. 1957. - 286 с.
2. Хрущев В. В. Электрические микромашины автоматических устройств. - М.: Энергия, 1976. - 383 с.
3. Баканов Н.В., Лиона В.А., Алексеев В. В. Информационные микромашины следящих и счетнорешающих систем (ВТ, сельсины). -М.: Советское радио, 1977. - 88 с.
4. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. - М.: Высшая школа, 1987. - 4.1 - 319 с.; Ч.П -- 335 с.

### *Лабораторная работа № 7*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### Программа работы.

#### 1. Экспериментальные исследования

1.1. Ознакомиться с паспортными данными и конструкцией двигателя, используя материалы стенда-витрины.

1.2. Снять регулировочную характеристику. Исследовать самоход  

$$n=f(U_y), M_H=0 \quad (7.1)$$

1.3. Снять механическую характеристику двигателя  

$$M_g=f(n) \quad (7.2)$$

С экрана осциллографа снять изображение характеристики.

1.4. С помощью осциллографа снять переходную характеристику двигателя:

$$n=f(t), U_y=24 \cdot I(t), B$$

2.1. На основании результатов опытов построить статические характеристики двигателя (7.1), (7.2).

2.2. Провести линеаризацию характеристики (7.1) графическим способом и представить ее в виде  $n=k_0 U_y$ . Рассчитать коэффициент передачи двигателя  $k_0$ . Определить зону пропорционального регулирования двигателя допуская погрешность в изменении скорости  $\pm 50$  об/мин.

2.3. Рассчитать масштабы построить осциллограмму  $n=f(t)$ . Определить графическим способом значение электромеханической постоянной времени.

### Пояснения и указания к работе.

#### 1. Краткая характеристика объекта исследования.

В мехатронных системах наряду с исполнительными двигателями переменного тока широкое распространение получили двигатели постоянного тока, обладающие рядом преимуществ они позволяют обеспечить теоретически любые сколь угодно малые и большие частоты вращения, дают возможность просто, плавно и экономично регулировать частоту вращения в широком диапазоне, устойчиво работают при любых частотах вращения, имеют линейные механические и в большинстве случаев регулировочные характеристики, не имеют самохода, по габаритам и массе значительно (в 2-3 раза) меньше двухфазных асинхронных исполнительных двигателей переменного тока, обладают значительным пусковым моментом и в ряде конструкций сравнительно небольшой постоянной времени.

Основным недостатком коллекторных двигателей постоянного тока, ограничивающим область их применения, является наличие коллектора и щеток,

т.е. скользящих контактов. Непостоянство переходного сопротивления скользящих контактов приводит к нестабильности характеристик двигателя. Искрение под щетками ведет к подгоранию контактов (коллектора и щеток), к загрязнению двигателя, к необходимости систематического ухода за ним, не позволяет устанавливать двигатели нормального исполнения во взрывоопасных помещениях. Коллектор и щетки, являясь источником радиопомех, требуют для их подавления специальных фильтров.

Усилители постоянного тока, необходимые для работы коллекторных исполнительных двигателей постоянного тока, обычно более сложны, чем усилители переменного тока, применяемые в схемах с исполнительными двигателями переменного тока.

Коллекторные исполнительные микродвигатели постоянного тока по конструкции якоря можно разделить на исполнительные двигатели обычного исполнения, исполнительные двигатели с гладким беспазовым якорем и малоинерционные исполнительные двигатели.

В работе исследуется малоинерционный исполнительный двигатель серии ДПР с полым немагнитным ротором

Микродвигатели серии ДПР являются двухполюсными электрическими машинами постоянного тока закрытого дополнения с возбуждением от постоянных магнитов. В отличие от микроэлектродвигателей постоянного тока классической конструкции – с якорем, набранным из шихтованной электротехнической стали, микроэлектродвигатели серии ДПР имеют полый бескаркасный якорь, постоянный магнит, расположенный внутри якоря, и наружный магнитопровод для замыкания магнитного потока. Якорь электродвигателей серии ДПР не содержит стали, а следовательно, и не имеет магнитных потерь. Кроме того, благодаря отсутствию стали в якоре условия коммутации у них более благоприятны по сравнению с условиями коммутации электродвигателей классической конструкции. Это, в свою очередь, благоприятно сказывается на износе щеток, который у микроэлектродвигателей серии ДПР существенно меньше, чем у других типов электродвигателей.

Размещение постоянных магнитов внутри якоря позволяет получить большие значения их магнитной энергии и обеспечивает лучшее ее использование ввиду резкого снижения потоков рассеяния. Поэтому при тех же наружных размерах электродвигателя и при использовании одинаковых марок магнитов получаются значительно большие величины рабочего магнитного потока по сравнению с другими магнитными системами электродвигателей.

Благодаря приведенным выше конструктивным особенностям, микроэлектродвигатели серии ДПР имеют значительные преимущества по электрическим параметрам по сравнению с существующими микроэлектродвигателями классической конструкции. Так, например, по сравнению с микроэлектродвигателями серии ДПМ они при тех же мощностях имеют более высокий к.п.д. (на 16-25%), большой срок службы (примерно в 2-3 раза) и меньшую (примерно в 2 раза) электрохимическую постоянную времени (15-20 мс).

## 2. Лабораторный стенд и средства исследования

Лабораторный стенд содержит объект исследования - микродвигатель ДПР-52, тахогенератор постоянного тока, изменяющий частоту вращения вала двигателя - ТГП-3 и датчик момента ДМ. Управление двигателем осуществляется путем изменения напряжения в цепи обмотки якоря  $U_y$ . Напряжения  $U_y$ ,  $U_{mz}$  изменяются поочередно вольтметром с пределом измерения 40 В, изменение напряжения во времени наблюдается на экране осциллографа С1 30.

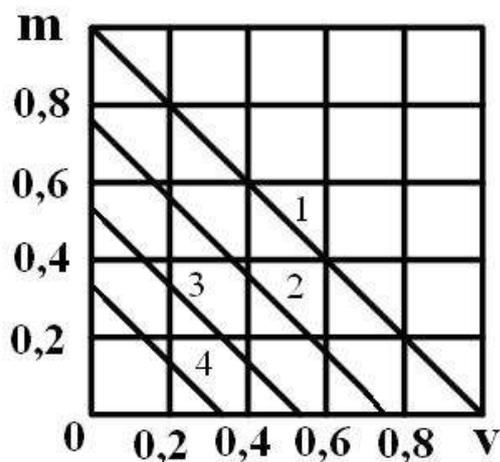
## 3. Статические характеристики двигателя

При снятии регулировочных характеристик значение задается с помощью источника постоянного тока и подается в цепь якорной обмотки  $U_y = U_y$ . При этом  $M_n = 0$ . Значение  $U_{mz}$  измеряется тахогенератором  $U_{mz} = k_{mz} n$ , значение  $U_{mz}$  измеряется с помощью вольтметра. Масштабный коэффициент  $k_{mz}$  определяется по справочным данным (при номинальных значениях  $U_y = 27$  В,  $n = 4500$  об/мин). Результаты опыта заносятся в табл. 7.1.

Таблица 7.1

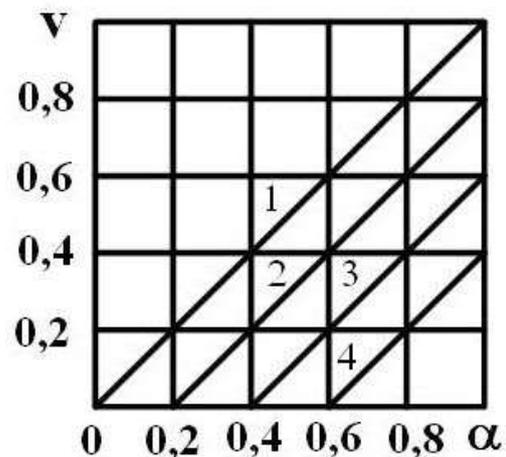
$U_y, В$					
$U_{mz}, В$					
$n, об/мин$					

По данным таблицы строится график регулировочной характеристики в относительных единицах (рис. 7.1,б):  $\alpha = \frac{U}{U_{яном}}$ ;  $\nu = \frac{n}{n_{ном}}$ .



1 –  $\alpha = 1$ , 2 –  $\alpha = 0,75$ , 3 –  $\alpha = 0,5$ ,  
4 –  $\alpha = 0,25$

а



1 –  $m = 1$ , 2 –  $m = 0,75$ , 3 –  $m = 0,5$ ,  
4 –  $m = 0,25$

б

Рис. 7.1. Статические характеристики двигателя:  
а) механические; б) регулировочные

Определяется зона пропорционального регулирования  $\alpha=a$ , проводится линейризация характеристики  $v=f(\alpha)$  и рассчитывается коэффициент передачи двигателя

$$k_{\partial} = \frac{v}{\alpha} = \frac{n}{U_y}$$

Изображение механической характеристики (рис. 7.1а) снимается с экрана осциллографа.  $M_{\partial}$  измеряется датчиком момента (ДМ). Сигнал с ДМ подается на вход «У» осциллографа, сигнал с тахогенератора  $U_{mz}=k_{mz}n$  на вход «Х». Осциллограф работает в режиме «усиление». Графики кривых  $M_{\partial}=f(n)$  для тех значений  $U_y$  зарисовываются на кальку.

#### 4. Переходная характеристика двигателя

Переходная характеристика  $n=f(t)$  снимается при  $U_y=24 \cdot 1(t)$ . Сигнал  $U_{mz}=k_{mz}n$  подается на вертикальный вход осциллографа, который работает в режиме развертки. График переходного процесса снимается с экрана на кальку при мгновенном включении управляющего напряжения  $U_y$ . Примерный вид  $n(t)$  и методика определения электромеханической постоянной времени  $T_{эм}$  приведены на рис. 7.2.

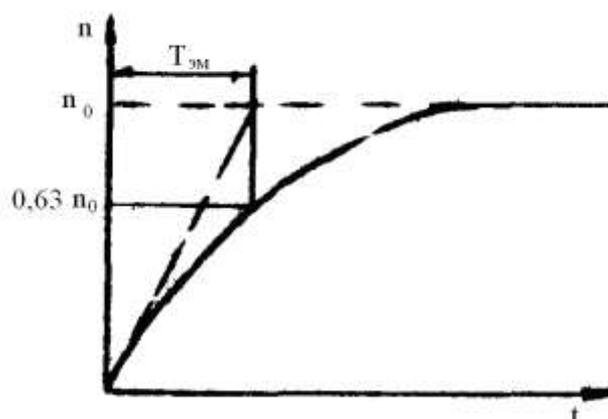


Рис. 7.2. Примерный вид переходного процесса двигателя.

Вид переходного процесса показывает, что работа двигателя постоянного тока может быть описана уравнением вида (5.7).

Полученные значения параметров  $k_{\partial}$ ,  $a$ ,  $T_{эм}$  сравниваются с параметрами асинхронного двигателя (работа № 5).

#### 5. Содержание отчета

В отчете приводятся: перечень основных достоинств и недостатков исполнительных двигателей постоянного тока, и в частности, серии ДДР, паспортные данные двигателя ДДР-52, графики его регулировочных, механических и переходных характеристик, дифференциальное уравнение двигателя, рассчитанные параметры  $k_{\partial}$ ,  $a$ ,  $T_{эм}$ . Выводы по результатам сравнительного анализа свойств исполнительных двигателей постоянного и переменного тока.

## Библиографический список.

1. Армeнский Е. В., Фалк Д. Б. Электрические микромашины. – М.: Высшая школа, 1965. – 286 с.
2. Юферов Ф. М. Электрические машины автоматических устройств. – М.: Высшая школа, 1976. – 416 с.
3. Микроэлектродвигатели для систем автоматики: Технический справочник /под ред. Э. А. Лодочникова, Ф. М. Юферова. – М.: Энергия, 1969, - 765 с.
4. Брускин Д. Э., Зорохович А. Е., Хвостов В. С. Электрические машины. – М.: Высшая школа, 1987. – Ч. 1 – 319 с.; Ч. П. – 335 с.