

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

---

А.А. Савелов

**Пособие по выполнению лабораторных работ**

по дисциплине

**"ЭЛЕКТРО И ПРИБОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ  
ВОЗДУШНЫХ СУДОВ"**

*для студентов специальности 160905*

**Москва – 2008**

Данное пособие по выполнению лабораторных работ по курсу "Электро и приборное оборудование воздушных судов" издается в соответствии с учебной программой для студентов V курса специальности 160905.

Рассмотрен и одобрен на заседании кафедры от .09.2008 г. и методической комиссией факультета от .09.2008 г.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА  
ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ**

**Цель работы**

1. Ознакомление с устройством генератора постоянного тока.
2. Экспериментальное исследование основных характеристик генератора параллельного возбуждения.

**1. Краткие теоретические сведения**

Принцип действия генератора постоянного тока основан на явлении электромагнитной индукции. Сущность этого явления в применении к генератору постоянного тока состоит в том, что в обмотке, расположенной на стальном сердечнике, находящемся в магнитном поле и приведенном во вращение внешней силой двигателя, наводится ЭДС. Величину ЭДС обмотки генератора можно определить следующим образом.

В каждом проводнике обмотки якоря в процессе работы генератора постоянного тока наводится ЭДС.

$$e = B \cdot l \cdot v,$$

где  $B$  – индукция в воздушном зазоре машины;

$l$  – длина проводника;

$v$  – линейная скорость проводника.

Магнитная индукция в разных точках воздушного зазора неодинакова и отличается по величине и по знаку. Среднее значение ЭДС в проводниках обмотки:

$$E_{\text{ср}} = B_{\text{ср}} \cdot l \cdot v.$$

ЭДС обмотки якоря  $E_{\text{я}}$  определяется произведением среднего значения ЭДС одного проводника на число последовательно соединенных проводников одной параллельной ветви обмотки якоря:

$$E_{\text{я}} = E_{\text{ср}} \cdot \frac{N}{2a}$$

где  $N$  - число проводников обмотки якоря;

2а - число параллельных ветвей, т.е. групп последовательно соединенных витков (секций), ток в которых имеет одинаковое направление.

Воспользовавшись выражением линейной скорости  $v = \frac{\pi D n}{60}$ , получим:

$$E_{\text{я}} = B_{\text{ср}} \cdot l \cdot \frac{\pi D n}{60} \cdot \frac{N}{2a}.$$

Здесь D - диаметр якоря, n - частота вращения якоря, об/мин. Расстояние, измеренное по окружности якоря, между соседними полюсами машины называют полюсным делением  $\tau$ , а число пар полюсов машины обозначены p.

Учитывая, что полюсное деление  $\tau = \frac{\pi D}{2p}$ , то  $\pi D = \tau \cdot 2p$  и для ЭДС обмотки якоря получим:

$$E_{\text{я}} = B_{\text{ср}} \cdot l \cdot \tau \frac{2pn}{2a} = B_{\text{ср}} \cdot l \cdot \tau \cdot n \frac{pN}{60a}$$

Произведение  $l \cdot \tau$  представляет площадь, через которую проходит магнитный поток полюса  $\Phi$ , поэтому

$$B_{\text{ср}} \cdot l \cdot \tau = \Phi.$$

Обозначив постоянную величину  $\frac{pN}{60a}$  через  $C_e$ , тогда:

$$E_{\text{я}} = C_e \cdot \Phi \cdot n.$$

Уравнение электрического равновесия генератора постоянного тока (независимо от способа возбуждения) записывается:

$$E = U + I_{\text{я}} \cdot R_{\text{ям}} + 2\Delta U_{\text{щ}},$$

где E - ЭДС генератора; U - напряжение на зажимах генератора;  $I_{\text{я}}$  - ток якоря;  $R_{\text{ям}}$  - сопротивление последовательно соединенных обмоток якоря и дополнительных полюсов;  $2\Delta U_{\text{щ}}$  - падение напряжения на сопротивлении  $R_{\text{щ}}$  щеточных контактов.

Обозначив через  $R_{\text{я}}$  сопротивление цепи якоря  $R_{\text{я}} = R_{\text{ям}} + R_{\text{щ}}$ , получим уравнение в более простом виде:

$$E = U + I_{\text{я}} R_{\text{я}}, \tag{1.1}$$

Умножив обе части равенства (1.1) на ток якоря, получим уравнение баланса мощностей:

$$E I_{\text{я}} = U I_{\text{я}} + I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}}. \tag{1.2}$$

Для генератора с параллельным возбуждением

$$I_{\text{я}} = I + I_{\text{в}}, \quad (1.3)$$

где  $I$  - ток нагрузки,  $I_{\text{в}}$  - ток возбуждения, и уравнение баланса мощностей принимает вид:

$$EI_{\text{я}} = UI + UI_{\text{в}} + I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}} \quad (1.4),$$

где  $E I_{\text{я}} = P_{\text{эм}}$  - электромагнитная мощность генератора;  $UI = P_2$  - полезная мощность;  $UI_{\text{в}}$  - потери в цепи возбуждения;  $I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}}$  - потери в цепи якоря.

При подключении нагрузки ток якоря  $I_{\text{я}}$  создает в генераторе электромагнитный момент  $M_{\text{эм}}$ , соответствующий его электромагнитной мощности,  $P_{\text{эм}}$  который выражается формулой:

$$M_{\text{эм}} = \frac{P_{\text{эм}}}{\Omega} = \frac{E I_{\text{я}}}{\Omega} \quad \text{где } \Omega = \frac{2\pi n}{60}$$

или

$$M_{\text{эм}} = C_e \Phi n \frac{I_{\text{я}} 60}{2\pi n} = C_m \Phi I_{\text{я}}, \quad (1.5)$$

где  $C_m = \frac{pN}{2\pi a}$  - конструктивная постоянная машины;  $\Omega$  - угловая скорость вала генератора.

Этот момент является тормозным по отношению к моменту  $M_1$ , приложенному к валу генератора со стороны первичного двигателя.  $M_1$  больше  $M_{\text{эм}}$  на величину момента холостого хода генератора  $M_0$ , соответствующего механическим потерям  $\Delta P_{\text{мех}}$  и потерям в стали  $\Delta P_c$ ,

$$M_1 = M_{\text{эм}} + M_0 \quad (1.6)$$

Мощность, подведенная к генератору, равна:

$$P_1 = P_{\text{эм}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_c = P_{\text{эм}} + P_0.$$

Коэффициент полезного действия (КПД) генератора определяется соотношением:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{UI}{UI + \sum \Delta P},$$

где  $\sum \Delta P = UI_{\text{в}} + I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}} + P_0$  - сумма потерь;

$P_1$  - мощность подводимая к генератору;

$P_2$  - полезная мощность, отдаваемая генератором.

Максимум КПД наступает при равенстве суммы  $\Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_c$  электрическим потерям в обмотках  $\Delta P_{\text{э}}$ .

Кроме перечисленных потерь в машинах постоянного тока возникают также добавочные потери, вызываемые пульсациями магнитного потока,

магнитными полями коммутируемых секций якоря, искажением основного потока, действием реакции якоря. Они составляют примерно 1% от полезной мощности генератора.

### 1.1. Характеристики генератора параллельного возбуждения

Магнитные и электрические свойства генераторов оцениваются по их основным характеристикам.

1) Характеристика холостого хода (рис. 1.1, а) представляет зависимость ЭДС.  $E$  генератора от тока возбуждения при постоянных значениях частоты вращения и токе нагрузки  $I$ , равном нулю, т.е.

$$E = f(I_B) \text{ при } n = \text{const и } I = 0.$$

Особенностью характеристики холостого хода является наличие остаточной ЭДС -  $E_{\text{ост}}$  и относительно широкой петли гистерезиса. За практическую характеристику холостого хода принимается средняя (пунктирная) линия между восходящей и нисходящей ветвями.

2) Внешняя характеристика (рис.1.1,б) генератора представляет зависимость напряжения  $U$  от тока нагрузки  $I$  (тока якоря) при постоянных значениях частоты вращения  $n$  и сопротивления цепи возбуждения  $R_B$ , т.е.  $U = f(I_B)$  при  $n = \text{const}$  и  $R_B = R_{\text{вном}}$ . С ростом нагрузки напряжение генератора падает сначала за счет падения напряжения на внутреннем сопротивлении машины  $I_A R_A$  и уменьшения тока возбуждения из-за снижения напряжения, а также за счет размагничивающего действия поперечной реакции якоря, вызывающий уменьшение результирующего магнитного потока. При перегрузках вследствие большего размагничивания машины поле генератора с параллельным возбуждением опрокидывается и установившийся ток при коротком замыкании  $I_{к \text{ уст}}$  определяется остаточным магнитным потоком. Несмотря на то, что  $I_{к \text{ уст}}$  может быть меньше номинального, короткие замыкания опасны из-за того, что переходный ток короткого замыкания значителен. Кроме того, длительное протекание установившегося тока  $I_{к \text{ уст}}$  может привести к размагничиванию машины.

3) Регулировочная характеристика (рис. 1.1, в) представляет зависимость тока возбуждения  $I_B$  от тока нагрузки  $I$  при постоянной частоте вращения -  $n$  и напряжении  $U$ .

$$I_B = f(I) \text{ при } n = \text{const и } U = \text{const}.$$

Регулировочные характеристики показывают, как надо изменять ток возбуждения при изменении нагрузки, чтобы напряжение оставалось постоянным.

4) Нагрузочная характеристика (рис. 1.1, г) представляет зависимость напряжения генератора  $U$  от тока возбуждения при постоянных значениях частоты вращения  $n$  и тока нагрузки  $I$  (ток якоря  $I_{\text{я}}$ ), не равного нулю,

$$U = f(I_{\text{в}}) \text{ при } n = \text{const и } I = \text{const} .$$

По характеристике холостого хода и нагрузочной строится реактивный треугольник "авс", в котором катет "ав" равен падению напряжения в цепи якоря ( $I_{\text{я}}R_{\text{я}}$ ), другой катет "вс" выражает магнитодвижущую силу (МДС) реакции якоря (в масштабе тока возбуждения) а гипотенуза "ас" пропорциональна току нагрузки. Падение напряжения "bd", равное разности между характеристикой холостого хода ( $E_0$ ) и внутренней ( $E$ ), вызывается размагничивающим действием реакции якоря.

5) Характеристика короткого замыкания (рис. 1.1, д) представляет зависимость тока якоря  $I_{\text{я}}$  от тока возбуждения  $I_{\text{в}}$  при постоянных значениях частоты вращения и напряжении, равном нулю,

$$I_{\text{я}} = f(I_{\text{в}}) \text{ при } n = \text{const и } U = 0.$$

Снятие характеристики приводится по схеме с независимым возбуждением при пониженном токе возбуждения. Магнитная система машины при этом не насыщена. Поэтому характеристика выражается прямой, отсекающей на оси ординат отрезок, пропорциональный току, протекающему по обмотке якоря под влиянием ЭДС, индуцированной потоком остаточного магнетизма.

## 1.2. Самовозбуждение генератора

В генераторе параллельного возбуждения обмотка возбуждения включена параллельно обмотке якоря, для питания ее не требуется постороннего источника питания. Напряжение на обмотку возбуждения подается с зажимов якоря генератора. Ток в обмотке возбуждения:

$$I_{\text{в}} = \frac{U}{R_{\text{в}}} .$$

Вольт-амперная характеристика цепи возбуждения  $I_{\text{в}}R_{\text{в}} = f(I_{\text{в}})$  при  $R_{\text{в}} = \text{const}$  представляет собой прямую, проходящую через начало координат (рис. 1.2).

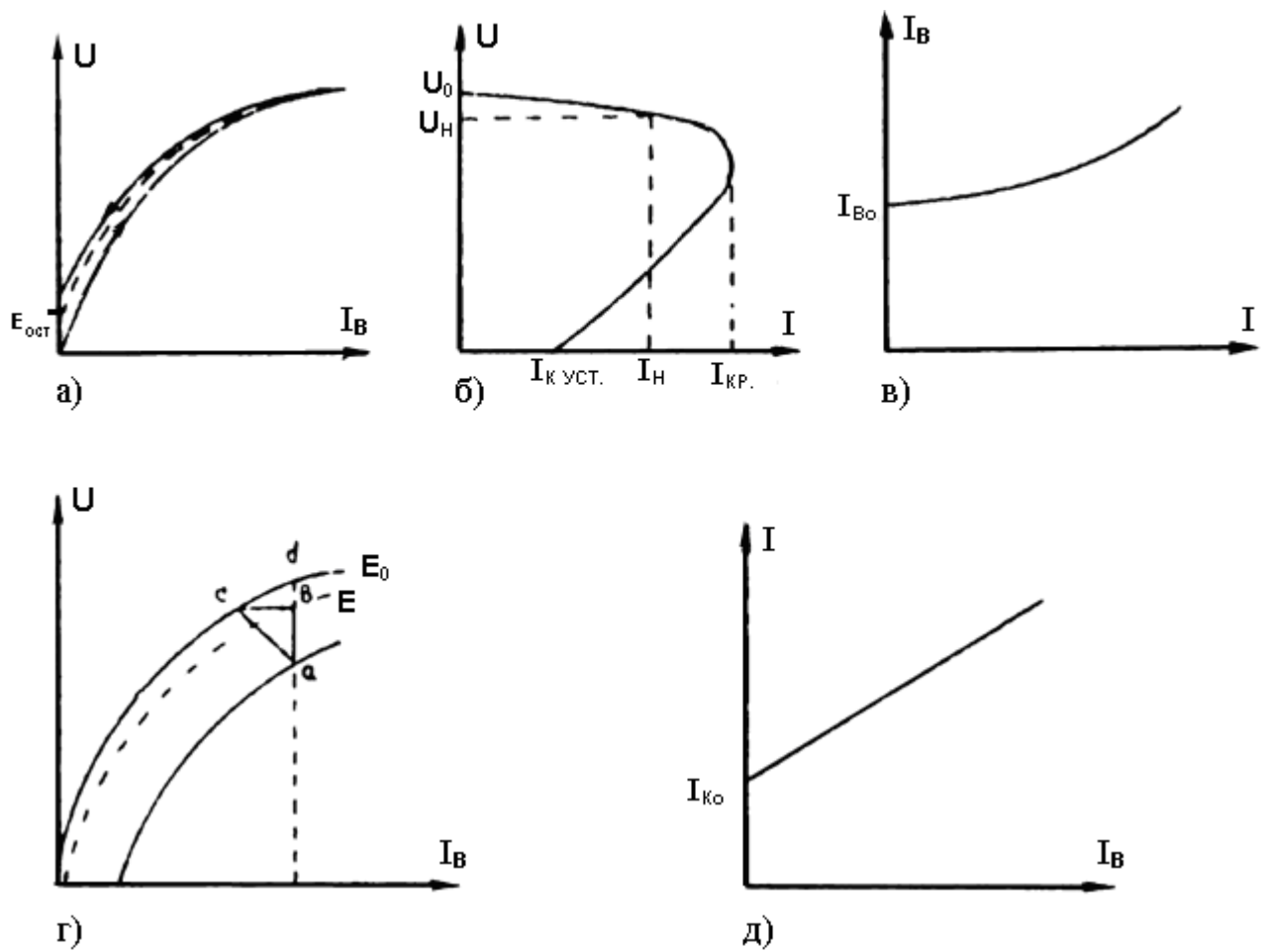


Рис. 1.1. Характеристики генератора:  
 а – холостого хода; б – внешняя; в – регулировочная;  
 г – нагрузочная; д – короткого замыкания

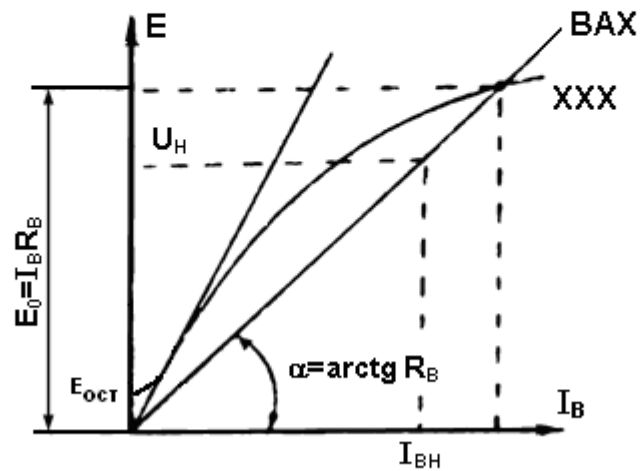


Рис. 1.2. К пояснению самовозбуждения генератора



Самовозбуждение генератора происходит вследствие того, что магнитная система машины, будучи однажды намагниченной, сохраняет небольшой магнитный поток за счет остаточного магнетизма  $\Phi_{ост}$ . При вращении якоря этот поток наводит в обмотке якоря небольшую ЭДС -  $E_{ост}$ , под действием которой в цепи возбуждения возникает небольшой ток  $I_v$ . Если МДС возбуждения  $I_v W_v$  создает поток, направленный согласно с потоком  $\Phi_{ост}$ , то произойдет увеличение магнитного потока машины. Это приведет к дополнительному увеличению ЭДС  $E_{01}$  генератора. Увеличение ЭДС генератора приведет к увеличению тока возбуждения  $I_v$  и т.д. Процесс постоянного нарастания ЭДС продолжается, пока напряжение генератора не достигнет определенной величины, зависящей от параметров генератора. Величина ЭДС  $E_0$ , до которой самовозбудится генератор, зависит от угла наклона вольтамперной характеристики, т.е. от сопротивления цепи возбуждения  $R_v$ . Следовательно, чем больше  $R_v$ , тем меньше ЭДС  $E_0$ , до которой самовозбудится генератор. При  $R_v > R_{кр}$  генератор вообще не самовозбуждается.

Поэтому самовозбуждение генератора с параллельным возбуждением возможно лишь при соблюдении следующих условий:

- 1) магнитная цепь машины должна иметь поток остаточного магнетизма;
- 2) магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения, должен быть направлен согласно с потоком остаточного магнетизма;
- 3) сопротивление цепи возбуждения должно быть меньше критического.

## **1.2. Программа работы**

- 1) Ознакомьтесь с устройством и принципом работы генератора постоянного тока.
- 2) Снять основные характеристики генератора: холостого хода, внешнюю, регулировочную, нагрузочную, короткого замыкания.
- 3) Построить перечисленные характеристики по снятым экспериментальным данным.

## **1.3. Электрическая схема установки и порядок работы**

- 1) Ознакомьтесь с устройством генератора постоянного тока.
- 2) Запишите номинальные данные исследуемого агрегата.
- 3) Подберите измерительную аппаратуру для проведения исследований.
- 4) Соберите электрическую схему установки (рис. 1.3).

5) Подготовьте таблицы для записи результатов измерений (1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5).

6) Сообщите преподавателю о готовности схемы к выполнению исследований и после его разрешения выполните программу исследований.

#### **1.4. Снятие характеристики холостого хода $E = f(I_B)$ при $n = \text{const}$ , $I = 0$ .**

1) После проверки схемы установки преподавателем возвратите схему в исходное положение: реостаты  $R_{вг}$  - максимальное сопротивление, реостат  $R_{вд}$  - минимальное сопротивление.

2) Включите источник питания электродвигателя, напряжение которого должно быть 27-28 В. После чего включите электродвигатель выключателем  $Q_1$ , затем, увеличивая сопротивление реостата  $R_{вд}$ , установите заданную частоту вращения генератора  $n = n_{ном}$ , которая контролируется по показанию вольтметра (индикатора)  $U_3$ . Снимите и запишите в табл. 1.1 значения  $U_r$  и  $I_B$  по показаниям приборов.

3) Включите обмотку возбуждения генератора (выключатель  $O_3$ ). Запишите значения  $U_r$  и  $I_B$ . Плавно уменьшая сопротивление реостата  $R_{вг}$ , установите  $U_r = (1,2 \dots 1,25) U_{ном}$ , что соответствует 34...35 В. Снимите на этом диапазоне изменения напряжения до 10 значений  $U_r$  и  $I_B$  и запишите в табл. 1.1. После чего, плавно увеличивая сопротивление реостата  $R_{вг}$  до максимальной величины, снимите и запишите в табл. 1.1 6-7 значений  $U_r$  и  $I_B$  при снижении напряжения. Отключите обмотку возбуждения генератора (выключатель  $O_3$ ) и запишите значения  $U_r$  и  $I_B$ .

4) Выключите приводной электродвигатель.

5) По измеренным данным постройте восходящую и нисходящую ветви характеристики намагничивания  $U_r = f(I_B)$ , падением напряжения в цепи якоря при холостом ходе и реакцией якоря можно пренебречь, приняв  $E_0 \approx U_0$ . Проведите среднюю линию между этими ветвями. Эта линия и принимается за практическую характеристику холостого хода генератора.

№ отсчета	Восходящая ветвь		Нисходящая ветвь		Среднее значение	
	U <sub>Г</sub> , В	I <sub>В</sub> , А	U <sub>Г</sub> , В	I <sub>В</sub> , А	U <sub>Г</sub> , В	I <sub>В</sub> , А

**1.5. Снятие внешней характеристики генератора  $U_G = f(I)$ ,  
при  $R_B = \text{const}$ ,  $n = n_{\text{ном}} = \text{const}$**

1) Включите двигатель (приводной) в соответствии с п. 2) раздела 1.4. Установите частоту вращения генератора  $n = n_{\text{ном}}$  и поддерживайте ее неизменной в процессе опыта.

2) Включите возбуждение (выключатель Q3) генератора и реостатом  $R_{\text{вг}}$  отрегулируйте номинальное напряжение генератора  $U_G = U_{\text{ном}} = 28 \text{ В}$ .

3) Установите максимальное сопротивление  $R_{\text{н}}$  и включите нагрузку (выключатель Q2). Плавно уменьшая сопротивление  $R_{\text{н}}$  установите по амперметру  $A_1$  номинальный ток генератора ( $I_{\text{н}}$ ). Реостатом  $R_{\text{вг}}$  отрегулируйте напряжение генератора ( $U_G$ ), равное номинальному (28 В). Снимите и запишите в табл. 1.2 показания приборов I,  $U_G$ ,  $I_{\text{в}}$ .

4) Плавно увеличьте сопротивление нагрузки до максимального значения. Запишите значения I,  $U_G$ ,  $I_{\text{в}}$ . Отключите нагрузку (выключатель Q2), запишите значения  $U_G$ ,  $I_{\text{в}}$  и снова включите нагрузку.

5) Установите номинальный ток нагрузки ( $I = I_{\text{ном}}$ ). После чего, плавно уменьшая сопротивление нагрузки  $R_{\text{н}}$  вплоть до короткого замыкания, снимите и запишите в табл. 1.2 8-10 значений показаний приборов I,  $U_G$ ,  $I_{\text{в}}$  на этом диапазоне нагрузки.

6) Установите максимальное значение сопротивления (реостат введен полностью) и отключите нагрузку.

7) Выключите электродвигатель.

Таблица 1.2

№ отсчета	I, А	U <sub>Г</sub> , В	I <sub>В</sub> , В	Примечание
1				
2				
3				
4				
.				
.				
.				

### 1.6. Снятие регулировочной характеристики $I_B = f(I)$ при

$$U_G = U_{ном} = \text{const}, n = n_{ном} = \text{const}.$$

1) Отключите выключателем Q2 нагрузку генератора. Включите электродвигатель и установите номинальные значения частоты вращения (реостатом R<sub>вд</sub>) и напряжения генератора (реостатом R<sub>вг</sub>).

2. Установите реостат R<sub>н</sub> в положение максимального сопротивления и подключите его к генератору. Снимите и запишите в табл. 1.3 значения I, U<sub>Г</sub>, I<sub>В</sub>, n.

3) Поддерживая постоянными частоту вращения и напряжение генератора, плавно увеличьте ток нагрузки до номинального. Через равные значения приращения тока нагрузки (6-7 точек) снимите и запишите в табл. 1.3 значения I, U<sub>Г</sub>, I<sub>В</sub>, n.

4) Уменьшите реостатом R<sub>н</sub> ток нагрузки до минимального значения и отключите нагрузку.

5) Выключите электродвигатель.

6) По полученным данным постройте регулировочную характеристику генератора.

Таблица. 1.3

№ отсчета	I, А	I <sub>В</sub> , А	U <sub>Г</sub> = U <sub>ном</sub> , В	n = n <sub>ном</sub> , об/мин

**1.7. Снятие нагрузочной характеристики генератора  $U_r = f(I_B)$  при  $n = \text{const}, I = \text{const}$**

- 1) Включите приводной электродвигатель. Установите частоту генератора  $n = n_{\text{ном}}$  и поддерживайте ее неизменной в течение всего опыта.
- 2) Отрегулируйте реостатом  $R_{\text{вг}}$  напряжение генератора на 1-2 В выше номинального (29-30 В).
- 3) Включите нагрузку и установите ток нагрузки, равный  $(0,7-0,8)I_{\text{ном}}$ . Снимите и запишите в табл. 1.4 значения  $I, I_B, U_r$  по показаниям приборов.
- 4) Плавно уменьшайте сопротивление нагрузки (вплоть до короткого замыкания) и одновременно реостатом уменьшайте ток возбуждения так, чтобы ток нагрузки оставался постоянным ( $I$ ). Снимите 6-8 показаний приборов через равные значения уменьшения тока возбуждения и запишите в табл. 1.4.
- 5) Увеличьте сопротивление нагрузки до максимального, поддерживая неизменным напряжение генератора, после чего нагрузку отключите.
- 6) Выключите приводной двигатель.
- 7) По измеренным данным постройте нагрузочную характеристику генератора.

Таблица 1.4

№ отсчета	$I, \text{A}$	$I_B, \text{A}$	$U_r, \text{В}$	$n = n_{\text{ном}} \text{ об/мин}$

**1.8. Снятие характеристики короткого замыкания  $I_{\text{я}} = f(I_B)$  при  $n = n_{\text{ном}} = \text{const}, U_r = 0$ .**

- 1) Соберите электрическую схему генератора в соответствии с рис. 1.4, но не изменяя схемы включения электродвигателя.
- 2) Включите приводной электродвигатель и при включенном питании цепи обмотки возбуждения генератора ( $Q3$  включен) установите и поддерживайте в течении опыта частоту вращения генератора  $n = n_{\text{ном}}$ . Снимите показания амперметра  $A_1$  и  $A_2$  ( $I_{\text{я}}, I_B$ ) и запишите в табл. 1.5.
- 3) Установите ползунок потенциометра  $R_{\text{вг}}$  в исходное положение, обеспечивающее минимальный ток возбуждения генератора ( $I_{B \text{ min}}$ ). Включите питание цепи возбуждения. Запишите значения  $I_{\text{я}}$  и  $I_B$ .

4) Плавно увеличьте ток возбуждения до значения  $I_{\text{я}} = I_{\text{ном}}$  снимите 2-3 показания амперметра  $A_1$  и  $A_2$  ( $I_{\text{я}}$ ,  $I_{\text{в}}$ ).

5) Возвратите ползунок потенциометра  $R_{\text{вг}}$  в исходное положение, отключите питание цепи возбуждения генератора, выключите приводной электродвигатель.

6) По полученным данным постройте характеристику короткого замыкания.

7) Сообщите преподавателю об окончании эксперимента и по его разрешению разберите электрическую схему установки.

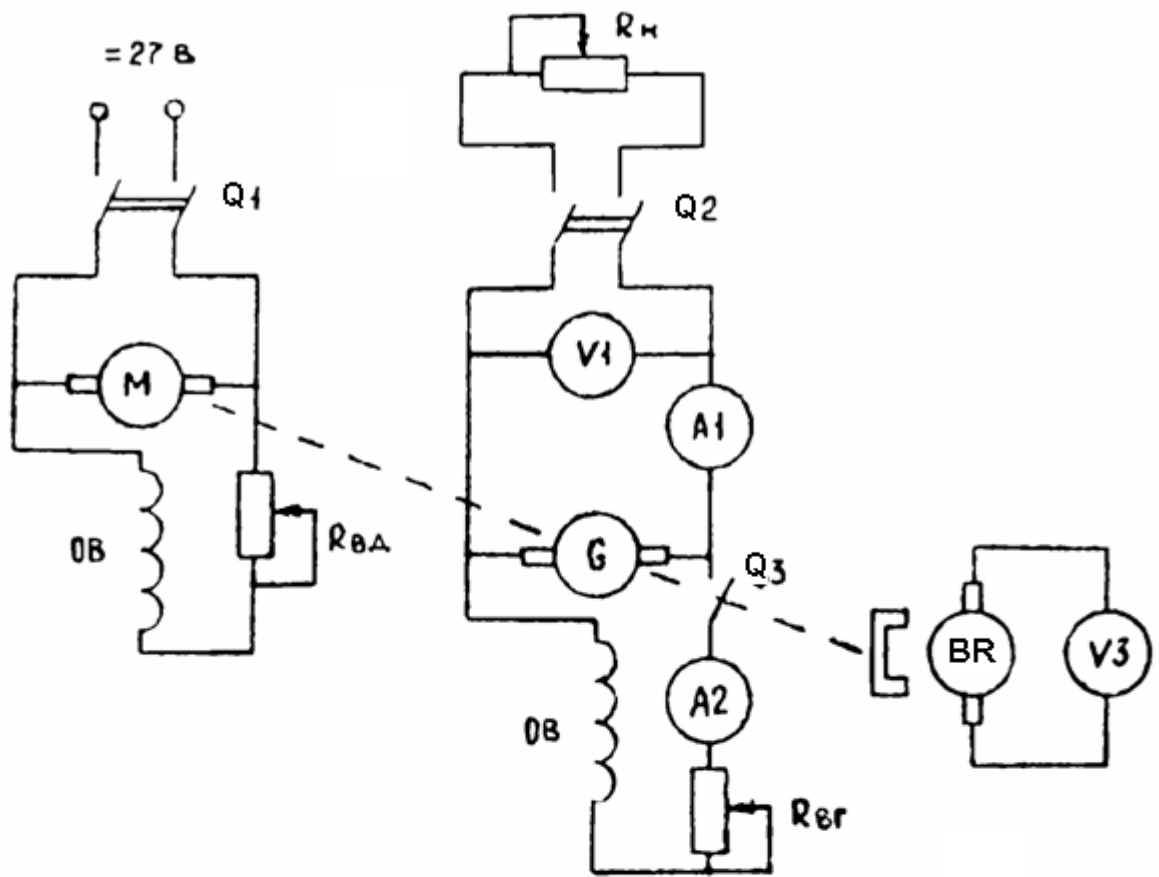


Рис. 1.3. Схема лабораторной установки

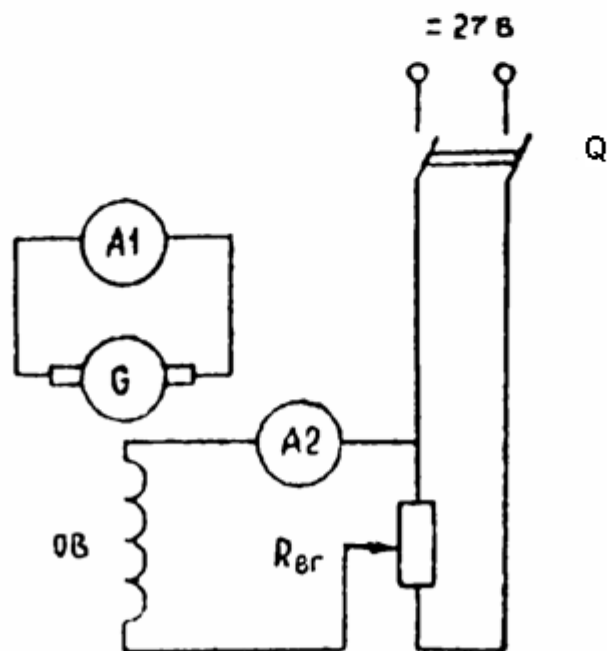


Рис. 1.4. Схема установки для опыта короткого замыкания (к.з.)

Таблица 1.5

№ отсчета	I, А	I <sub>B</sub> , А	n = n <sub>НОМ</sub> , об/мин

### 1.9. Содержание отчета

- 1) Номинальные данные генератора.
- 2) Электрическая схема установки.
- 3) Таблицы измерений и вычислений.
- 4) Расчетные формулы и примеры расчета.
- 5) Построенные характеристики генератора: (холостого хода, внешняя, регулировочная, нагрузочная, короткого замыкания).
- 6) Выводы по работе.

### 1.10. Контрольные вопросы

- 1) Поясните устройства и принцип работы машин постоянного тока.
- 2) На какие группы делятся генераторы по способу их возбуждения и в чем состоит их отличие?
- 3) Напишите и поясните уравнение электрического равновесия генератора.
- 4) Напишите и поясните уравнение баланса мощностей генератора.
- 5) Почему с увеличением тока нагрузки напряжение на выходе генератора уменьшается?
- 6) В чем заключается принцип самовозбуждения и каковы условия самовозбуждения для генератора с параллельным возбуждением?
- 7) Почему восходящая и нисходящая ветви характеристики холостого хода генератора не совпадают?
- 8) Как выражается коэффициент полезного действия генератора?
- 9) Каково назначение добавочных полюсов и компенсационной обмотки?



- 10) Чем объясняется нелинейный характер регулировочной характеристики генератора с параллельным возбуждением?
- 11) Каково назначение коллектора в генераторе постоянного тока?
- 12) Что такое размагничивающее действие реакции якоря?
- 13) Какие участки содержит магнитная цепь машины?
- 14) В чем сущность явления реакции якоря машин постоянного тока?
- 15) Каковы причины, способные вызвать круговой огонь по коллектору?
- 16) Чем обусловлено падение напряжения генератора с ростом нагрузки?
- 17) Почему характеристика короткого замыкания имеет вид линейной зависимости?
- 18) Когда заканчивается процесс самовозбуждения генератора?
- 19) Почему ток установившегося короткого замыкания не опасен для генератора с параллельным возбуждением?
- 20) Чем обусловлен ток короткого замыкания  $I_{ко}$  при токе возбуждения равным нулю?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

# ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

### Цель работы

- 1) Ознакомиться с устройством, принципом работы и основными характеристиками асинхронного двигателя.
- 2) Экспериментально исследовать основные характеристики электродвигателя.

### 2.1. Краткие теоретические сведения

Асинхронной машиной называется машина, частота вращения ротора которой при постоянной амплитуде и частоте приложенного напряжения зависит от нагрузки. Различают коллекторные и бесколлекторные асинхронные машины. Основными частями трехфазного асинхронного двигателя являются статор и ротор.

При питании обмотки статора асинхронного двигателя переменным током, она создает внутри машины вращающееся магнитное поле. Частота вращения этого поля называется синхронной частотой вращения ( $n_1$ ).

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p},$$

где  $f_1$  – частота тока питающей сети;

$p$  – число пар полюсов.

Поле статора при вращении пересекает проводники обмотки ротора и наводит в них ЭДС. Так как обмотка ротора замкнута, то в проводниках этой обмотки возникают токи. Ток в каждом из проводников обмотки ротора, взаимодействуя с полем статора, создает электромагнитную силу  $F_{эм}$ . Совокупность  $F_{эм}$  создает электромагнитный момент  $M$ , который приводит ротор во вращение с частотой  $n_2$  в направлении вращения поля. Частота вращения ротора  $n_2$  всегда меньше синхронной частоты поля  $n_1$ . Величина отставания характеризуется соотношением:  $S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{n_3}{n_1}$ , где  $n_3$  - частота

вращения магнитного поля относительно ротора, которая называется частотой скольжения. Частота вращения ротора через скольжение выражается формулой  $n_2 = n_1(1-S)$ . График зависимости  $n_2 = f(S)$  при  $n_1 = \text{const}$  приведен на рис. 2.1.

Для случая идеального холостого хода ( $n_1 = n_2$ ),  $S=0$ . При неподвижном роторе  $S=1$ . Для режима двигателя  $0 < S < 1$ . При  $S < 0$  наступает режим генератора, а при  $S > 1$  - режим электромагнитного тормоза.

### 2.1.1. Электродвижущие силы и основные уравнения асинхронного двигателя

Основной поток асинхронного двигателя при вращении пересекает обмотку статора с частотой  $n_1$  и обмотку ротора с частотой  $n_3 = n_1 - n_2$  и наводит в них ЭДС.

$$E_1 = 4,44 f_1 W_1 K_1 \Phi; \quad (2.1)$$

$$E_2 = 4,44 f_2 W_2 K_2 \Phi,$$

где  $W_1 K_1$  и  $W_2 K_2$  - произведения числа витков на обмоточные коэффициенты обмоток статора и ротора. Частота  $f_2$  может быть определена следующим образом:

$$f_2 = \frac{p n_3}{60} = \frac{p(n_1 - n_2)}{60} \cdot \frac{n_1}{n_1} = \frac{p n_1}{60} \cdot \frac{n_1 - n_2}{n_1} = f_1 \cdot S. \quad (2.2)$$

Из этого выражения следует, что частота  $f_2$  ЭДС -  $E_{2S}$  ротора зависит от скольжения, т.е. от частоты вращения ротора  $n_2$ . Она равна частоте сети  $f_2 = f_1$  при неподвижном роторе, когда  $n_2 = 0$  и  $S = 1$ , и нулю ( $f_2 = 0$ ) при идеальном холостом ходе, когда  $n_2 = n_1$ ,  $S=0$ .

Кроме основного магнитного потока при работе двигателя возникают потоки рассеяния статора и ротора, которые наводят ЭДС рассеяния статора -  $E_{\sigma_1}$  и ротора -  $E_{\sigma_2}$ , которые могут быть выражены через токи : статора -  $I_1$  и ротора -  $I_2$  и индуктивные сопротивления потоков рассеяния:

$$\dot{E}_{\sigma_1} = -j \dot{I}_1 X_1 ;$$

$$\dot{E}_{\sigma_{2S}} = -j \dot{I}_1 X_{2S} ,$$

где  $X_1 = 2 \pi f_1 L_{\sigma_1}$  и  $X_{2S} = 2 \pi f_2 L_{\sigma_2}$  - индуктивные сопротивления рассеяния статора и ротора. Так как  $f_2 = f_1 \cdot S$ , то  $X_{2S} = 2 \pi f_1 L_{\sigma_2} \cdot S = X_2 \cdot S$ . Это значит, что индуктивное сопротивление рассеяния ротора  $X_{2S}$  при любом скольжении равно индуктивному сопротивлению неподвижной обмотки ротора  $X_2$ , умноженному на скольжение  $S$ .

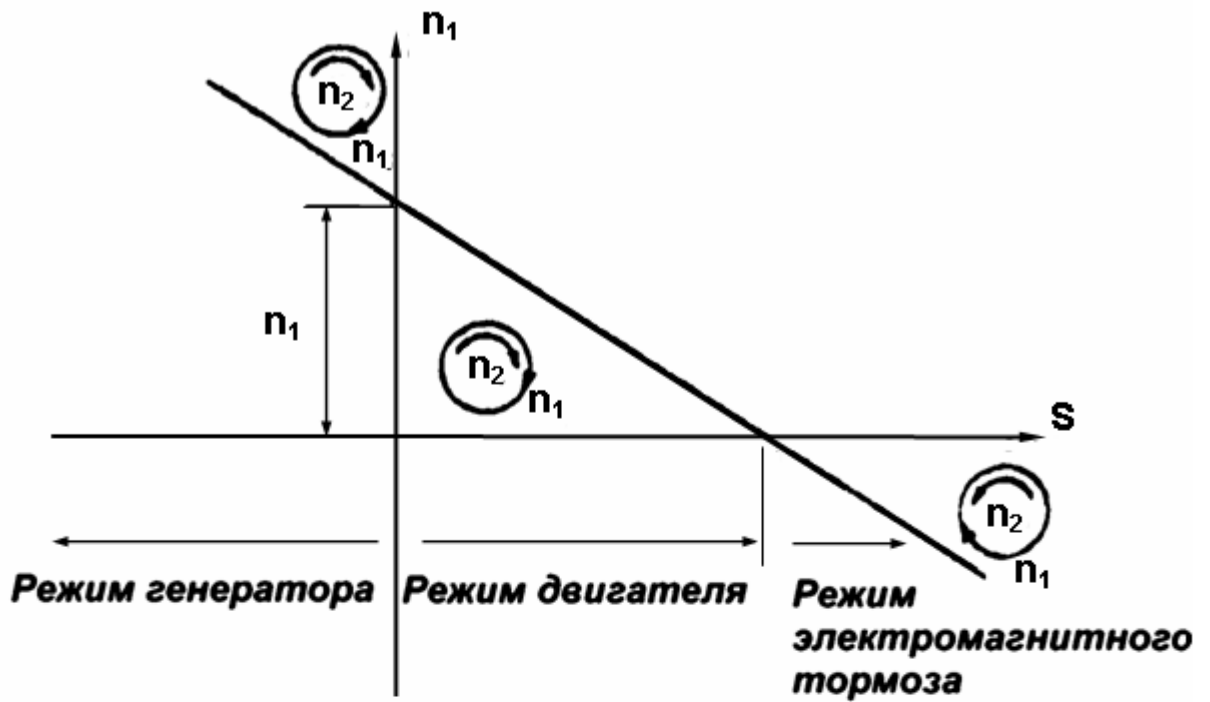


Рис. 2.1. График зависимости частоты вращения ротора от скольжения

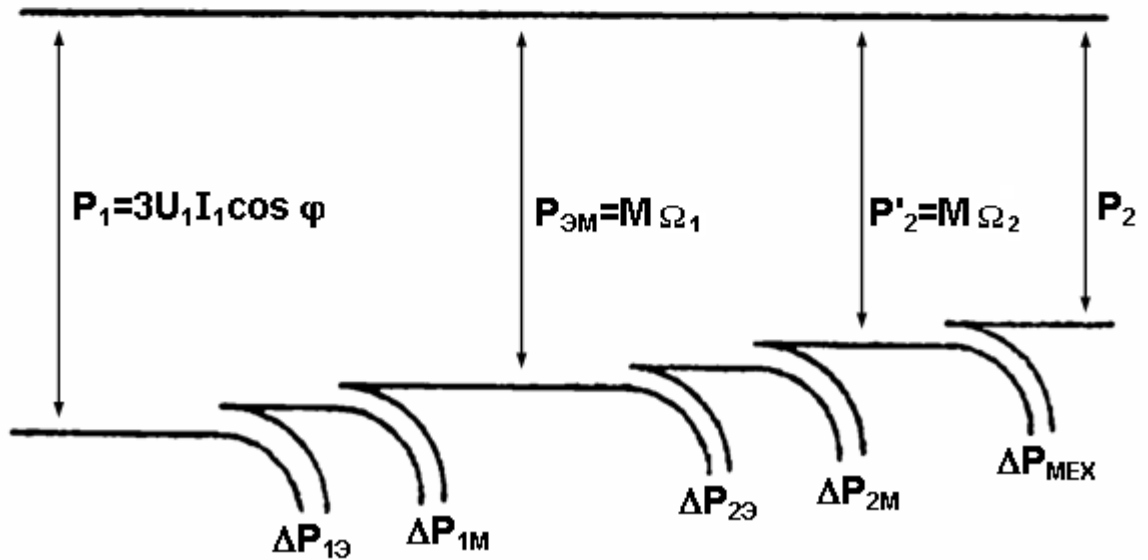


Рис. 2.2. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

Напряжение  $\dot{U}_1$  приложенное к фазе статора уравнивается: ЭДС  $\dot{E}_1$ , ЭДС рассеяния  $\dot{E}_{\sigma 1}$  и падением напряжения на активном сопротивлении обмотки статора  $\dot{I}_1 r_1$ :

$$\dot{U}_1 = (-\dot{E}_1) + (-\dot{E}_{\sigma 1}) + \dot{I}_1 r_1 = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_1 X_1 + \dot{I}_1 r_1 \quad (2.3)$$

ЭДС  $E_{2S}$  и  $E_{\sigma 2S}$  наведенные потоками  $\Phi_2$  и  $\Phi_{2\sigma}$  в обмотке ротора уравниваются падением напряжения на активном сопротивлении ротора  $\dot{I}_2 r_2$ :

$$\dot{E}_{2S} + \dot{E}_{\sigma 2S} = \dot{I}_2 r_2 \text{ или } \dot{E}_{2S} = j\dot{I}_2 X_{2S} + \dot{I}_2 r_2.$$

С учетом того, что  $E_{2S} = E_2 S$  и  $X_{2S} = X_2 S$ , разделив последнее выражение на  $S$ , получим:

$$\dot{E}_2 = j\dot{I}_2 X_2 + \dot{I}_2 \frac{r_2}{S}. \quad (2.4)$$

В этом уравнении ЭДС  $E_2$  и сопротивление  $X_2$  не зависят от скольжения. Они представляют собой ЭДС и индуктивное сопротивление рассеяния при неподвижном роторе. Таким образом, вращающийся ротор можно привести к неподвижному - с постоянной  $\dot{E}_2$ , если вместо сопротивления  $X_{2S}$  включить сопротивление  $X_2$ , а вместо сопротивления  $r_2$  включить  $\frac{r_2}{S} = r_2 + r_2 \frac{1-S}{S}$ .

Намагничивающие силы полей статора и ротора, складываясь, образуют МДС основного (рабочего) поля асинхронного двигателя, которая при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной остается практически неизменной, равной МДС холостого хода:

$$\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{F}_0 \quad (2.5)$$

Разделив обе части равенства на  $m_1 k_1 W_1$ , получим уравнение токов асинхронного двигателя

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_0$$

где  $\dot{I}'_2 = \dot{I}_2 \frac{m_2 W_2 K_2}{m_1 W_1 K_1} = \dot{I}_2 / K$  - ток ротора, приведенный к числу витков

( $W_1$ ) и фаз ( $m_1$ ) обмотки статора, ( $m_2$  - число фаз ротора,  $W_2$  - число витков

фазы ротора). Здесь  $K = \frac{m_2 W_2 K_2}{m_1 W_1 K_1}$  коэффициент приведения. ЭДС и сопротивление ротора двигателя, как и в трансформаторе, приводятся к числу витков и фаз первичной обмотки - обмотки статора:

$$\begin{aligned} \dot{E}'_2 &= K \dot{E}_2; \\ r'_2 &= K^2 r_2; \\ X'_2 &= K^2 X_2. \end{aligned} \quad (2.6)$$

В этом случае уравнения асинхронного двигателя:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j\dot{I}_1 X_1; \\ \dot{E}'_2 = \dot{I}'_2 r'_2 + j\dot{I}'_2 X'_2 + \dot{I}'_2 r'_2 \cdot \frac{1-S}{S}; \\ \dot{I}_1 = I_0 + (-\dot{I}'_2). \end{cases} \quad (2.7)$$

Эти уравнения практически аналогичны уравнениям трансформатора, нагруженного сопротивлением  $r'_2 \cdot \frac{1-S}{S}$ . Потери в этом сопротивлении равны полной механической мощности двигателя

$$P_2 = m_1 I_2'^2 r_2 \frac{1-S}{S}.$$

Уравнениям (2.7) соответствует схема замещения (рис. 2.3).

### 2.1.2. Механическая мощность двигателя

Из сети к статору трехфазной асинхронной машины подводится электрическая мощность  $P_1 = 3U_1 I_1 \cos \varphi_1$ . Потребляемая двигателем электрическая энергия преобразуется в механическую энергию вращательного движения. При этом часть энергии расходуется на электрические, магнитные и механические потери. Процесс преобразования электрической энергии в полезную механическую энергию описывается уравнением баланса активной мощности

$$P_1 = 3U_1 I_1 \cos \varphi_1 = \Delta P_{1\varnothing} + \Delta P_{1M} + \Delta P_{2\varnothing} + \Delta P_{2M} + P'_2,$$

где  $\Delta P_{1\varnothing} = 3 r_1 I_1^2$ ,  $\Delta P_{2\varnothing} = m r_2 I_2'^2$  - электрические потери в обмотках статора и ротора;  $\Delta P_{1M}$  и  $\Delta P_{2M}$  - магнитные потери в стали соответственно статора и ротора;  $P'_2$  полная механическая мощность, двигателя. Вращение

ротора осуществляется за счет электромагнитной мощности  $P_{эм} = M\Omega_1$ , которая передается от статора к ротору вращающимся магнитным полем. Полная механическая мощность развиваемая ротором  $P'_2 = M\Omega_2$ , меньше электромагнитной  $P_{эм}$ , т.к. часть электромагнитной мощности идет на покрытие электрических потерь в обмотке ротора  $\Omega_1 = \frac{pn_1}{60}$ ,  $\Omega_2 = \frac{pn_2}{60}$ . Полезная механическая мощность на валу двигателя  $P_2$  меньше полной механической мощности  $P'_2$  на величину механических потерь на трение  $P_2 = P'_2 - \Delta P_{мех}$ . Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя приведена на рис. 2.2.

### 2.1.3. Электромагнитный момент асинхронного двигателя

Если пренебречь потерями в стали ротора, т.к. они малы из-за малой частоты  $f_2 = f_1 S$ , то можно записать;

$$P_{эм} - P'_2 = \Delta P_{2э} = m_2 I_2^2 r_2 = m_1 I_2'^2 r_2'.$$

С другой стороны

$$P_{эм} - P'_2 = M \Omega_1 - M \Omega_2 = \frac{\Omega_1 - \Omega_2}{\Omega_1} \cdot \Omega_1 \cdot M = S \cdot P_{эм} \quad , \quad \Omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p}$$

следовательно

$$M \Omega_1 S = m_1 I_2'^2 r_2' ,$$

$$\text{тогда } M = \frac{m_1 I_2'^2 r_2'}{\Omega_1 S} . \quad (2.8)$$

Если значение тока  $I_2'$ , которое можно получить на основании схемы замещения двигателя, подставить в последнее выражение, то получим зависимость электромагнитного момента от параметров двигателя:

$$M = \frac{p m_1 U_1^2 \frac{r_2'}{S}}{\Omega_1 S \left[ \left( r_1 + C_1 \frac{r_2'}{S} \right)^2 + (X_1 + C_1 X_2')^2 \right]} . \quad (2.9)$$

Значение коэффициента  $C_1$  близко к единице. Так как параметры  $r_1$ ,  $r_2'$ ,  $X_1$ ,  $X_2'$  двигателя при его работе остаются практически постоянными, так же как и синхронная частота  $\Omega_1$ , то величина электромагнитного (вращающего) момента  $M$  зависит от напряжения сети  $U_1$  и скольжения  $S$ . Так как скольжение  $S$  однозначно связано с  $n_2$ , то зависимость  $M = f(S)$  при постоянном напряжении  $U_1$  является механической характеристикой асинхронного двигателя. Механическая характеристика иногда выражается как  $n_2 = f(M)$  при  $U_1 = \text{const}$ . Различные виды механических характеристик представлены на рис. 2.4.

При определенном (критическом) скольжении  $S_K$  момент двигателя достигает максимума. Продифференцировав выражение момента (2.9) по скольжению и приравняв производную нулю, найдем соответствующее  $M_{\max}$  скольжение:

$$S_K = \frac{C_1 r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2}}$$

или, пренебрегая  $r_1$ , которое обычно мало, получим :

$$S_K = \frac{C_1 r_2'}{x_1 + c_1 x_2'}$$

Величина критического скольжения  $S_K$  прямо пропорциональна активному сопротивлению  $r_2$ . Это значит, что при увеличении  $r_2$  кривая  $M = f(S)$  смещается в сторону больших скольжений (рис. 2.5). При этом будет увеличиваться начальный пусковой момент  $M_n$ . Начальный пусковой момент  $M_n$  характеризует пусковые свойства асинхронного двигателя. Чем больше пусковой момент, меньше пусковой ток, тем лучше пусковые свойства двигателя.

#### 2.1.4. Рабочие характеристики

Для выявления свойств двигателя служат рабочие характеристики  $n_2$ ,  $M$ ,  $I_1$ ,  $\cos \varphi_1 = f(P_2)$ . Эти характеристики снимаются при номинальных значениях частоты сети  $f_{1H}$ , напряжении на зажимах статора  $U_{1H}$ . На рис. 2.6 представлены рабочие характеристики асинхронного двигателя.

Скоростная характеристика двигателя  $n_2 = f(P_2)$  представляет собой кривую слабо наклоненную, к оси абсцисс. Так как  $P_2 \approx P_2'$ , а  $P_2' = M \Omega_2$ , то скоростная характеристика мало отличается по форме от механической характеристики.

Зависимость  $M = f(P_2)$  криволинейная, так как с ростом нагрузки  $P_2$  частота  $\omega_2$  несколько уменьшается.

Зависимость  $I_1 = f(P_2)$  представляет график, близкий к прямой. Это свидетельствует о том, что с возрастанием нагрузки ток  $I$  увеличивается практически пропорционально полезной мощности. Этот график не выходит из начала координат, так как двигатель в режиме холостого хода ( $P_2=0$ ) потребляет из сети ток холостого хода  $I_0$ .



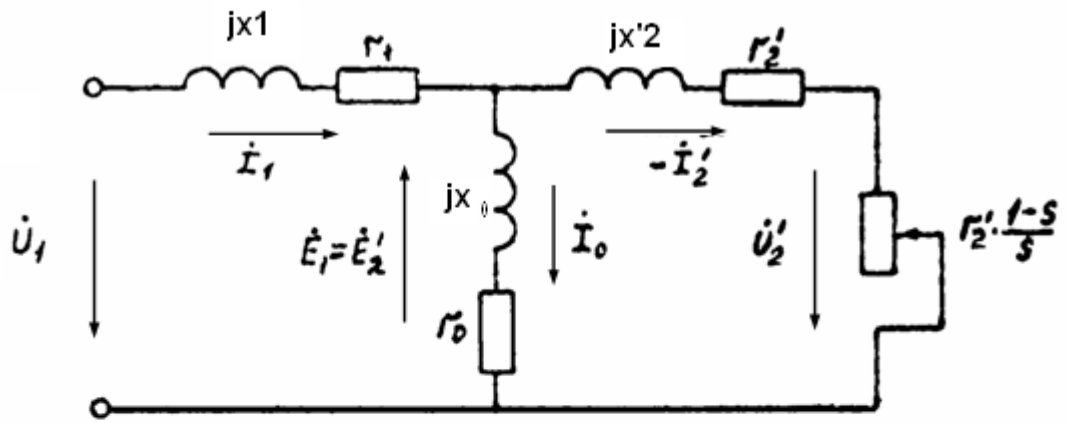


Рис. 2.3. Схема замещения асинхронного двигателя

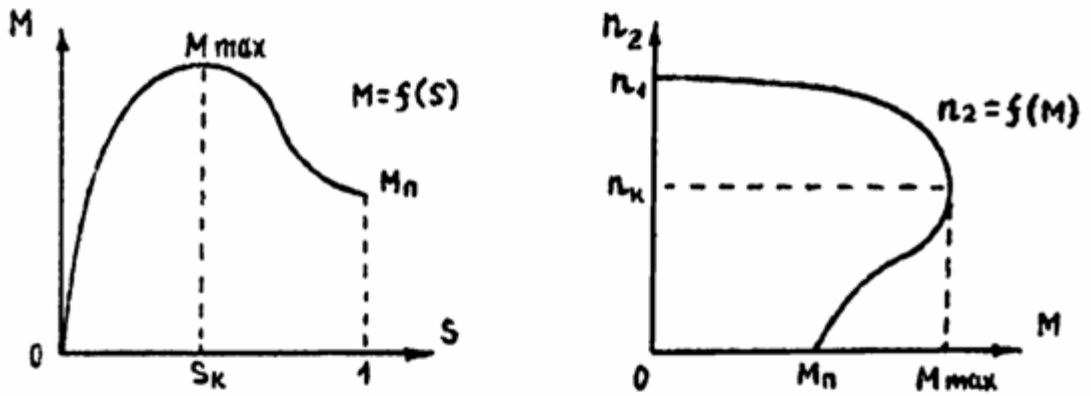


Рис. 2.4. Механические характеристики асинхронного двигателя

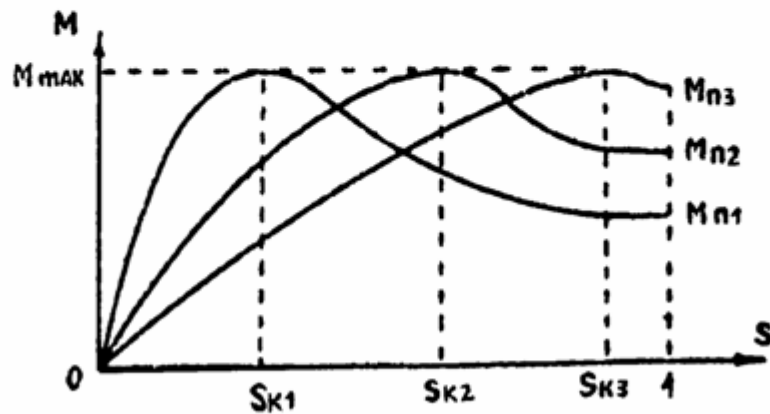


Рис. 2.5. Графики  $M = f(s)$  для разных значений активного сопротивления в цепи ротора

Зависимость  $\cos\varphi_1$  от полезной мощности  $P_2$  показывает, что при небольших нагрузках  $\cos\varphi_1$  имеет низкие значения. Затем с увеличением нагрузки коэффициент мощности увеличивается, достигая максимума при нагрузке, близкой к номинальной. Такая зависимость объясняется тем, что двигатель потребляет из сети намагничивающий (реактивный) ток. С возрастанием нагрузки увеличивается активная составляющая тока  $I_1$  и коэффициент мощности повышается. При нагрузках  $\cos\varphi_1$  уменьшается вследствие увеличения индуктивного сопротивления обмотки ротора ( $X_{2S} = X_2S$ ) при увеличении скольжения.

## 2.2. Программа работы

- 1) Ознакомиться с устройством, принципом действия и основными характеристиками асинхронного двигателя.
- 2) Экспериментально определить начало и концы фазных обмоток статора.
- 3) Исследовать пуск двигателя переключением схемы соединения обмоток статора со звезды на треугольник.
- 4) Снять характеристику холостого хода.
- 5) Снять рабочие характеристики двигателя.

## 2.3. Электрические схемы установки и порядок выполнения работы

Ознакомьтесь с устройством асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, макет которого представлен в лаборатории. Запишите номинальные данные исследуемого агрегата.

### 2.3.1. Определение начала и концов фазных обмоток статора

Выводные клеммы подсоединения обмоток фаз статора, как правило, маркируются следующим образом; зажимы, к которым подключены начала обмоток,  $C_1, C_2, C_3$ . Зажимы, к которым подключены концы обмоток, соответственно  $C_4, C_5, C_6$ . При отсутствии такой маркировки можно опытным путем определить начало и концы обмоток фаз.

Для этого:

соберите схему в соответствии с рис. 2.7;

соедините последовательно две обмотки, обозначив произвольно их начала и концы соответственно  $C_1$  и  $C_4, C_2$  и  $C_5$ ;

параллельно третьей обмотке подключите вольтметр с пределом измерения 0-30 В;

установите реостат  $R_d$  на максимальное сопротивление и подключите выключателем  $Q$  схему к источнику питания;

плавно уменьшая сопротивление реостата, наблюдайте за показаниями вольтметра.

Наличие показаний вольтметра указывает, что конец первой обмотки соединен с началом второй. Отсутствие показаний вольтметра указывает, что концы обеих обмоток соединены между собой.

Для маркировки третьей обмотки следует в схеме вместо первой обмотки подключить третью и повторить опыт.

### 2.3.2. Определение сопротивления фаз обмотки статора

Омическое сопротивление фазы обмотки статора  $r_{10}$  определяется методом амперметра и вольтметра при включении обмоток в цепь постоянного тока. При этом ток должен быть равным номинальному.

Для вычисления активного сопротивления на переменном токе используется соотношение  $r_{1a} = k_{\Pi} r_{10}$ , в котором  $k_{\Pi}$  - коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления за счет поверхностного эффекта в проводниках обмоток при протекании по ним переменного тока. Его значение при частоте 50 Гц принимается равным  $k_{\Pi} = 1,1$ .

Активное сопротивление статорных обмоток приводится к рабочей температуре расчетом по формуле

$$r_1 = r_{10} [1 + 0,0038(t_p - t_0)],$$

где  $(t_p - t_0)^{\circ}\text{C}$  - температура перегрева машины,

$r_{10}$  - активное сопротивление обмотки при температуре окружающей среды  $t_0^{\circ}\text{C}$ . В работе принять  $t_0 = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $t_p = 60^{\circ}\text{C}$ . Данные замеров и подсчетов заносятся в табл. 2.1.

Таблица 2.1

№№ п/п	Измерено			Вычислено		
	U, В	I, А	$t_0, ^{\circ}\text{C}$	$r_{10}, \text{Ом}$	$r_{1a}, \text{Ом}$	$r_1, \text{Ом}$

### 2.3.3. Пуск двигателя с переключением обмоток фаз со звезды на треугольник

Одним из способов ограничения пусковых токов асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором является переключение схемы соединения обмоток фаз статора со звезды (пуск) на треугольник (работа). При этом следует помнить, что включение звездой фазных обмоток, рассчитанных на линейные напряжения сети, приводят к снижению напряжения на фазах в  $\sqrt{3}$  раза, что сопровождается уменьшением пускового момента двигателя в три раза ( $M \approx U^2$ ). Обозначив сопротивление фазы двигателя в режиме короткого замыкания (ротор неподвижен) через  $Z_K$  определим линейные токи:

$$I_{ЛY} = I_{\Phi} = \frac{U_{\Phi}}{Z_K} = \frac{U_{Л}}{\sqrt{3} Z_K} \text{ -- при соединении фаз звездой ;}$$

$$\text{при соединении фаз треугольником } I_{Л\Delta} = \sqrt{3} I_{\Phi} = \sqrt{3} \frac{U_{Л}}{Z_K}.$$

Отношение  $\frac{I_{Л\Delta}}{I_{ЛY}} = 3$ , т.е. пусковой ток при соединении обмоток статора

звездой уменьшается в три раза.

Для проведения эксперимента соберите схему в соответствии с рис. 2.8. Получив разрешение преподавателя на выполнение опыта, возвратите схему в исходное состояние:  $Q_1$  и  $Q_2$  - выключено,  $Q_3$  - нейтрально. Подключите схему к источнику питания выключателем  $Q_1$  и отрегулируйте напряжение источника, установить его равным номинальному фазному напряжению двигателя (замер напряжения выполните переносным вольтметром на клеммах " $\Delta$ " переключателя  $Q_3$ ).

Установите  $Q_3$  в положение " $Y$ ", а после разгона двигателя (прекращения переходного процесса) измерьте напряжения на фазах двигателя и снимите показания остальных приборов.

Результаты запишите в табл. 2.2. Установите  $Q_3$  в положение " $\Delta$ " и после разгона двигателя выполните измерения и запись приборов аналогично предыдущему пункту. Сравните полученные результаты измерения. Рассчитайте параметры, указанные в графах "Вычислено" (табл. 2.2).

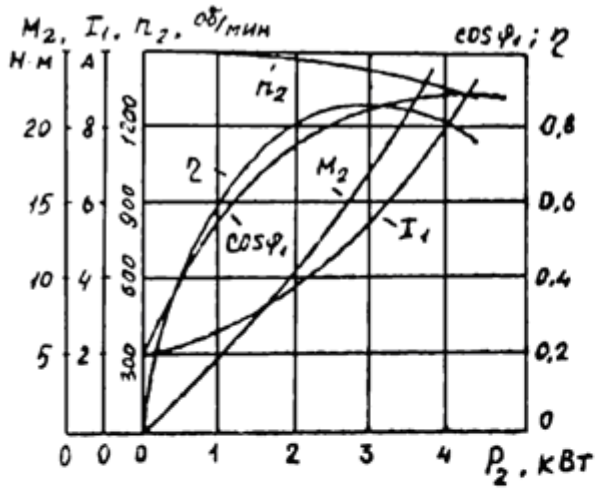


Рис. 2.6. Рабочие характеристики

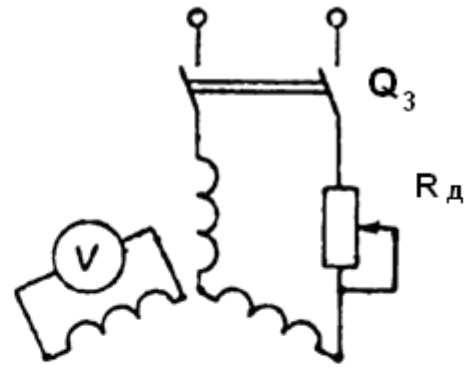


Рис. 2.7. Метод определения начал и концов обмоток фаз

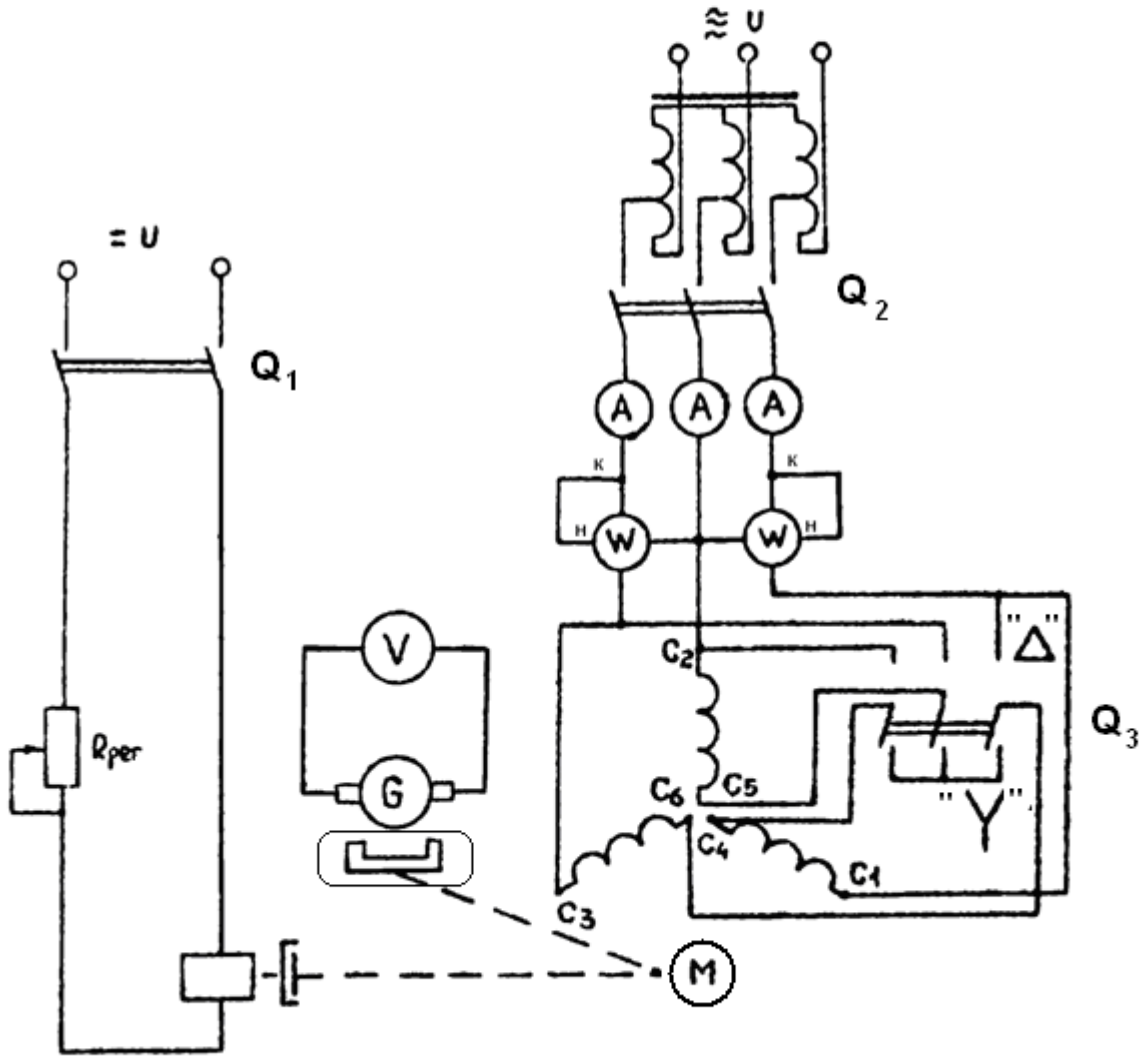


Рис. 2.8. Электрическая схема установки



За расчетное линейное значение тока и напряжения холостого хода принимаются их средние значения:

$$I_0 = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3}; \quad U_0 = \frac{U_{12} + U_{23} + U_{31}}{3}.$$

Мощность, потребляемая двигателем при холостом ходе,

$$P_0 = \sqrt{3} U_0 I_0 \cos \varphi_0 \text{ или } P_0 = \Delta P_c + \Delta P_{\text{мех}} + 3I_{0\phi}^2 r_1 = P'_0 + 3I_{0\phi}^2 r_1,$$

где  $P'_0 = \Delta P_c - \Delta P_{\text{мех}}$  – постоянные потери;

$$\Delta P_{\text{эл}} = 3I_{0\phi}^2 r_1 - \text{электрические потери в обмотке статора.}$$

$I_{\text{сф}}$  - фазный ток холостого хода.

Из опыта холостого хода:

$$P'_0 = P_0 - 3I_{0\phi}^2 r_1;$$

$\Delta P_c$  и  $\Delta P_{\text{мех}}$  – находятся из графика  $P'_0 = f(U^2)$  рис. 2.9. Механические потери при  $n_2 = \text{const}$  практически не изменяется. Потери в стали пропорциональны квадрату индукции, и соответственно, квадрату приложенного напряжения. Следовательно между потерями существует линейная зависимость:

$$P'_0 = \Delta P_{\text{мх}} + \Delta P_{\text{ст}} = K_1 + K_2 U_0^2.$$

Графический способ разделения потерь холостого хода показан на рис. 2.9.

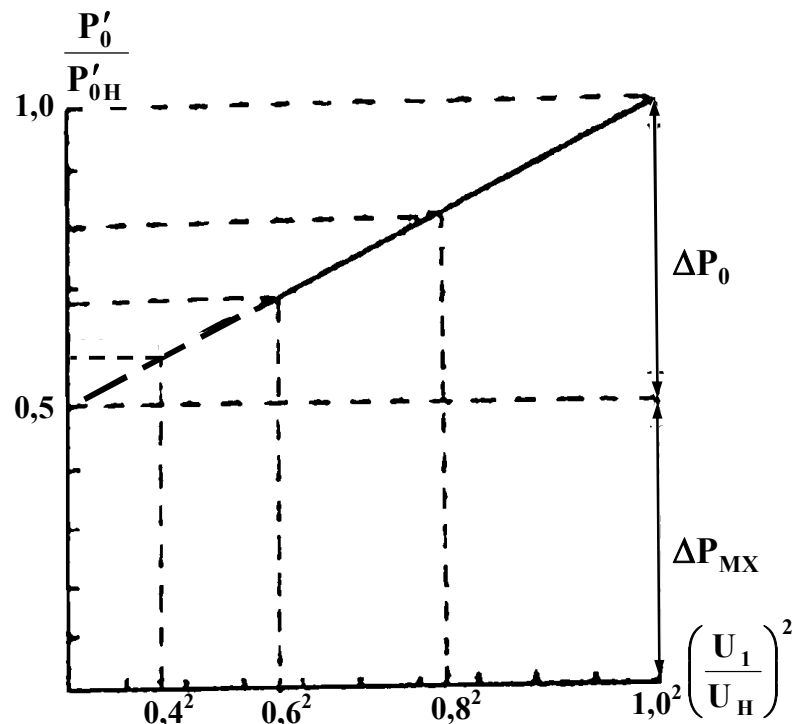


Рис. 2.9. График разделения потерь холостого хода  
Коэффициент мощности определяется по формуле:

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3}U_0I_0}$$

$P'_{0н}$  - потери холостого хода при  $U_n$ .

### 2.3.5. Снятие рабочих характеристик двигателя

Работа выполняется на двигателе с установившейся температурой (проработавшем 10-15 мин. до начала опыта, с нагрузкой 0,75-0,85 номинальной).

Для выполнения работы соберите схему в соответствии с рис. 2.8. Получив разрешение преподавателя на выполнение опыта, возвратите схему в исходное положение:  $Q_1, Q_2$  – выключено,  $Q_3$  – нейтрально, реостат  $R_{рег}$  – минимальное напряжение на муфте. Установите напряжение источника  $U_1=U_{ном}$  фазы двигателя. Включите питание схемы и выполните пуск двигателя, установив  $Q_1$  вначале в положение  $Y$ , а затем  $\Delta$ . Включите питание муфты выключателем  $Q_2$ . Изменяя напряжение на муфте с помощью  $R_{рег}$  установите момент на валу двигателя, при котором ток нагрузки  $I_1 = (1,1+1,2) I_{1н}$ . Снимите и запишите в табл. 2.4 показания приборов  $I_1, I_2, I_3, P', P'', U_{12}, U_{23}, U_{31}, n$ . Постепенно уменьшая момент на валу вплоть до холостого хода двигателя, снимите и запишите в табл. 2.4 6-8 показания приборов на этом диапазоне изменения момента. Отключите питание муфты, выключите двигатель. С разрешения преподавателя разберите электрическую схему установки. По полученным данным рассчитайте параметры, указанные в графах "Вычислено", (табл. 2.4). Постройте рабочие характеристики  $S, I, \cos \varphi_1, \eta, M = f(S)$  и механическую характеристику  $M_2=f(S)$ .

Таблица 2.4

№ замер- ра	Измерено									
	$U_{12}, В$	$U_{23}, В$	$U_{31}, В$	$I_{A1}, А$	$I_{A2}, А$	$I_{A3}, А$	$P', Вт$	$P'', Вт$	$M, Нм$	$n_2, об/мин$
Вычислено										
$\Omega_p$ 1/с	$P_0 = P' \pm P'', Вт$	$U_1, В$	$I_1, А$	$\cos \varphi_0$	$\Delta P_{\Sigma 1}, Вт$	$\Delta P_{\Sigma 2}, Вт$	$\Sigma \Delta P, Вт$	$P_2, Вт$	$S, \%$	$\eta, \%$

Линейное напряжение и ток определяются:



$$U_1 = \frac{U_{21} + U_{23} + U_{31}}{3}, \quad I_1 = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3};$$

$$\text{Коэффициент мощности } \cos\varphi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3}U_1I_1}.$$

$$\text{Скольжение } S = \frac{\Omega_1 - \Omega_2}{\Omega_1} \text{ или } S\% = \frac{\Omega_n - \Omega_p}{\Omega_n} 100.$$

Потребляемая двигателем мощность  $P_1 = P' \pm P''$ . Полезная мощность  $P_2 = P_1 - \sum \Delta P$ , где  $\sum \Delta P = P'_0 + \Delta P_{\text{э}1} + \Delta P_{\text{э}2}$  – сумма всех потерь. Потери холостого хода  $P'_0 = \Delta P_c + \Delta P_{\text{мх}}$ .

Электрические потери статора  $\Delta P_{\text{э}1} = 3I_1^2 r_1$  и ротора  $\Delta P_{\text{э}2} = S P_{\text{эм}}$ , где электромагнитная мощность  $P_{\text{эм}} = P_1 - (\Delta P_{\text{э}1} + \Delta P_c)$ . Полезный момент  $M_2 = \frac{P_2}{\Omega_2}$ ,

где  $\Omega_2 = \frac{2\pi n_2}{60} = \frac{\Omega_1}{p}(1-S)$ , где  $n_2$  – частота вращения ротора, об/мин,  $\omega_1 = 2\pi f_1$  – угловая частота тока статора;  $p$  – число пар полюсов статора, к.п.д. машины:

$$\eta\% = \frac{P_2}{P_1} 100\%$$

## 2.4. Содержание отчета

- 1) Номинальные данные асинхронного двигателя.
- 2) Электрическая схема установки (рис. 2.8).
- 3) Таблицы с результатами измерений и вычислений.
- 4) Характеристики холостого хода и рабочие характеристики, механические характеристики.
- 5) Выводы по работе.

## 2.5. Контрольные вопросы

- 1) Поясните устройство и принцип действия асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.
- 2) Назовите режимы работы двигателя и поясните условия их получения.
- 3) Напишите выражения для определения момента вращения и скольжения.
- 4) В каких пределах может изменяться частота тока ротора асинхронного двигателя?
- 5) Как определить по паспортным данным двигателя потребляемую им из сети полную и активную электрическую мощности?
- 6) Как изменить направление вращения ротора двигателя?

- 7) Как изменится момент двигателя, если при неизменном напряжении питающей сети переключить схему соединения обмоток фаз статора с  $\Delta$  на  $Y$  ?
- 8) Как создать режим короткого замыкания асинхронного двигателя?
- 9) Как изменяется частота вращения асинхронного двигателя с увеличением нагрузки и почему?
- 10) Может ли асинхронная машина работать при скольжении  $S = 0$ ?
- 11) Будет ли работать испытуемый двигатель, если при его вращении оборвать одну из фаз?
- 12) Каков диапазон изменения скольжения асинхронного двигателя?
- 13) Объясните конструкцию короткозамкнутого ротора.
- 14) Трехфазный асинхронный двигатель предназначен для работы при напряжении сети 220/380 В. Как следует соединить обмотку статора при напряжении сети 220 В и как - при напряжении 380 В?
- 15) Чем обусловлены индуктивные сопротивления рассеяния обмотки статора и ротора асинхронного двигателя?
- 16) В чем сходство и различия между асинхронным двигателем и трансформатором?
- 17) Почему с увеличением нагрузки на вал асинхронного двигателя возрастает потребляемая из сети мощность?
- 18) Какие виды потерь имеют место в асинхронном двигателе?
- 19) Почему график  $I_1 = f(P_2)$  не выходит из начала координат?
- 20) Каковы недостатки асинхронных двигателей?
- 21) Поясните физический смысл каждого параметра схемы замещения асинхронного двигателя.
- 22) Какие существуют способы регулирования частоты вращения асинхронных двигателей?
- 23) От чего зависит величина критического скольжения?
- 24) Почему при небольших нагрузках коэффициент мощности имеет низкие значения?
- 25) За счет чего можно повысить пусковой момент асинхронного двигателя?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 ИЗУЧЕНИЕ КОММУТАЦИОННОЙ И ЗАЩИТНОЙ АППАРАТУРЫ

### Цель работы

Целью работы является изучение принципа действия, конструкции и электрических схем коммутационной и защитной аппаратуры самолетных систем; снятие ампер-секундных характеристик аппаратов максимальной токовой защиты, вольт-секундной характеристики автомата защиты от перенапряжения, измерение параметров срабатывания дифференциально-минимального реле.

### 1. Основные положения

Согласно ГОСТ 17703 - 72 коммутационными называются электрические аппараты, предназначенные для коммутации электрической цепи и проведения тока, т. е. для переключения и отключений цепей, находящихся под напряжением. По указанному стандарту к коммутационным аппаратам относятся выключатели, предохранители, предохранители-выключатели (автоматы защиты), электромагнитные реле и контакторы. По способу приведения в действие коммутационная аппаратура делится на две группы: прямого и дистанционного действия.

*Аппаратура прямого действия* - кнопки, выключатели, переключатели, путевые выключатели - предназначена для управления в цепях небольшой мощности токами до 35 А. Переключение в аппаратах прямого действия происходит практически мгновенно (в течение 0,01 с) независимо от перемещения органов управления за счет использования упругости пружинных передач. Это позволяет уменьшить искрение между контактами, размеры контактов, получить аппараты малых габаритов и массы.

Кнопки (кнопочные выключатели) являются простейшими коммутационными аппаратами, приводимыми в действие нажатием или вытягиванием детали, передающей усилие оператора, и служащими для кратковременного включения и отключения электрических цепей.

Кнопки серии **КН** (в пыле- и влагозащищенном исполнении) выпускаются однополюсные нормально-разомкнутые (**КНР**) и нормально-замкнутые (**КНЗ**), а также двухполюсные (**2КНР** и **2КНЗ** соответственно)

На рис 3.1 показана однополюсная нормально-разомкнутая кнопка **КНР**, состоящая из пластмассового корпуса 2, в котором расположены неподвижные 4 и подвижные 12 контакты, пластины 1 и 3, изоляционные и уплотнительные детали (5, 6, 9).

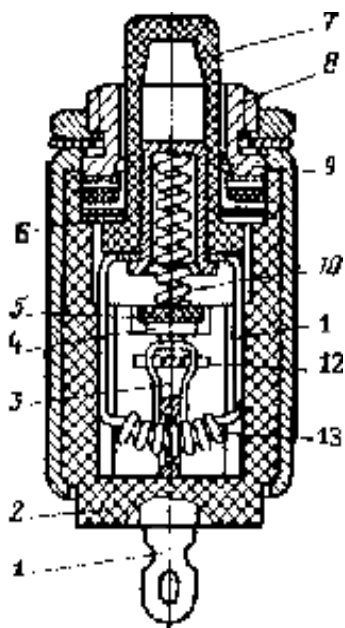
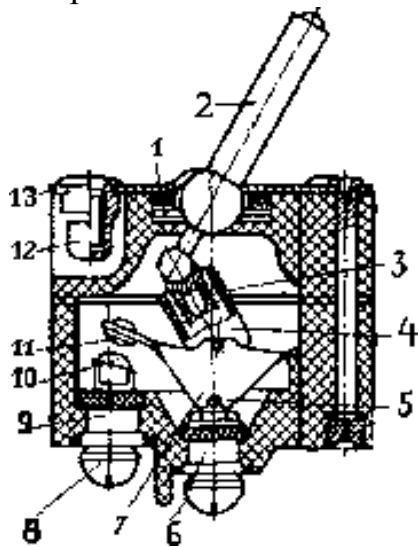


Рис 3.1

При нажатии на головку кнопки 7 вилка 11 перемещает вниз концы винтовой пружины 13. В момент изменения ее прогиба на обратный пластина 3 поднимается вверх, контакты замыкаются. При отпускании кнопки 7 возвратная пружина 10 поднимает вилку 11, контакты размыкаются. Для крепления кнопки служит гайка 8.

Выключатели и переключатели служат для замыкания и размыкания электрических цепей на длительное время.

Современные самолетные выключатели герметичны; переключение в них осуществляется по принципу "сламывающегося рычага". Наиболее распространены выключатели двух видов: серии **ВГ** для цепей постоянного тока напряжением до 30 В и серии **В-200** для цепей переменного тока напряжением до 220 В. Обе серии аналогичны по принципу действия. На рис.6.2 представлена конструкция выключателя **ВГ-15**. В его пластмассовый корпус 1 заформован зажим 9 с неподвижным контактом 10 и зажим 6 с осью 5, на которую насажена латунная качалка 7 с подвижным контактом 11. Нижний шарик ручки 2 через пластмассовый подпятник управляется пластмассовым стаканом 4.



Если повернуть ручку влево, стакан 4 повернется вправо. При этом пружина 3 сжимается. Как только ось стакана окажется по другую сторону вертикальной оси аппарата, пружина мгновенно расправляется и размыкает контакты.

Рис.3.2

Выключатели серии ВГ многообразны по схеме и способу переключения, числу управляемых цепей. Эти особенности отражены в маркировке аппаратов:

**В** - выключатель, **П** - переключатель, **Г** – герметичный.

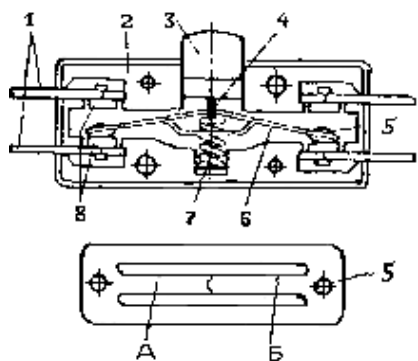


Рис.3.3

переключателей (**ПП-200, 2ПП-200, 3ПП-200**).

Далее: **Н** - нажимной, **П** - перекидной. Цифры 2 или 3 впереди букв указывают на число переключаемых цепей. Цифры в конце маркировки означают максимально допустимый ток. Например: **ВГ-15** - выключатель однополюсный герметичный на максимально допустимый ток 15 А; **2ППГ-45** - двухцепной переключатель перекидной герметичный на 45 А.

Герметичные выключатели переменного тока выпускаются в виде одно-, двух и трехполюсных выключателей (**В-200, 2В-200, 3В-200**) и таких же

путевые выключатели и переключатели изменяют свое состояние при заданных положениях перемещающихся относительно них подвижных частей

механизмов и предназначены для автоматической программной коммутации цепей. Их устанавливают в качестве конечных ограничителей положения механизмов, а также в цепях сигнализации и блокировки положения органов управления. Широкое применение нашли путевые микровыключатели серии Д (рис. 3.3). Микровыключатель имеет четыре неподвижных контакта 8, которые приклепаны к клеммам 1, вставленным в прорези пластмассового корпуса 2, и подвижную систему с двумя серебряными контактами 5, приклепанными к плоской бронзовой пружине 6, внутри которой выштампованы два лепестка А и Б. В их зазор вставляется штырь 4. В свободном состоянии кнопки 3 обеспечивается замыкание нижней пары контактов. При нажатии на кнопку лепестки А и Б прогибаются вниз. Когда они окажутся ниже плоскости пружины 6, последняя скачком прогибается в противоположную сторону, вызывая замыкание второй (верхней) пары контактов. При отпускании кнопки под воздействием возвратной пружины 7 контакты приходят в исходное положение. Благодаря двум местам разрыва тока уменьшается электрическая дуга, и микровыключатели этого типа имеют меньшие габариты.

Аппараты дистанционного действия - это электромагнитные устройства, с якорем которых связаны контакты. В зависимости от номинального значения коммутируемого тока различают контакторы с  $I_{ном} = (25...600)$  А и коммутационные реле с  $I_{ном} = (5...10)$  А.

Все коммутационные аппараты, предназначенные для управления цепями как постоянного, так и переменного тока, имеют обмотку, питающуюся постоянным током. Принцип действия реле и контакторов одинаков. На воздушных судах применяют контакторы серий **К**, **КМ**, **КП** - втяжного и клапанного типа длительного и кратковременного действия, а также малогабаритные контакторы и реле типов **ТКЕ**, **ТКД**, **ТКС**, **ТКТ**, **СПЕ** и др. Маркировка унифицированных коммутационных реле и контакторов отражает их назначение и конструкцию. 1-я буква показывает максимальное напряжение, на которое рассчитана обмотка: **Т** - тридцать, **С** - сто, **Д** - двести вольт, 2-я буква указывает назначение аппарата: **К** - коммутационное реле или контактор, **В** - реле времени, **Т** - токовое реле, **П** - обмотка включается на переменный ток, 3-я буква означает: **Е** - единицы, **Д** - десятки, **С** - сотни, **Т** - тысячи ампер коммутируемого тока, число которых показывает цифра, стоящая на четвертом месте (4-й знак); 5-й и 6-й знаки характеризуют кинематику аппарата: **О** - открытые контакты, **П** - переключаемые контакты. Следующие затем цифры означают число коммутируемых цепей. 7-й знак отражает режим работы аппарата: **Д** - длительный; **К** - кратковременный; **И** - импульсный. 8-й знак отражает особенности исполнения: **Т** - теплостойкое, **Г** - герметичное, **Д** - всеклиматическое. Например, **ТКЕ520ДГ** расшифровывается как аппарат, обмотка которого рассчитана на 30 В, а контакты - на 5 А. имеющий 2 включающих контакта, рассчитанный на длительный режим работы, исполнение герметичное.

Электрокинематическая схема контактора втяжного типа длительного

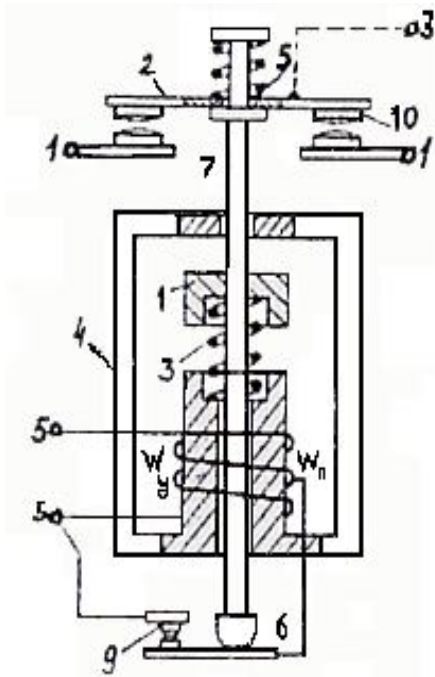


Рис.3.4

режима работы представлена на рис.3.4. Корпус 4 имеет форму стакана и является магнитопроводом. Обмотки ( $W_n$  - пусковая и  $W_y$  - удерживающая) соединяются последовательно и наматываются на гильзу из немагнитного материала, которая служит также направляющей для якоря 1.

После начала движения якоря связанный с ним шток 7 ( из немагнитной стали ) при помощи наконечника 6 размыкает контакты 9, включая таким образом обмотку  $W_y$ . Главные контакты 10 контакторов - мостикового типа с двумя разрывами тока. Возвратная 3 и буферная 5 пружины винтовые. Буферная пружина может быть ниже или выше контактной пластины 2. Электромагнитный узел у всех контакторов одинаков и рассчитан на включение в цепь постоянного тока 30 В. Узел коммутации имеет различную конструкцию в зависимости от назначения ( управление цепями постоянного тока до 30 В и переменного тока до 208 В трехфазного переменного тока ), числа управляемых цепей и схемы коммутации.

Контакторы делятся на включающие; однополюсные и трехполюсные.

Современные однополюсные контакторы серии ДОД рассчитаны на коммутацию постоянного и переменного тока ( 50, 100, 200, 400, 600 ) А; трехполюсные ДТ и ДОД - на токи (10, 20, 50, 100, 200, 400) А.

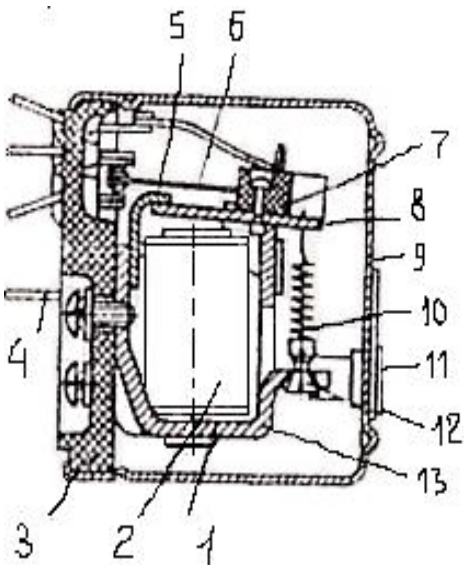


Рис.3.5

Коммутационные реле серии ТКЕ относятся к аппаратам поворотного типа. Электромагнит таких аппаратов Ш-образный ( рис.3.5 ) с обмоткой 2 на среднем стержне. К левому стержню привинчена пластмассовая панель 3 с заформованными пластинами. Их левые части служат клеммами 4 для припайки внешних проводов, правые - для неподвижных контактов, проводов обмотки и провода подвижного контакта. Последний изолируется от якоря 8 колодкой 7.

Якорь под действием возвратной пружины 10 отклоняется вверх до упора 5. Нижний конец пружины через регулировочный винт 12 прикреплен к остоу 13. Колпак 9 завальцовывается на панели и крепится к ней винтами. Развальцованные в нем гайки 11 служат для крепления реле.

Буферная пружина исключает появление "дребезга" контактов, т.е. отскакивания подвижных контактов от неподвижных в момент удара при их замыкании.

Наиболее совершенными электромагнитными коммутационными аппаратами являются реле **ТПЕ22ПОДГБ** и **СПЕ22ПОДГБ** ( рис. 3. 6 ) с двумя переключающими контактными группами, приводимыми в движение электромагнитом постоянного тока клапанного типа, обмотка которого включена в диагональ диодного блока по схеме двухполупериодного выпрямления.

В целях повышения надежности контактная система выполнена в виде отдельного герметичного модуля с размещением катушек вне этого модуля. Реле имеют одинаковую конструкцию и различаются обмоточными данными и диодными блоками.

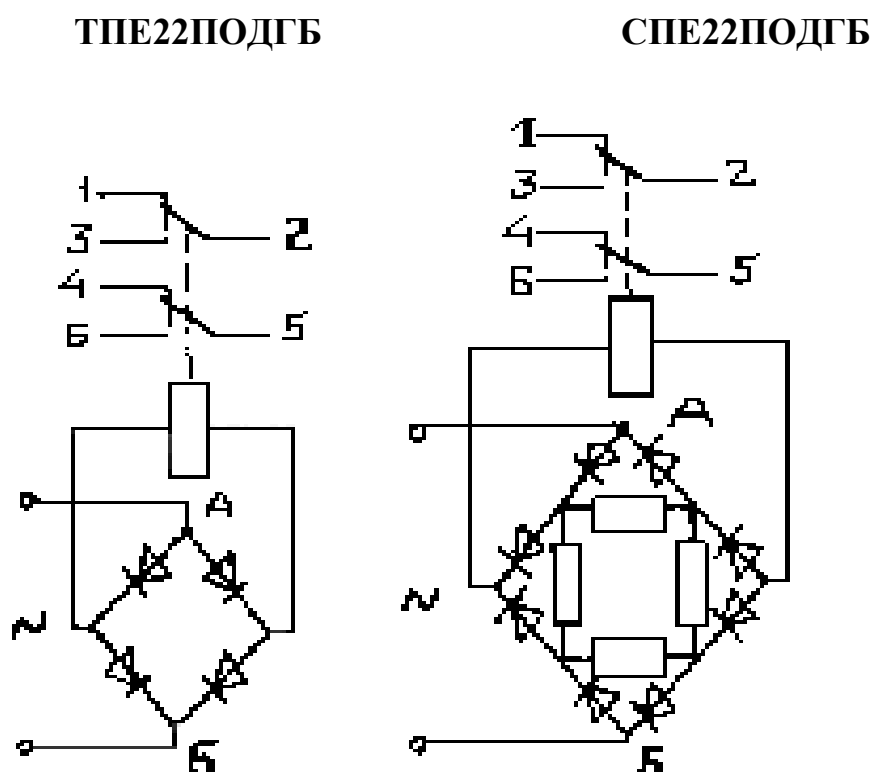


Рис.3.6

Контакты электромагнитных устройств, применяемых в авиации, изготавливаются из металлокерамики и серебра или его сплавов - материалов, не подвергающихся коррозии, обладающих высокой электро и теплопроводностью, достаточной износоустойчивостью и дугостойкостью. Для снижения износа контактов, работающих на больших высотах, весь аппарат или его контактный узел помещают в герметичную оболочку, внутри которой сохраняется давление, близкое к атмосферному (на уровне земли). При разрыве тока внутреннее давление повышается за счет температуры дуги. Это способствует ее гашению.

Коммутационная аппаратура, служащая для автоматического отключения источников и приемников электроэнергии и участков сети с целью предотвращения возможности их отказов и сохранения работоспособности всей остальной системы электроснабжения при возникновении в ней аварийных ситуаций, носит название защитной аппаратуры.

Под аварийными ситуациями понимаются недопустимые токовые перегрузки, недопустимые повышения и понижения напряжения. При их возникновении необходимо защищать генераторы, их фидеры, а также бортовые сети. Для защиты сетей от коротких замыканий широко применяются плавкие предохранители и тепловые автоматы защиты.

Плавкие предохранители - простейшие аппараты максимально-токовой защиты. В самолетном оборудовании применяют четыре типа предохранителей:

1) неинерционные типа **ПВ** и **СП**. Плавкая вставка изготавливается из медной и серебряной проволоки или цинковой пластинки;

2) тугоплавкие **ТП** - на токи от 200 А до 900 А. Плавкий элемент - медная пластинка особого профиля с участком ослабленного сечения - заключена в асбоцементную камеру;

3) инерционные **ИП**. Чувствительный элемент - образованный пайкой узел из плавкого элемента, системы скоб, натянутой пружины и медной пластины, служащей инерционным элементом. При превышении допустимого

тока медная пластина нагревается так, что плавится припой и пружина, оттягивая скобы, разрывает цепь тока.

При коротких замыканиях или больших перегрузках перегорает плавкая вставка

Ампер-секундная характеристика (рис.3.7) инерционного предохранителя состоит из двух частей: 1 - инерционной и 2 - безынерционной. Кривая 3 представляет собой пусковую характеристику электродвигателя, для защиты которого применяются инерционные предохранители.

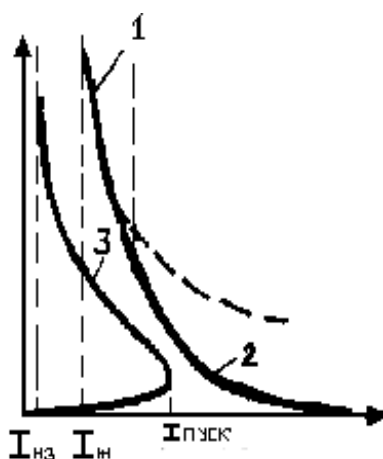


Рис.3.7

Недостатком предохранителей типа **ТП** и **ИП** является отсутствие индикации срабатывания;

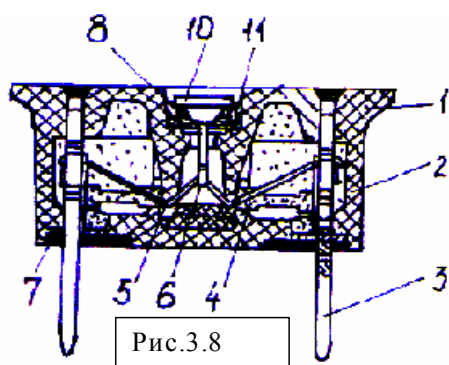


Рис.3.8

Малоинерционные плавкие

предохранители типа **ПМ** имеют индикацию

срабатывания. Для токов от 2 А до 50 А

плавкая вставка сменная; предохранители на

токи от 75 А до 150 А напоминают по

конструкции предохранители **ИП**. На рис.3.8

изображен предохранитель **ПМ2-50**. Он

состоит из верхнего 1 и нижнего 2 корпуса.

Контактные ножи 3 посредством прокладок 7

скрепляют верхний и нижний корпуса. На

контактных ножах закреплены плавкая вставка 4 и удерживающая проволока 5

узла индикации, состоящего из кнопки 10, пружины 8 и деталей уплотнения 11.

При протекании тока перегрузки через предохранитель происходит перегорание

плавкой вставки 4, после чего перегорает проволока 5, удерживающая

указатель 6. Освобожденный указатель под действием пружины 8 поднимается

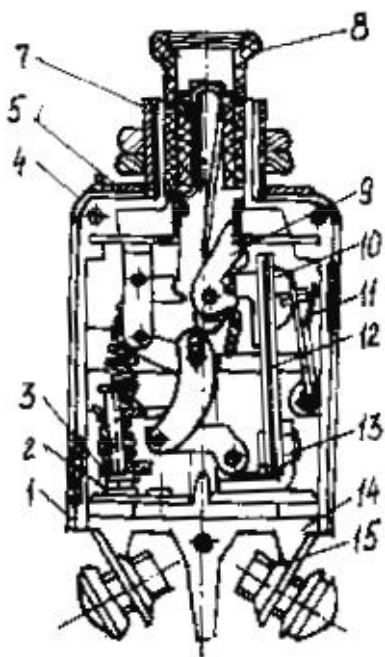


над корпусом до упора крючка указателя, чем и осуществляется индикация срабатывания

Плавкие предохранители просты по конструкции, имеют малые габариты, дешевы. Их недостатки – одноразовость применения, зависимость времени срабатывания от температуры окружающей среды, большой разброс параметров предохранителей одной серии, непостоянство характеристик в процессе продолжительной эксплуатации.

Автоматы защиты объединяют в одной конструкции выключатель и защитное устройство, заменяющее предохранитель. Чувствительным элементом автоматов защиты является биметаллическая пластина, по которой проходит ток защищаемой цепи. Если ток больше допустимого, пластина прогибается, нажимает на узел расцепления и отключает цепь. По виду кинематической связи биметаллической пластины с контактами, размыкающими цепь, различают тепловые автоматы защиты без свободного расцепления ( типа АЗС, АЗСГ, АЗФ1, АЗЗ ) и автоматы защиты со свободным расцеплением ( типа АЗР, АЗРГ, АЗК).

В качестве примера на рис 3.9 представлен однополюсный кнопочный автомат защиты АЗК1М со свободным расцеплением.



Автомат состоит из корпуса 1, в котором расположены : основание 14 ( токоведущая часть ) с закрепленными на нем неподвижными контактами 2 и биметаллической пластиной 12 с термокомпенсатором 13, а также механизм включения 9 с подвижными контактами 3 и кнопкой 8.

Все сборочные единицы расположены в двух половинках корпуса , которые соединены заклепкой 4, втулкой 7 и крышкой 5. Автомат имеет два вывода 15 с узлом крепления проводов.

Механизм свободного расцепления, состоящий из защелки 11 и собачки 10, не позволяет принудительно коммутировать цепь в аварийной ситуации. При отключении автомата на кнопке ясно различимо белое кольцо.

Рис.3.9 Автоматы типа АЗК1М предназначены для защиты

бортовых цепей постоянного и переменного тока и выпускаются на токи ( 1...80 )А. Трёхполюсные автоматы АЗКЗ - на токи до 50 А. Автоматы типов АЗС, АЗР, АЗК имеют зависимые ампер секундные характеристики.

Герметизированные тепловые автоматы защиты типов АЗСГ, АЗРГ на токи ( 20...50 ) А имеют зависимую ампер-секундную характеристику с отсечкой по току. Защита цепей от перегрузок осуществляется этими автоматами с помощью биметаллического чувствительного элемента. Для защиты от коротких замыканий имеется электромагнитный расцепитель, представляющий собой миниатюрный электромагнит, срабатывающий мгновенно при больших токах. В автоматах серии АЗРГ используются термокомпенсаторы, позволяющие

уменьшить влияние изменения температуры окружающей среды на характеристики автомата. К основным недостаткам биметаллических автоматов относится нестабильность их характеристик в процессе эксплуатации.

В системах электроснабжения постоянного тока предусмотрены защиты генераторов и их фидеров от снижения напряжения ( от обратного тока ), от включения генератора с неправильной полярностью, от повышения напряжения и от коротких замыканий.

Защита от обратного тока и включения с неправильной полярностью осуществляется с помощью дифференциально - минимального реле ( ДМР ), которое выполняет также операции управления и сигнализации о включении и отключении генератора.

Применяется несколько модификаций этих аппаратов: ДМР-200ВУ, ДМР-400Д, ДМР-400Т, ДМР-600Т и др. ( Цифры в маркировке обозначают максимальную величину рабочего тока аппарата: 200 А, 400 А, 600 А, 800 А). По принципу действия все модификации ДМР одинаковы, аналогичны по конструкции и имеют незначительные отличия в схемах.

В качестве примера рассмотрим ДМР-400Д, которое выполняет следующие функции: автоматически подключает генератор к сети при наличии нагрузки ( и отсутствии напряжения в сети ), когда его напряжение достигнет значения (12...16) В;

автоматически подключает генератор к бортовой сети, когда его напряжение превысит напряжение сети на (0,3...0,7) В;

предотвращает подключение к сети генератора с неправильной полярностью; автоматически отключает генератор от сети при обратном токе (15...35)А.

Основными элементами ДМР являются: управляющее (дифференциальное) реле, контактор и вспомогательные реле. Дифференциальное реле относится к типу поляризованных и является измерительным элементом. Постоянные магниты 5 в виде стоек ( рис.3.10 ) заключены между двумя стальными пластинами 1, к которым крепятся полюсные наконечники 3. Между наконечниками расположена стальная пластина - якорь 6 которая свободно проходит внутри обмоток - дифференциальной  $W_d$  и токовой  $W_i$  и способна поворачиваться вокруг оси  $O$ . В обесточенном состоянии обмоток якорь занимает одно из двух возможных положений При прохождении тока в обмотках якорь намагничивается, становится полярным, взаимодействует с полюсными наконечниками, чем и определяется его положение На рисунке показано одно из них, когда контакты 7 замкнуты. Если направление тока в обмотках изменится, изменится полярность якоря, и контакты 7 разомкнутся.

Упорным винтом 2 устанавливается разность напряжений на обмотке  $W_d$ , при которой замыкаются контакты управляющего реле, а винтом 4 регулируется обратный ток, при протекании которого контакты реле размыкаются.

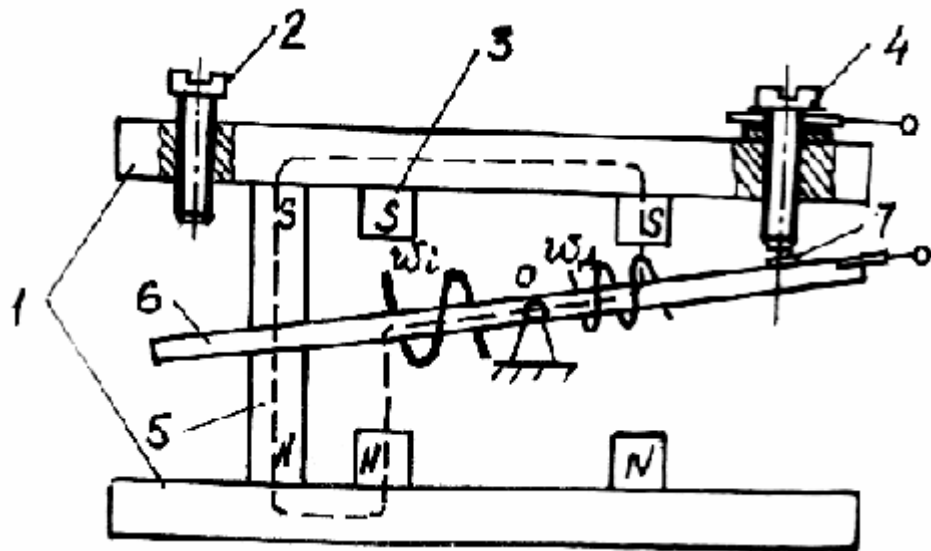


Рис.3.10

Принципиальная электрическая схема ДМР-400Д представлена на рис. 3.11. Генератор соединяется с сетью по цепи: "+" генератора - зажим "Ген" - контакты K1 - обмотка W<sub>1</sub> - зажим "Бат" - "+" сети. В исходном положении контакты контактора K1 разомкнуты. При помощи выключателя Q1,

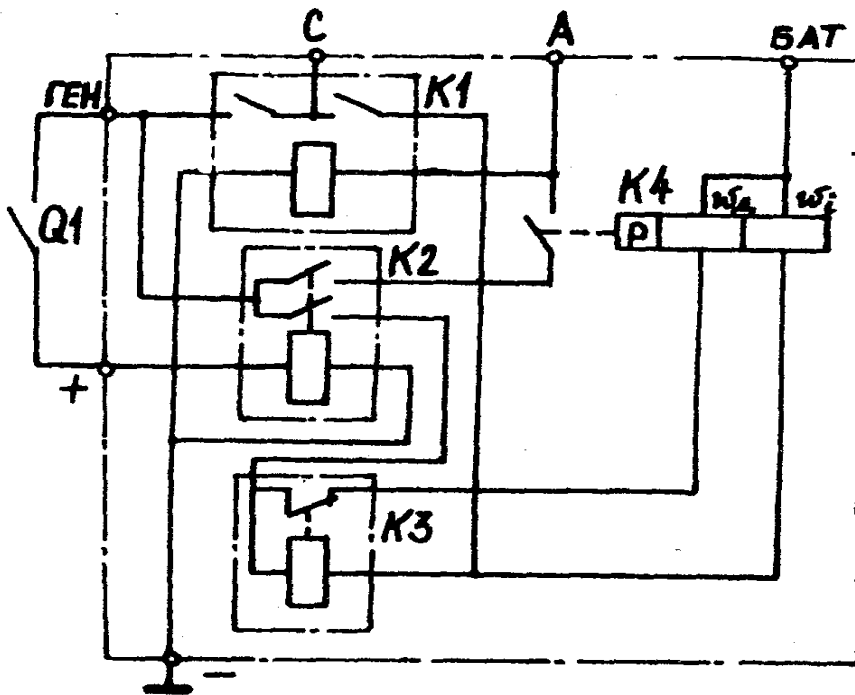


Рис.3.11

расположенного в кабине пилота, напряжение генератора подводится к обмотке включающего реле K2 (ТКЕ1Р2Д). Когда напряжение достигнет (12...14) В, реле K2 замкнет свои контакты в цепи обмотки блокировочного реле K3 (ТКЕ210Б) и обмотки W<sub>д</sub> дифференциального реле K4. В результате они оказываются включенным на разность напряжения сети и генератора ( $\Delta U = U_c - U_g$ ). Большая величина  $\Delta U$  в начале работы генератора опасна для обмотки W<sub>д</sub>. Если эта разность превышает (12...18) В, реле K3 срабатывает и своими контактами отключает обмотку W<sub>д</sub>. То же происходит и в том случае, когда полярности сети и генератора окажутся разными, т.к. при этом возрастает  $\Delta U$ .

Если разность напряжений сети и генератора снизится до 4 В, реле К3 отключится и своими контактами включит обмотку **Wд**.

Когда напряжение  $U_r$  станет больше  $U_c$  на (0,3...0,7) В, МДС обмотки **Wд** окажется достаточной для включения контактов дифференциального реле К4. При этом замыкается цепь обмотки контактора К1, который своими контактами подключает генератор к сети и шунтирует **Wд**. Через токовую обмотку **Wi** протекает ток нагрузки генератора в сеть. Обмотка **Wi** создает МДС, направление которой способствует удержанию контактов поляризованного реле в замкнутом состоянии.

Если напряжение генератора станет меньше, чем  $U_c$ , из сети в генератор потечет обратный ток и направление МДС в обмотке **Wi** изменится. При  $I_{обр} = (15...35)$  А якорь изменит свое положение, разрывая контакты К4. Контактор К1 обесточится и отключит генератор от сети. Зажим "С" служит для подключения сигнальной лампы, которая погасает при включении контактора К1, сигнализируя о подключении генератора к сети,

Защита генераторов постоянного тока от повышения напряжения осуществляется аппаратами типа **АЗП**. Исследуемый в данной работе аппарат защиты от перенапряжения АЗП-8М имеет в качестве чувствительного элемента электромагнитное реле напряжения типа РЗД - реле замедленного действия ( реле 1К4 на рис.3.12). Наличие выдержки времени исключает ложное срабатывание защиты при кратковременных повышениях напряжения, возникающих при отключении нагрузки генератора. Выдержка времени срабатывания у такого реле достигается воздушным демпфером. Реле К4 включено параллельно обмотке возбуждения **Wв** генератора G1. При увеличении напряжения генератора до ( 30...31 ) В реле К4 срабатывает и включает промежуточное реле К2, которое своими контактами подает питание на контактор К1. Его контакты производят следующие операции: отключают обмотку возбуждения **Wв** от угольного столба и подключают к ней добавочный резистор R3 ( для гашения поля возбуждения ); разрывают цепь питания контактора ДМР, отключающего генератор от сети. Контакты реле К3 отключают уравнительную обмотку неисправного генератора от уравнительной шины. Контактор К1 типа **КНК** ( контактор с нажимной кнопкой ) специальный: после срабатывания он запирается защелкой и может быть включен только нажатием на кнопку, расположенную на передней стенке коробки автомата.

Эксплуатация коммутационной и защитной аппаратуры производится по техническому ресурсу. Коммутационная и защитная аппаратура разборке, регулировке и ремонту не подлежит. При замене отказавших элементов необходимо устанавливать аппаратуру только с теми же номинальными данными, что и у отказавшей.

## 2. Описание лабораторной установки

Принципиальная электрическая схема лабораторной установки представлена на рис. 3.12. В состав установки входят:

генератор постоянного тока G1, приводимый двигателем M1;  
автомат защиты от перенапряжений АЗП-8М 4-й серии;

дифференциально-минимальное реле ДМР-400Д,  
 регулятор напряжения Р-25; тепловые автоматы защиты F1, F2, F3 типа АЗСГК-2, АЗРГ-2, АЗК1-2 соответственно;  
 электросекундомер РТ, вентилятор Е1, приводимый двигателем М2:  
 регулировочные реостаты R1, R2, R<sub>p</sub>; выключатели Q1...Q12; измерительные приборы, сигнальные лампы Н1, Н2

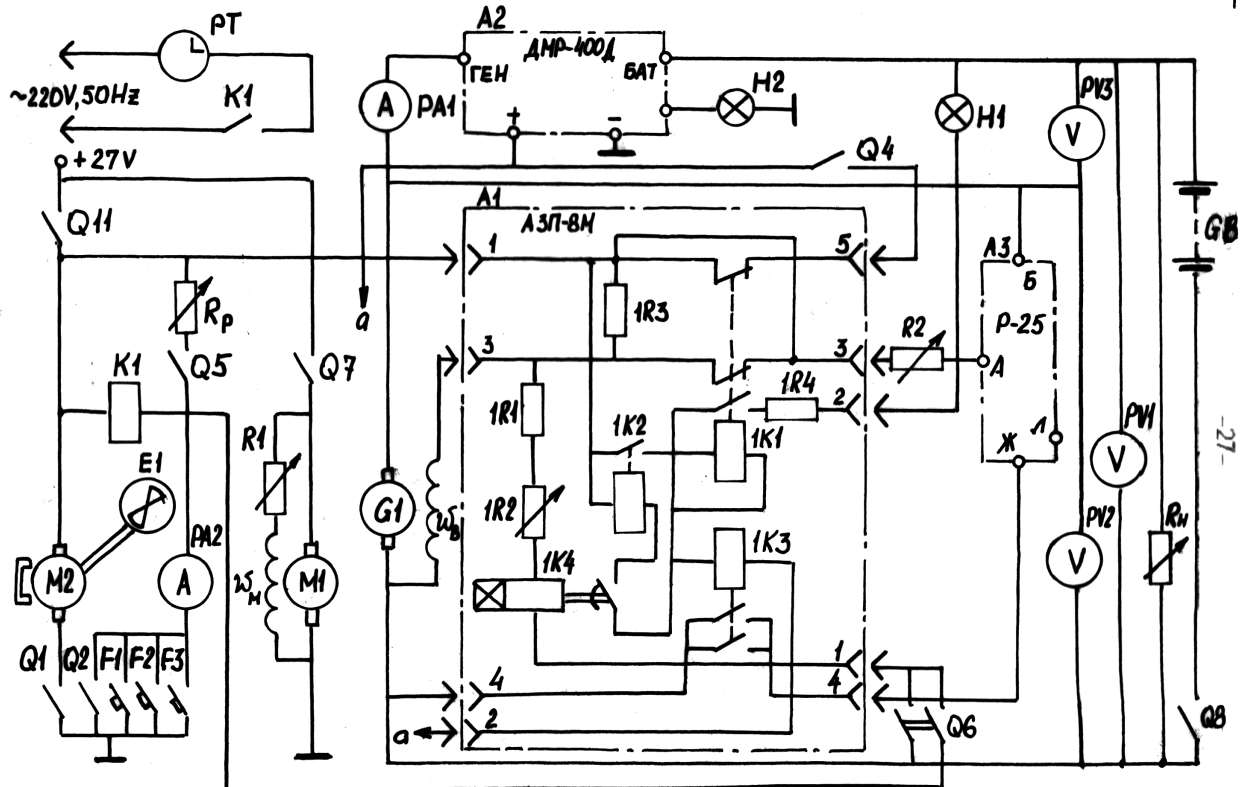


Рис.3.12

### 3.Задание к работе

- 1) Изучить конструкцию и принцип действия коммутационной и защитной аппаратуры.
- 2) Снять ампер-секундные характеристики тепловых автоматов защиты без подогрева и с предварительным подогревом.
- 3) Проверить работоспособность расцепителя автомата АЗР Сравнить работу АЗС и АЗР, для чего сразу после срабатывания автоматов кратковременно включить их повторно.
- 4) Оценить дисперсию времени срабатывания АЗС для значения тока перегрузки  $3 \cdot I_n$ , для оценки дисперсии повторить опыт не менее ( 6...8 ) раз
- 5) Снять вольт-секундную характеристику АЗП.
- 6) Снять характеристики ДМР.

### 4. Порядок проведения работы

- 1) Включить вилку секундомера в розетку 220 В, 50 Гц Все выключатели, кроме Q5, должны находиться в положении "Откл"
- 2) Порядок снятия ампер-секундных характеристик тепловых автоматов защиты без предварительного подогрева:

выключатель Q11 поставить в положение "Вкл";  
 выключатель Q2 поставить в положение "Вкл";  
 с помощью реостата R<sub>p</sub> установить минимальный ток перегрузки 2А;  
 выключатель Q2 поставить в положение "Откл";  
 электросекундомер РТ привести в исходное состояние;  
 включить автомат защиты F1 , при этом включается секундомер, амперметр РА2 показывает ток перегрузки автомата;  
 после срабатывания F1 записать показания секундомера и привести его в исходное состояние;  
 не изменяя положения реостата , произвести измерения времени срабатывания автоматов Р2 и Р3 ,  
 включить выключатель Q1. При этом начинает вращаться вентилятор Е1, с помощью которого необходимо охладить автоматы F1...F3 в течение 1 мин  
 Измерения провести ( 5...8 ) раз, увеличивая ток перегрузки до 10 А. Результаты измерений занести в табл. 3.1.

3) Порядок снятия ампер-секундных характеристик тепловых автоматов защиты с предварительным подогревом.

Отличие от предыдущего опыта состоит в том, что перед снятием каждой точки ампер-секундных характеристик автоматов F1...F3 производится их предварительный подогрев минимальным током 2А Для этого необходимо:

включить выключатель Q11 ;  
 включить выключатель Q2 ;  
 с помощью реостата R<sub>p</sub> установить минимальный ток перегрузки ;  
 отключить выключатель Q2 ;  
 электросекундомер РТ привести в исходное состояние;  
 включить Р1 и прогреть его в течение 5 с ;  
 отключить F1 ;  
 аналогично прогреть автоматы F2 и F3 в течение 5 с каждый;  
 привести секундомер в исходное состояние.

После подогрева снятие каждой точки характеристик производится согласно указаниям предыдущего пункта порядка проведения работы, включая охлаждение автоматов F1 ...F3.

Измерения произвести ( 5...8 ) раз до 10 А. Результаты измерений занести в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Без предварительного подогрева						С предварительным подогревом					
АЗСГК-2		АЗРГ-2		АЗК-1		АЗСГК-2		АЗРГ-2		АЗК-1	
I, А	t, с	I, А	t, с	I, А	t, с	I, А	t, с	I, А	t, с	I, А	t, с

По результатам измерений построить графики зависимостей  $t = f(I)$  для тепловых автоматов защиты без подогрева и с предварительным подогревом.

4) Порядок снятия вольт-секундной характеристики АЗП-8М:

включить выключатель Q7;  
выключатель Q5 поставить в положение "Откл";  
выключатель Q4 поставить в положение "Вкл";  
ручку реостата R2 (точно) повернуть влево до упора;  
включить выключатель R1 (грубо), при этом вольтметр PV2 покажет 25 В;  
с помощью реостата R2 установить перенапряжение генератора 42В;  
выключатель Q6 поставить в положение "Вкл"; при этом включается секундомер РТ;  
после срабатывания АЗП и загорания сигнальной лампы Н1 выключатель Q6 поставить в положение "Откл";  
привести АЗП в исходное состояние нажатием кнопки на передней стенке его коробки;  
привести в исходное состояние секундомер и с помощью реостата R2 установить следующее значение напряжения.  
Измерения произвести ( 5...8 ) раз Результаты измерений занести в табл. 3.2.  
Примечание. Напряжение устанавливать с учетом падения напряжения на внутреннем сопротивлении АЗП, равном 2 В.

Таблица 3.2

U,В	
t,с	

По результатам измерений построить график зависимости  $t = f(U)$ .

#### 5) Измерение характеристик ДМР-400Д.

Для измерения напряжения включения генератора G1 в обесточенную сеть Uвкл необходимо выключатель Q7 поставить в положение "Вкл", выключатель реостата R1 (грубо) поставить в положение "Вкл" и, увеличивая напряжение с помощью реостата R2, добиться погасания сигнальной лампы Н2. Записать показания вольтметра PV2.

Для измерения разности напряжений генератора и сети  $\Delta U_{вкл}$ , при которой происходит подключение генератора к сети, необходимо выключатель Q8 поставить в положение "Вкл", подведя к сети напряжение аккумуляторной батареи GB. Вольтметр PV1 покажет напряжение сети. С помощью реостата R2 установить напряжение генератора выше напряжения сети. Разность напряжения генератора и сети измеряется с помощью вольтметра PV3. Необходимо записать его показания в момент погасания лампы Н2.

Для определения величины обратного тока  $I_{обр}$ , при котором происходит отключение генератора от сети, необходимо с помощью реостата R2 снизить напряжение генератора ниже напряжения сети. При загорании лампы Н2 записать показания амперметра PA1.

Примечание. Перед выполнением этого опыта необходимо с помощью выключателя Q12 изменить полярность подключения амперметра PA1.

### 5. Содержание отчета

- 1) Цель работы, краткие теоретические сведения.
- 2) Таблицы с результатами измерений.
- 3) Ампер-секундные и вольт-секундная характеристики аппаратов защиты.
- 4) Характеристики ДМР.
- 5) Выводы по работе
- 6) Ответы на контрольные вопросы.

#### **6. Контрольные вопросы**

- 1) Какие существуют способы уменьшения искрения между контактами коммутационной аппаратуры ?
- 2) Каково назначение буферной пружины в реле и контакторах ?
- 3) Какой вид имеет ампер-секундная характеристика автомата защиты с отсечкой по току ?
- 4) Как согласуются ампер-секундные характеристики аппарата защиты и приемника?
- 6) Чему равен ток в обмотке  $W_d$  поляризованного реле ДМР, когда генератор подключен к бортовой сети?
- 6) Что произойдет с ДМР-400Д, если на участке от клеммы "Бат" до замыкающего контакта контактора К1 ( рис. 3.12 ) произойдет короткое замыкание ?
- 7) Как обеспечивается селективность действия АЗП ?



ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

**ИЗУЧЕНИЕ ПЕРВИЧНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
САМОЛЕТА ТУ-154**

**Цель работы**

Целью настоящей работы является изучение типовой структуры системы электроснабжения переменного трехфазного тока постоянной частоты напряжением 208/120В самолета Ту-154 (система СПЗСЗП40).

**1. Основные положения**

Основная первичная система электроснабжения СПЗСЗП40 (рис.4.1) предназначена для питания электрифицированных систем самолета и отдельных приемников, а также для обеспечения электроэнергией систем электроснабжения (вторичных) переменного тока 36В, 27В и постоянного тока 27В.

Система состоит из трех однотипных независимых каналов (по числу маршевых двигателей), что обеспечивает ей высокую живучесть.

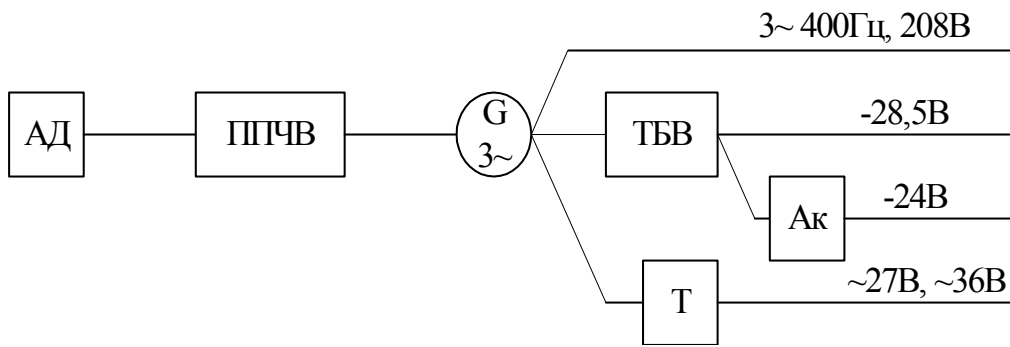
Основные технические данные системы следующие:

номинальная мощность системы _____	<b>120 кВА;</b>
номинальная мощность одного канала _____	<b>40 кВА;</b>
максимальная мощность одного канала _____	<b>50 кВА;</b>
допустимая перегрузка канала в течение 5 с _____	<b>80 кВА;</b>
номинальный ток одного канала _____	<b>111 А;</b>
напряжение системы в точке регулирования _____	<b>208/120 В ± 2%;</b>
частота переменного тока системы _____	<b>400 Гц ± 2%;</b>
число фаз _____	<b>3;</b>
коэффициент мощности (отстающий) _____	<b>(0,8...1);</b>
напряжение питания цепей управления _____	<b>27 В ± 10%</b>

Диапазон изменения фазного напряжения на приемниках электрической энергии лежит в пределах (120 ... 108) В. что обусловлено дополнительным падением напряжения в распределительной сети.

Структурная схема канала системы представлена на рис. 4.2. Частота вращения авиационного двигателя (АД) может меняться в пределах  $\omega_{a \max} / \omega_{a \min} = 2...2,5$ , в то время как частота переменного тока в системе должна быть 400 Гц ± 2%, поэтому генератор получает механическую энергию от авиационного двигателя через привод постоянной частоты вращения (ППЧВ), который поддерживает постоянной частоту вращения ротора генератора переменного тока независимо от режима работы авиационного двигателя.

Существует большое число различных ППЧВ: механические, гидравлические, электромашинные, пневматические. На самолете Ту-154 применяется пневматический привод типа ППО-40, его структурная схема приведена на рис.4.3. Для этого привода характерно наличие дифференциального механизма 1 (планетарного редуктора), т.е. устройства, позволяющего получить



АД - авиационный двигатель;  
 ППЧВ - привод постоянной частоты вращения;  
 G – генератор;  
 ТБВ - трансформаторно-выпрямительный блок;  
 Ак - аккумуляторная батарея;  
 Т – трансформатор.

Рис.4.1. Структурная схема системы электроснабжения самолета ТУ-154

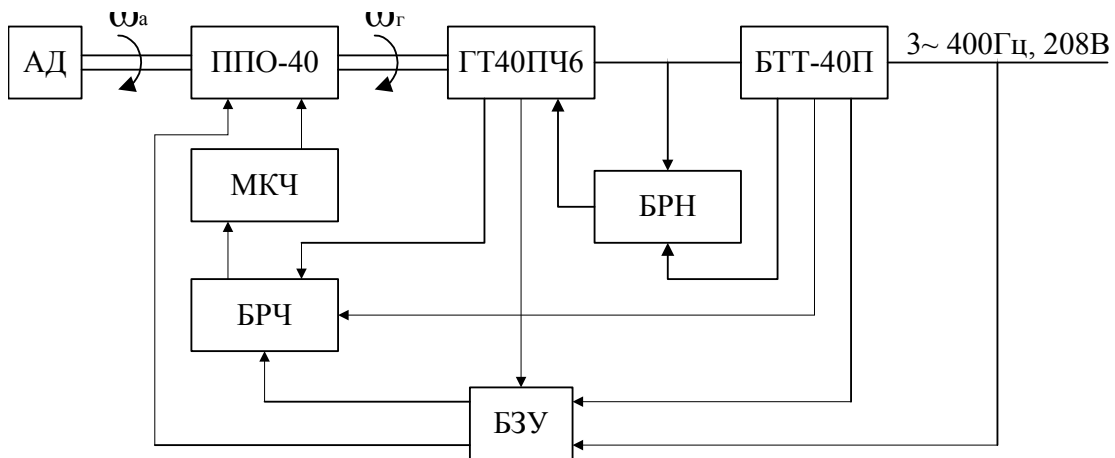


Рис.4.2. Структурная схема канала генерирования

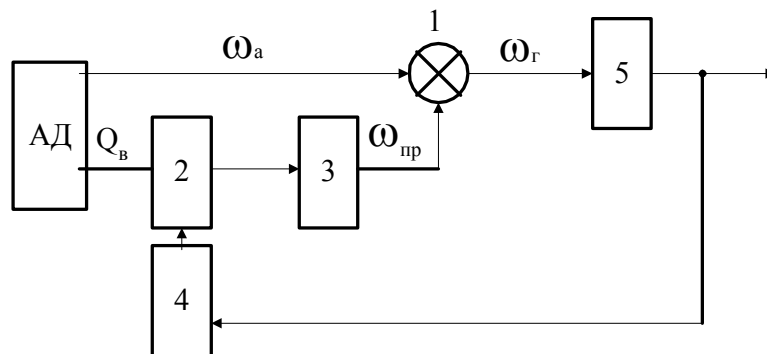


Рис.4.3. Структурная схема привода ППО-40

результатирующее движение  $\omega_r$  ( $\omega_r$  - частота вращения генератора 5) как сумму или разность составляющих движений  $\omega_a$  и  $\omega_{пр}$  ( $\omega_a$  - частота вращения АД,  $\omega_{пр}$  - частота вращения турбины).

Один из входных валов суммирующего редуктора 1 жестко соединен с редуктором АД, второй приводится во вращение воздушной турбиной 2 через понижающий редуктор 3. Регулирование угловой скорости турбины 2 осуществляется путем изменения расхода воздуха  $Q_v$ , отбираемого откомпрессора АД так, чтобы  $\omega_r = \omega_a + \omega_{пр} = \text{const}$ . Сигналы управления для регулирования  $\omega_{пр}$  формируются устройством управления 4.

Таким образом, в приводе с дифференциальным механизмом трансформации энергии в промежуточную подвергается не весь поток энергии, а лишь часть ее, поэтому они имеют, по сравнению с простыми приводами, более высокий КПД.

Большим достоинством привода генератора от воздушных турбин является возможность охлаждения генератора воздухом, отработанным в воздушной турбине. При расширении воздуха в воздушной турбине температура его значительно снижается, и он может быть использован для охлаждения. Недостатком пневматических приводов является малая жесткость механической характеристики.

В качестве источников электроэнергии в системе СПЗСЗП40 используются синхронные генераторы (G) типа ГТ40ПЧ6. Этот генератор представляет собой каскадную схему, состоящую из трех машин: основного генератора (Г), возбуждателя (В) и магнитоэлектрического подвозбудителя (ПВ)

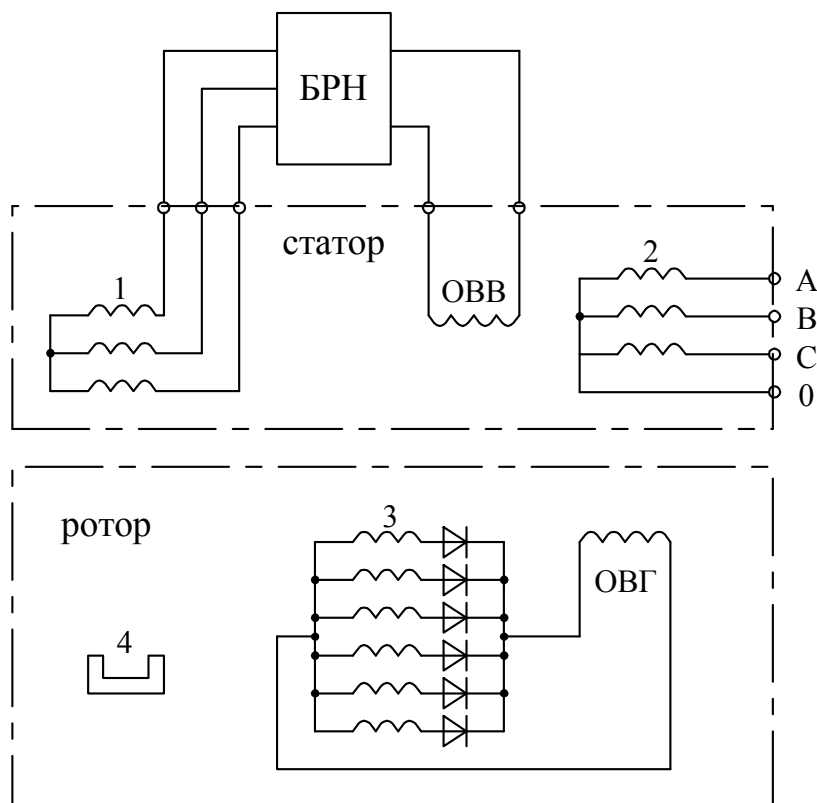


Рис.4.4. Электрическая схема генератора ГТ-40ПЧ6

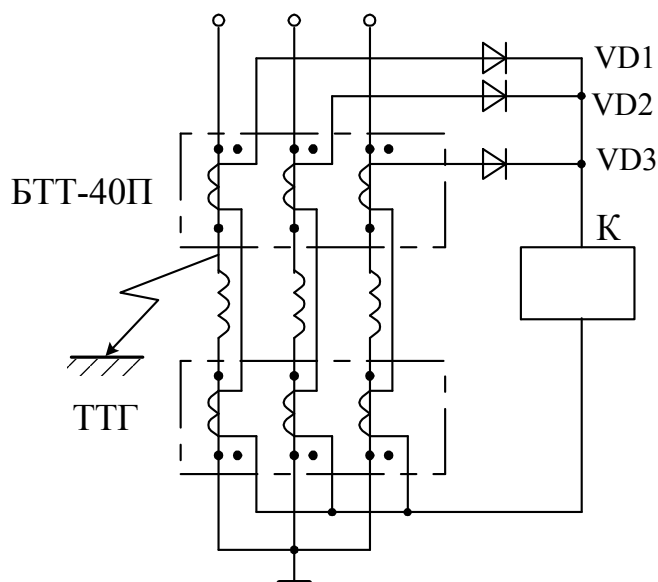


Рис.4.5. Принципиальная электрическая схема дифференциальной защиты.

Трехфазная рабочая обмотка 2 генератора соединена в звезду с выведенной силовой нейтралью. Обмотка возбуждения генератора (ОВГ) питается от шестифазной обмотки 3 переменного тока возбудителя через блок кремниевых диодов (он расположен на роторе G). Для автономного возбудителя генератора на одном с ним валу размещены постоянные магниты 4 подвозбудителя. От рабочей обмотки подвозбудителя 1 осуществляется питание обмотки возбуждения возбудителя (ОВВ) через регулятор напряжения (БРН). Регулятор напряжения изменяет величину тока ОВВ, регулируя тем самым напряжение G. Такая схема построения G позволяет сделать генератор бесконтактным, значительно уменьшить мощность регулятора напряжения, т.к регулятор воздействует на сравнительно маломощную цепь ОВВ; сделать генератор полностью автономным.

Поскольку магнитоэлектрический подвозбудитель не подвержен влиянию каких бы то ни было аварийных режимов в основном генераторе или в системе, то производимая им энергия используется для питания цепей защиты и управления в случае отказа системы 27 В. Наличие отдельного подвозбудителя также обеспечивает большую кратность токов короткого замыкания G, что необходимо для надежной работы аппаратов защиты.

Для защиты G от КЗ внутри генератора, а также на его фидере в каждую фазу генератора включен трансформатор тока (ТТГ). Эти трансформаторы совместно с трансформаторами тока блока БТТ-40П образуют дифференциальную защиту генератора и его фидера от КЗ (рис. 4.5).

Главным требованием, предъявляемым к защите от КЗ, является быстрдействие. Дифференциальная защита позволяет выполнить это требование, кроме того она обладает хорошей селективностью (т.е. свойством отключать только поврежденный участок).

Трансформаторы БТТ-40П и ТТГ, установленные в одной и той же фазе, включены встречно друг другу и составляют последовательную цепь с

выпрямителем (VD1...VD3) и реле. При отсутствии КЗ на концах каждого фазного провода защищаемого участка (участок между трансформаторами тока) токи равны друг другу и находятся в одной фазе. В этом случае в обмотках БТТ-40П и ТТГ индуктируются одинаковые по величине и по фазе напряжения, которые уравнивают друг друга.

Реле обесточено. При возникновении КЗ векторы токов каждого из фазных проводов на концах защищаемого участка резко отличаются друг от друга, равновесие напряжений нарушается, и реле К срабатывает, отключая генератор.

Блок БТТ-40П также обеспечивает при параллельной работе питание датчиков распределения активной и реактивной мощности. На самолете Ту-154 параллельная работа генераторов не предусмотрена.

Помимо генератора, привода, БТТ-40П в канал генерирования входят:

блок регулирования напряжения (БРН-208М7Б), блок регулирования частоты (БРЧ-62 БМ), блок защиты и управления (БЗУ-376СП), электромеханизм коррекции частоты (МКЧ-62ТВ), исполнительная коммутационная аппаратура.

### **1.1. Блок регулирования напряжения (БРН).**

Блок регулирования напряжения БРН-208М7Б предназначен для поддержания напряжения переменного тока генераторов ГТ40ПЧ6 в заданных пределах и для равномерной нагрузки их реактивным током при параллельной работе в системе электроснабжения.

Основные технические данные БРН: точность регулирования напряжения в пределах (201,8 ... 210) В; подстроечный потенциометр позволяет изменять уровень напряжения на  $\pm 6$  В.

Регулирование напряжения генератора осуществляется блоком БРН, в состав которого входит блок измерения напряжения БИН (А1) и два магнитных усилителя МУ-1 (А2) и МУ-2 (А3), включенные в системе регулирования последовательно (рис. 4.6).

Блок измерения напряжения БИН питается от линейного напряжения генератора через трансформатор Т2 и трехфазный выпрямитель 2VD1 ... 2VD6. Выпрямленное напряжение поступает на измерительную мостовую схему, в два плеча которой включены стабилитроны 2VD7 и 2VD8, в другие два плеча - сопротивления 2R1 и 2R2. Для данной мостовой схемы в режиме отсутствия нагрузки  $U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} - 2U_{\text{ст}}$ ,

где:  $U_{\text{вх}}$  - напряжение на входе моста;  $U_{\text{ст}}$  - напряжение на стабилитроне.

Зависимость напряжения на выходе моста от напряжения на входе представлена на рис. 4.7. В диагональ моста включена обмотка управления  $W_{\text{упр}}$  магнитного усилителя МУ-2. Магнитный усилитель МУ-2, кроме управляющей обмотки, имеет стабилизирующую  $W_{\text{ст}}$  и уравнивающую  $W_{\text{ур}}$  обмотки. На стабилизирующую обмотку подается напряжение со вторичной обмотки стабилизирующего трансформатора Т1, по первичной обмотке которого протекает ток возбуждения. Стабилизирующий трансформатор работает только в переходных режимах, и напряжение на его вторичной обмотке пропорционально

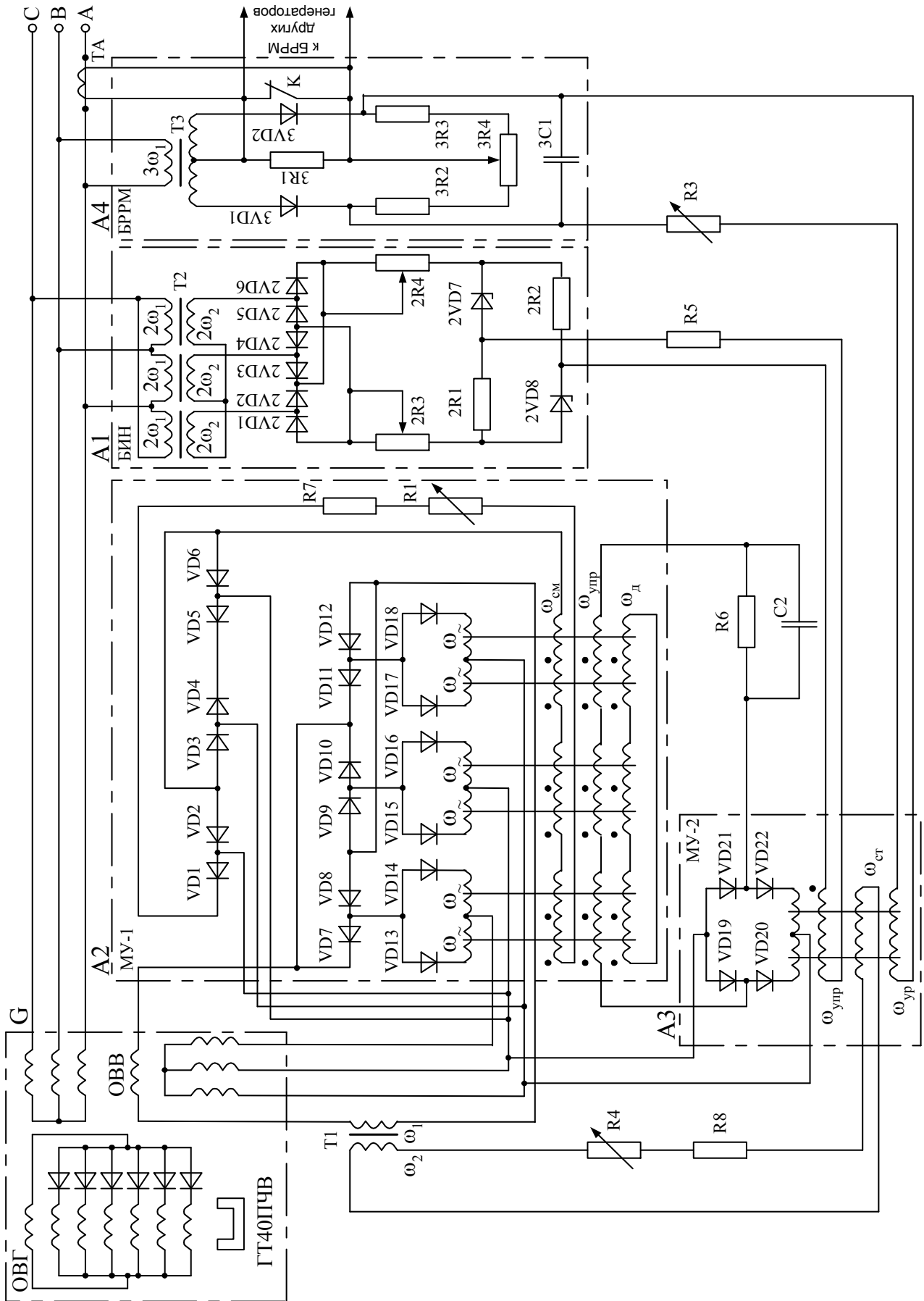


Рис.4.6. Принципиальная схема блока БРН-208М7Б

скорости изменения тока возбуждения возбудителя. МДС обмотки управления и стабилизирующей обмотки направлены встречно, поэтому трансформатор Т1 и стабилизирующая обмотка выполняют роль гибкой отрицательной обратной связи.

Уравнительная обмотка  $W_{ур}$  предназначена для выравнивания реактивных мощностей параллельно работающих синхронных генераторов. Напряжение на уравнительную обмотку подается со схемы распределения реактивной мощности БРРМ (А4). Ток в уравнительной обмотке пропорционален разности реактивных токов генераторов, работающих параллельно. Выходное напряжение магнитного усилителя МУ-2 поступает через сопротивление R6 на обмотку управления  $W_{упр}$  магнитного усилителя МУ-1, который питается также от подвозбудителя.

Нагрузкой МУ-1 является обмотка возбуждения ОВВ. Выпрямители

VD13 ... VD18 обеспечивают обратную связь усилителя МУ-1, а VD7 ... VD12 выпрямляют выходное напряжение усилителя.

Усилитель МУ-1 кроме управляющей обмотки, имеет обмотку смещения  $W_{см}$  и демпферную обмотку  $W_{д}$ . Демпферная обмотка предназначена для предотвращения возможности появления автоколебаний напряжения генератора. Ее роль сводится, главным образом, к уменьшению коэффициента усиления МУ-1 в переходном режиме, что значительно улучшает переходный процесс. Обмотка  $W_{см}$  необходима для выбора рабочей точки на характеристике МУ-1. Она позволяет согласовать характеристики МУ-1 и МУ-2.

Уровень напряжения генератора регулируется сопротивлениями 2R3, 2R4, включенными в цепь питания измерительного моста.

## 1.2. Блок регулирования частоты (БРЧ).

Блок БРЧ-62БМ предназначен:

- для поддержания стабильности частоты;
- для равномерного распределения активной мощности параллельно работающих генераторов.

В энергосистемах переменного тока регулирование частоты осуществляется через грубый и точный каналы регулятора частоты вращения. В распределении активной мощности принимает участие лишь точный канал регулятора, который соответствующим образом изменяет мощность привода постоянной частоты вращения (ППЧВ).

Блок БРЧ-62БМ состоит из трех функциональных блоков:

- 1) блока измерения активной мощности БИАМ-1М (А1);
- 2) блока измерения частоты БИЧ-1М (А2);
- 3) блока магнитного усилителя БУМ-1М (А3).

В качестве исполнительного органа системы регулирования частоты и распределения активной мощности служит механизм коррекции МКЧ-62ТВ –

2 серии, воздействующий на настройку привода постоянной частоты вращения

Блок БИАМ-1М представляет собой однополупериодный дискриминатор, на выходе которого формируется сигнал, пропорциональный активной составляющей тока нагрузки генератора.

Нагрузкой генератора служит одна из обмоток управления магнитного усилителя БУМ-1М (А3) (рис. 4.10).

Блок БИЧ-1М представляет собой два резонансных контура, настроенных на резонансные частоты  $f_1=740$  Гц и  $f_2=860$  Гц.

Резонансные контуры, состоящие из дросселей и конденсаторов, через трансформатор 2Т1 получают питание от подвозбудителя. Это позволяет уменьшить габариты резонансных контуров.

Резонансные контуры рассчитаны таким образом, что при номинальной частоте  $f_n=800$  Гц токи в контурах равны и сдвинуты друг относительно друга на  $180^\circ$  (рис.4.8). Направление тока на выходе блока определяется потенциалами точек 4 и 3 (рис.4.10).

При уменьшении частоты потенциал точки 4 выше потенциала точки 3, и выпрямленный ток от точки 4 протекает по обмотке управления магнитного усилителя А3 и сопротивлениям 2R3, 2R2.

Аналогично протекают процессы при повышении частоты; только в этом случае потенциал точки 3 будет выше, чем потенциал точки 4, и ток в обмотке управления магнитного усилителя А3 изменит свое направление.

Симметрия контуров достигается подрегулированием резонансных токов сопротивлением 2R2. Конденсаторы 2C2, 2C5 служат фильтрами однополупериодной схемы выпрямления.

Блок БУМ-1М - двухкаскадный усилитель. Первым каскадом является магнитный усилитель УМ1, вторым - магнитные усилители УМ2 и УМ3.

Магнитный усилитель УМ1 по соединению рабочих обмоток представляет собой два обычных магнитных усилителя с внутренней обратной связью, имеющих общие обмотки управления.

Нагрузкой каждой пары рабочих обмоток являются обмотки управления магнитных усилителей второго каскада.

При отсутствии сигналов в обмотках управления магнитного усилителя УМ1 по его рабочим обмоткам протекает ток холостого хода.

Регулируя сопротивлениями 3R3 и 3R5 коэффициент обратной связи магнитных усилителей, добиваются, чтобы напряжение выхода второго каскада при отсутствии сигналов было равно нулю, а зависимость выходного напряжения от сигналов в обмотке управления укладывалась в заданные требования.

При появлении сигналов в обмотках управления магнитного усилителя УМ1 одна пара сердечников подмагничивается, другая размагничивается, и рабочие токи соответственно изменяются.

Следовательно, при одном и том же токе управления магнитного усилителя УМ1 токи управления магнитных усилителей УМ2 и УМ3 различны.

Рабочие обмотки усилителей УМ2, УМ3 соединены по мостовой схеме (рис.4.9), что обеспечивает при изменении их полных сопротивлений изменение тока нагрузки не только по величине, но и по фазе.



Величина тока выхода пропорциональна полным сопротивлениям рабочих обмоток магнитных усилителей УМ2 и УМ3, следовательно, зависит от величины и направления токов в обмотках управления магнитного усилителя УМ1.

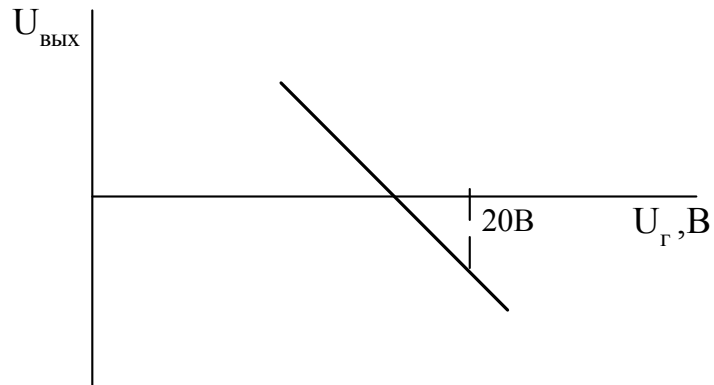


Рис.4.7. Характеристика измерительного моста БРН

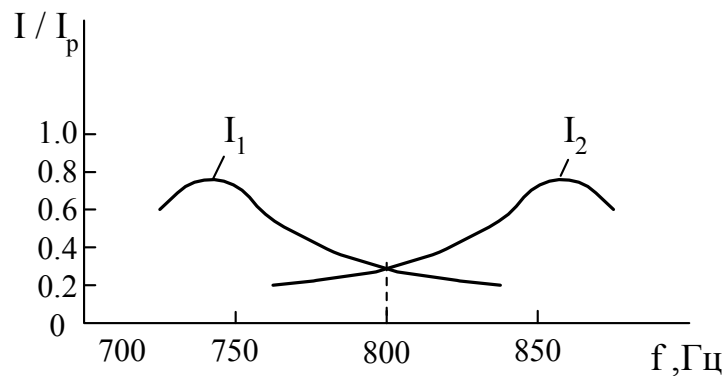


Рис.4.8. Характеристики резонансных контуров БИЧ-1М

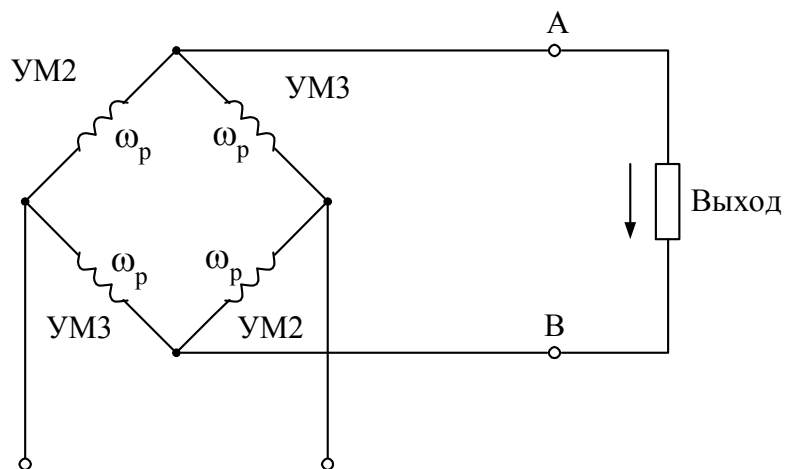


Рис.4.9. Схема соединения рабочих обмоток магнитных усилителей блока БУМ-1М

Питание магнитных усилителей осуществляется:

УМ2 и УМ3 - от фазного напряжения генератора; УМ1 - через трансформаторную обмотку  $W_T$  от магнитных усилителей УМ2 и УМ3.

Соппротивлением  $3R2$  регулируется максимальное значение напряжений на обмотке управления двигателя механизма коррекции частоты МКЧ-62ТВ – 2 серия.

Сигнал на выходе обеспечивает вращение вала электромеханизма МКЧ-62ТВ – 2 серия, приводящее к уменьшению (увеличению) частоты вращения ППЧВ и, следовательно, частоты генератора.

### 1.3. Блок защиты и управления (БЗУ).

Блок защиты и управления обеспечивает:

- а) дистанционное включение и выключение генератора;
- б) автоматическое включение генератора на нагрузку при напряжении более (175 ... 185) В и частоте более (372 ... 380) Гц с выдачей светового сигнала;
- в) питание всех элементов защиты и управления генератора постоянным током напряжением (24 ... 28) В при аварии самолетной сети постоянного тока и при напряжении сети переменного тока 208 В,
- г) необратимое отключение генератора от нагрузки, необратимое выключение возбуждения генератора, снятие питания с основного электромагнита привода постоянной частоты вращения и выдачу сигналов аварийного отключения при следующих авариях:

- при повышении напряжения более (220 ... 230) В с выдержкой времени (0,4 ... 0,7) с;
- при снижении напряжения ниже (175 ... 185) В с выдержкой времени  $(4 \pm 0,6)$  с;
- при всех видах короткого замыкания внутри генератора или на его фидере;
- при снижении частоты ниже (372 ... 380) Гц или повышении выше (420 ... 480) Гц с выдержкой времени  $(6 \pm 0,9)$  с;
- условия параллельной работы генераторов.

Полная схема БЗУ довольно сложна, поэтому в данной работе приведена упрощенная функциональная схема блока (рис. 4.11).

Рассмотрим работу БЗУ в различных режимах.

1) *Включение генератора на нагрузку,*

Выключателем генератора подается питание на штырь X2:1 – основное, на X2:7 – резервное. Через разделительные диоды VD1, VD2, исключая влияние неисправности одной цепи на другую, "плюс" питания проходит:

через нормально-замкнутые контакты 5,4 реле аварийного отключения K5 на включение цепи возбуждения генератора (X2:12),

через диод, нормально-замкнутые контакты 7,8 реле K5 на основной электромагнит ППЧВ ( X2:5 );

через нормально-замкнутые контакты реле K5 на обмотку реле включения нагрузки K3;

через нормально-замкнутые контакты 5,4 реле K5 на реле K4.

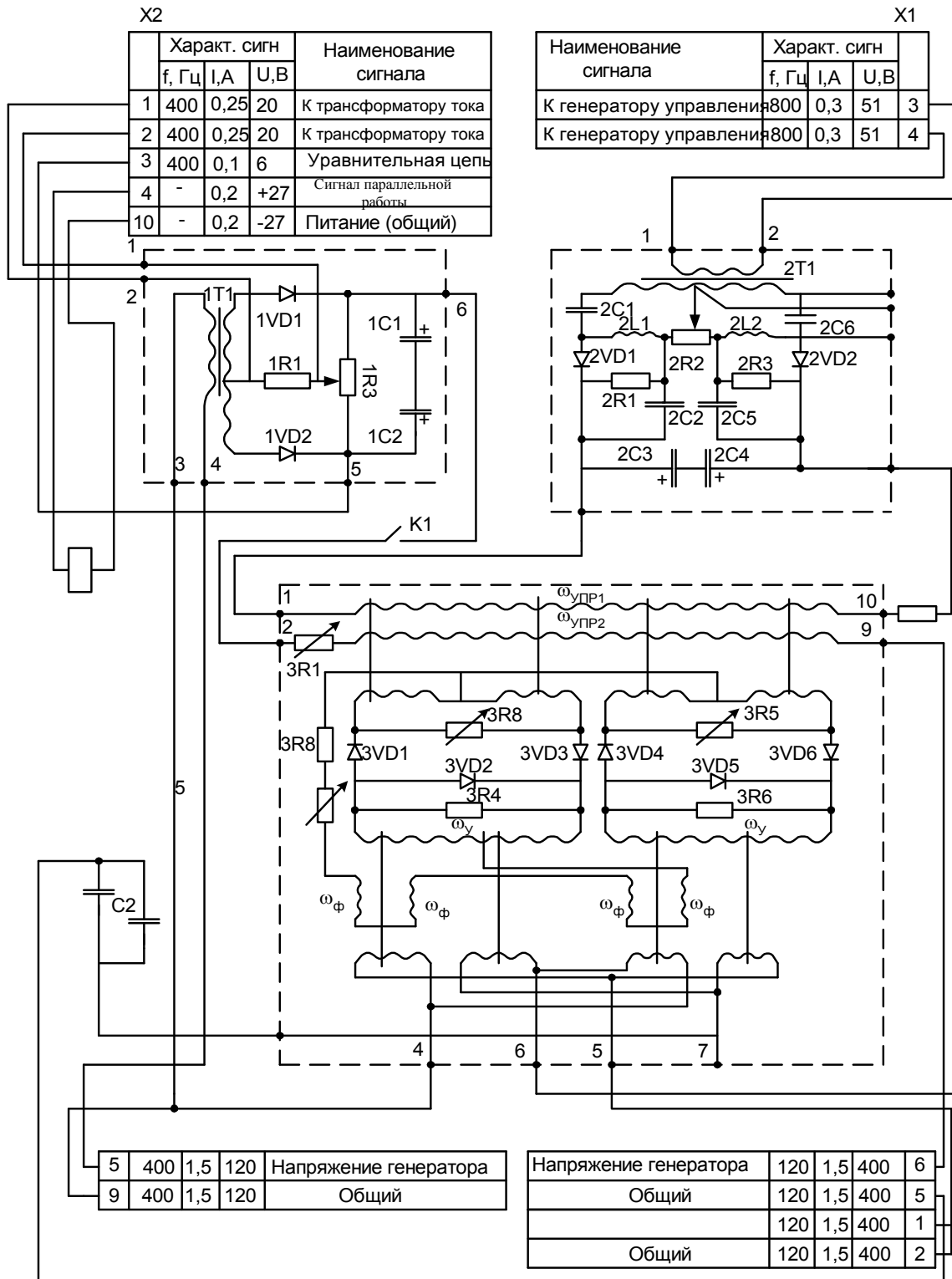


Рис.4.10 Принципиальная электрическая схема блока БРЧ-62БМ

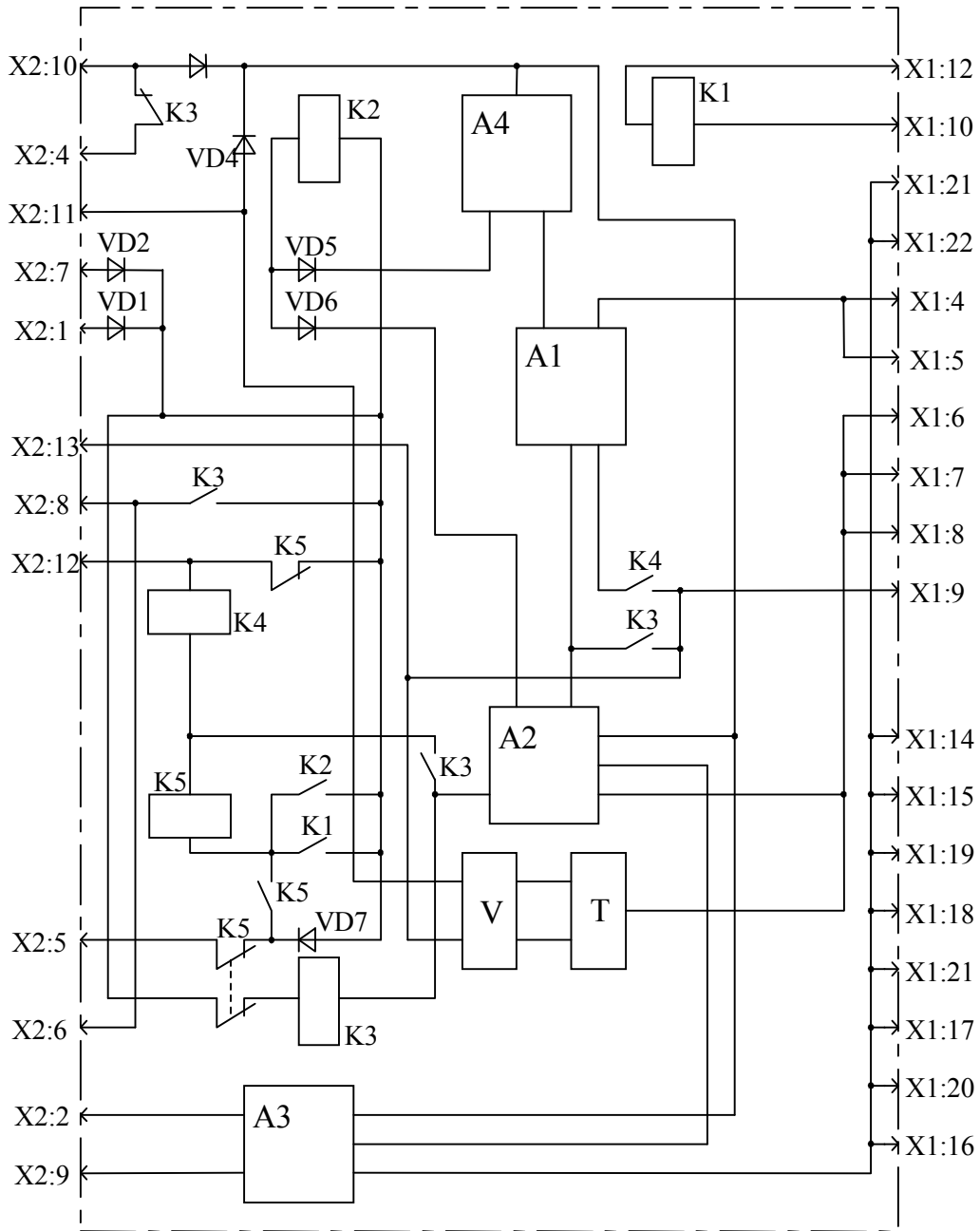


Рис.4.11 Принципиальная электрическая схема блока БЗУ

Реле К4 срабатывает и "минусом" питания через свои нормально-разомкнутые контакты 1,3 и через контакты блока А1 (блока защиты по частоте) включает бесконтактное реле выдержки времени А4.

Таким образом, после включения выключателя генератора разгоняется турбина привода постоянной частоты вращения, возбуждается генератор и начинается отсчет времени реле А4.

Если за время, меньшее чем выдержка времени реле А4, турбина выйдет на режим по оборотам (частота генератора достигнет величины (372 ... 380) Гц), реле в блоке защиты по частоте (А1) отключит реле выдержки времени и подаст "минус" питания в блок защиты по напряжению (А2). В блоке А2 включается бесконтактное реле выдержки времени.

Реле времени в блоке А2 ведет отсчет времени. Если за время, меньшее чем выдержка времени реле в блоке А2, напряжение генератора достигнет

(175...185) В, реле блока А2 отключит реле выдержки времени и включит "минусом" питание реле включения нагрузки К3, которое, срабатывая, контактами 9,8 выдает сигнал на включение контактора нагрузки, контактами 2,3 самоблокируется, контактами 5,6 обеспечивает после включения генератора на нагрузку независимость работы защиты по напряжению от защиты по частоте. Кроме того, реле К3 контактами 10,11 включает сигнальную лампу отключения генератора от нагрузки.

## *2) Аварийное отключение генератора.*

При аварии в системе генератора, когда дальнейшая работа генератора может привести к опасной ситуации на самолете, блок БЗУ производит отключение генератора от нагрузки и синхронизирующих шин, выключение его возбуждения, выключение привода постоянной частоты вращения

Аварийное выключение генератора производит реле аварийного отключения К5, которое выключается действием различных защит.

### *2.1) Защита от работы при повышенном или пониженном напряжении.*

Защиту от работы системы при повышенном или пониженном напряжении осуществляет блок А2, состоящий из следующих элементов:

входного трансформатора, выпрямительного моста, двух блоков измерения напряжения, бесконтактного реле выдержки времени.

Напряжение генератора понижается трансформатором, выпрямляется и подается на оба блока измерения напряжения. Один блок срабатывает при понижении напряжения генератора в пределах (175 ... 185) В, другой – при повышении напряжения в пределах (220 ... 230) В.

При снижении или повышении напряжения вышесказанных пределов блоки измерения напряжения включают реле выдержки времени. Если напряжение не восстанавливается за время выдержки реле, то реле времени через разделительный диод включает "минусом" питания обмотку реле К2.

Реле К2 включает контактами 2,3 реле аварийного отключения К5, которое, срабатывая, самоблокируется (контактами 8,9), отключает генератор от

нагрузки (контактами 4,5), выключает основной электромагнит ППЧВ (контактами 7,8).

#### *2.2) Защита от работы при повышенной или пониженной частоте.*

Защиту осуществляет блок А1. В блоке А1 имеется резонансный контур, на дроссель которого включена цепь управления блока измерения напряжения, подобного блокам измерения напряжения А2.

При выходе из зоны допустимой частоты (372...380) Гц - (420...428) Гц напряжения на резонансном контуре недостаточно для срабатывания блока измерения напряжения, и он включает реле выдержки времени А4.

Если снижение или повышение частоты длится более выдержки времени реле, то оно включает реле А2 и производит аварийное отключение генератора, как было описано выше.

#### *2.3) Защита от работы при короткое замыкании.*

При коротком замыкании в зоне, охватываемой дифференциальной защитой, нарушается равновесие, и реле К1 срабатывает, включая реле аварийного отключения К5, которое производит отключение генератора как описано выше.

### **1.4. Резервное питание.**

При аварии самолетной сети постоянного тока питание всех элементов защиты и управления генератора осуществляется от резервного источника питания, который питается напряжением трехфазного переменного тока частотой 400 Гц (X1:6, X1 :7, X1:8) и состоит из трансформатора и выпрямителей.

При разработке системы СПЗСЗП40 предусматривалась возможность параллельной работы генераторов, однако на практике параллельная работа генераторов не применялась, и в более поздней модификации этой системы электроснабжения возможность параллельной работы не предусмотрена, что позволило упростить управление, регулирование и защиту в системе.

Общая мощность системы обеспечивает питание всех основных приемников электроэнергии как при отказе одного генератора, так и при отказе двух генераторов.

Система СПЗСЗП40 включает в свой состав резервный источник питания – 4-й генератор переменного тока (такого же типа и такой же мощности, что и основные генераторы), установленный на вспомогательной силовой установке (ВСУ). Он используется для автономной работы при отказе основных генераторов в диапазоне от 0 до 3000 м и на земле при отсутствии аэродромных источников электроэнергии.

### **1.5.Переключение сетей генераторов.**

Основная система электроснабжения разделена на три сети по количеству каналов системы. В нормальном режиме каждый генератор работает на

соответствующую сеть. В случае отказа одного из генераторов его сеть автоматически переключается на работающие генераторы.

Распределительная сеть основной системы электроснабжения радиальная (т.е. распределительные устройства (РУ) подключаются к центральному РУ параллельно) с тройным расщеплением фаз (по три провода в каждой фазе), что обеспечивает нормальную работу сети при отказе одного из трех проводов фазы. Магистральные линии сети имеют двухстороннюю защиту биметаллическими автоматами защиты типа АЗФМ с номиналами от 20 А до 50 А, а цепи генератора – автоматами типа АЗЗК на 100 А и 200 А.

Переключение сетей осуществляется таким образом, чтобы при возникновении отказов в канале генерирования обеспечить бесперебойное снабжение приемников 1-й категории (т.е. тех приемников электрической энергии, без которых невозможна посадка самолета) за счет других менее важных приемников, например, бытового оборудования.

При отключении или отказе любого генератора блок БЗУ соответствующего канала выдает сигнал на переключение сетей генераторов.

В результате обесточатся контакторы 10 или 16, 21\*, отключающие генератор от сети, и реле 18, через контакты которых, в зависимости от включения противообледенителя, управляются контакторы 11, 15, 17 переключения сети отказавшего генератора на сеть работающего генератора. Реле 19 управляет переключением сетей при включенных противообледенителях.

Если отказ одного генератора произошел при включенном противообледенителе, то через контакты 18 и включенное в этом случае реле 19 включается контактор 22, который отключает шины приемников бытового оборудования от сети III. При отказе одновременно двух любых генераторов через контакты реле 18 срабатывает реле 20 и контактор 22, что также обеспечит отключение бытового оборудования. Кроме того, срабатывает контактор 15, который переключает сеть II (сеть противообледенителей) на питание от генератора ВСУ. Сети I и III переключаются в этом случае на работающий генератор контакторами 11 или 17, в зависимости от того, какие генераторы отказали. При отказе всех трех генераторов включается реле 31, отключаются противообледенители, контакторами 23 и 11 сети I и III подключаются к генератору ВСУ.

Шины навигационного оборудования, в нормальном режиме получающие питание от сети I автоматически переключаются на сеть III контактором 13, если сеть I обесточивается.

Управление контактором 13 автоматическое от аппарата переключения шин АПШ-3, который обеспечивает переключение шин при следующих авариях:

- при междуфазных коротких замыканиях;
- при трехфазных коротких замыканиях,
- при обрывах одной, двух или трех фаз;

- при отключении сети I от питания;
- при аварийном повышении напряжения.

Бортсеть самолета может быть запитана от наземного источника электрической энергии через специальный разъем аэродромного питания - ШРАП-400 В системе не предусмотрена совместная работа бортовых генераторов и наземного источника.

\*Примечание: Все обозначения даны в соответствии со схемой, приведенной на лабораторном стенде.

Блок БЧФ-208 предотвращает подключение бортсети к наземному источнику с неправильным чередованием фаз.

## **2. Описание лабораторной установки**

Лабораторная установка представляет собой модель самолетной электроэнергетической системы, выполненную в виде стенда, передняя часть которого закрывается фальшпанелью с нанесенной на нее мнемосхемой, которая отражает функциональную схему системы электроснабжения самолета Ту-154. На этой же части стенда расположена панель энергоузла с соответствующими выключателями, переключателями, показывающими приборами. В правой части стенда расположена панель управления стендом, которая служит для включения стенда, а также для имитации различных режимов работы СЭС. Магистралы, участвующие в работе, в каждый отдельный момент выделяются подсветкой.

## **3. Задание к работе**

1. Изучить систему электроснабжения самолета Ту-154 переменным током 208В, 400 Гц.
2. Исследовать работу первичной системы электроснабжения:
  - а) при питании от наземного источника электроэнергии;
  - б) при включении основных генераторов или генератора ВСУ на нагрузку;
  - в) при аварийных режимах.

## **4. Выполнение работы**

### **4.1. Подготовка стенда к работе**

1) Переключатели, АЗС, выключатели и кнопки, расположенные на щите управления стендом и на панели энергоузла, установить в положение «Выключено».

2) Переключатели с нейтралью установить в нейтральное положение. Включить питание стенда, при этом загорается лампочка, сигнализирующая о наличии питания.



#### **4.2. Питание системы от внешнего источника электроэнергии.**

1) Включить автомат защиты цепей управления переключением шин АЗСГК-10

2) Включить наземный источник питания (ШРАП-400).

3) На панели энергоузла переключатель сетей 208 В, 400 Гц установить в положение «РАП». Поочередно устанавливая переключатель вольтметра в положения АВ, ВС, АС, по вольтметру и частотомеру определить линейные напряжения и частоту наземного источника питания и записать эти показания.

Устанавливая переключатель вольтметра «Сеть I, Сеть II, Сеть III, ВСУ-РАП» в различные положения, убедиться по вольтметру в отсутствии напряжения в сетях.

\*Примечание: При проверке на земле включить выключатель «Проверка противообледенителей и бытового оборудования на земле»

4) Включить АЗЗ-100 и АЗЗК-200 защиты сетей I, II, III.

5) На панели энергоузла переключатель «ВСУ-РАП» поставить в положение «РАП»

6) Устанавливая переключатели вольтметра в положение «Сеть I», «Сеть II», «Сеть III» в положения АВ, ВС, АС, убедиться в наличии напряжения и частоты и записать показания приборов.

7) Для имитации включения под нагрузку выключатель на щитке управления стендом установить в положение «Потреб.».

Устанавливая переключатель фаз амперметра, расположенный на панели энергоузла, в положения фаз А, В, С, замерить ток по амперметру.

в) Для проверки работы блока чередования фаз БЧФ-208 переключатель «ВСУ-РАП» установить в нейтральное положение. На щитке управления стендом переключатель установить в положение «Перепут. фаз». На панели энергоузла переключатель вольтметра установить в положение «Сеть III». Переключатель «ВСУ-РАП» переключить в положение «РАП» - при этом вольтметр покажет «0», т.е. наземный источник питания с неправильным чередованием фаз не должен подключаться к сети III. Установить переключатель в положение «Верно». Вольтметр покажет 208 В.

#### **4.3. Включение на сеть генератора ВСУ**

1) Включить автомат АЗСГ-2 защиты цепей сигнализации отключения генератора ВСУ.

2) Выключатель «Проверка п/о и быт. обор. на земле» установить в положение «Выключен».

3) На панели энергоузла переключатель «ВСУ-РАП» установить в положение «ВСУ». Переключатель вольтметра установить в положение «Сеть III» - вольтметр покажет 208 В, частотомер - 400 Гц.

4) Установить выключатель на щитке управления стендом в положение «Потреб.». Амперметр покажет ток. При работе генератора ВСУ на сеть и неработающих генераторах противообледенение отключается.

#### **4.4. Имитация короткого замыкания сети**

Исходное состояние: ВСУ запущен и подключен к сети.

1) На панели энергоузла переключатель вольтметра установить в положение «Сеть Ш» вольтметр и частотомер покажут соответственно 208 В и 400 Гц

2) Кратковременно нажать на кнопку «КЗ ВСУ», расположенную на щитке управления стендом, при этом генератор ВСУ должен выключиться, вольтметр и частотомер покажут «0».

3) Для повторного включения генератора ВСУ переключатель «ВСУ-РАП» на панели энергоузла поставить в нейтраль, а затем в положение «ВСУ». Генератор ВСУ подключается к сети, вольтметр и частотомер покажут соответственно: (202 ... 210 ) В и 400 Гц.

#### **4.5. Работа генератора 1**

1) Включить наземный источник переменного тока. Выключатель «ВСУ-РАП» на панели энергоузла установить в положение «РАП»

2) Выключатели противообледенителей предкрылков и проверки противообледенителей и бытового оборудования на земле установить в положение «Выключено».

3) Выключатель, расположенный на щитке управления стендом, установить в положение 'Запуск 1 дв.»

4) На панели энергоузла переключатель вольтметра установить в положение «Сеть I».

5) Выключить автомат АЗСГК-2 защиты сигнализации отключения генератора 1, при этом горит красная лампочка сигнализации отключения генератора 1.

6) Включить автомат АЗСГК-10 защиты цепи управления генератором 1, включить АЗСГК-5 защиты цепи резервного питания.

7) Выключателем, расположенным на панели энергоузла, включить генератор 1 на сеть. Через некоторое время генератор подключится к сети I, о чем свидетельствует наличие напряжения и частоты на приборах, установленных на панели энергоузла, и погасание красной лампочки, сигнализирующей об отключении генератора 1.

8) Выключить автомат АЗСГК-10 защиты цепи управления генератором 1, генератор должен продолжать работу.

9) Включить аналогично генераторы 2 и 3.

#### **4.6. Работа блока защиты и управления ВЗУ-376СП**

Исходное состояние - включен генератор 1.

1) Переключатель, расположенный на щитке управления стендом, установить в положение «>Hz ном.», что имитирует повышение частоты до (420...428) Гц. Через некоторый промежуток времени, соответствующий выдержке времени блока БЗУ, произойдет отключение генератора, о чем сигнализирует загорание красной лампочки «Отключение генератора 1» на панели энергоузла, вольтметр и частотомер покажут «0»

2) Вернуть переключатель в положение «Hz ном». На панели энергоузла выключить и вновь включить выключатель генератора 1, при этом генератор вновь подключится к сети. Лампочка сигнализации отключения генератора 1 погаснет.

3) Аналогично проверить отключение генератора 1 при понижении частоты, установив переключатель в положение «<Hz ном.»

4) Аналогично п.п. 1...3 произвести соответствующую манипуляцию по отключению генератора 1 при увеличении и уменьшении напряжения.

5) Для отключения генератора по сигналу короткого замыкания нажать кнопку «КЗ 1 ген.», расположенную на щитке управления стендом, что имитирует сигнал короткого замыкания в сети 208 В или в генераторе. Произойдет отключение генератора 1.

6) Выключить и вновь включить выключатель генератора 1.

7) Замерить ток в фазах генератора 1.

8) Выключатель включения генератора 1 на сеть установить в положение «Выкл.». Горит красная лампа сигнализации отключения генератора.

#### 4.7. Работа автомата переключения шин

1) Включить автомат АЗСГК-2 защиты управления переключением шин навигационных потребителей.

2) Включить автомат АЗЗК-30 защиты питания навигационных потребителей.

3) Исходное состояние - есть напряжение в сетях I, II, III

4) Выключатель на панели управления стендом установить в положение «Откл. сети». При этом загорается желтая лампочка «Навигационные шины от сети III»

5) Выключатель «Откл. сети I» установить в положение «Выкл.». Выключить и снова включить АЗСГК-2 защиты цепи управления переключателем шин навигационных потребителей, при этом навигационные шины подключаются к сети I, погаснет лампочка «Навигационные шины от сети III».

### 5. Содержание отчета

1) Структурная схема канала генерирования.

2) Упрощенные схемы БРН, БРЧ, БЗУ и краткое описание их работы.

3) Выводы согласно пунктам задания.

4) Ответы на контрольные вопросы

6. Контрольные вопросы

1) Возможна ли длительная работа генератора при напряжении на его зажимах 190 В?

2) Каково назначение стабилизирующего трансформатора в БРН?

3) Почему магнитные усилители в БРН и измерительные цепи в БРЧ получают питание от подвозбудителя генератора?

4) Какой элемент БЗУ производит аварийное отключение генератора и что при этом отключается?

5) На что воздействует исполнительный орган регулятора частоты?

6) Предусмотрена ли совместная работа трех генераторов ГТ40ПЧ6 и генератора переменного тока ВСУ?

7) Будет ли получать питание шина навигационных потребителей при отказе генераторов 1 и 2?

### ЛИТЕРАТУРА

Савелов А.А. Энергосиловое оборудование аэропортов. М.: РИО МГТУГА, 2000.

Кацман М.М. Электрические машины. М.: Высшая школа, 1990.

Синдеев И.М. Савелов А.А. Системы электроснабжения воздушных судов.: М. Транспорт, 1990.

### СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1. Исследование генератора постоянного тока параллельного возбуждения.....	3
Лабораторная работа № 2. Исследование трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.....	18
Лабораторная работа № 3. Изучение коммутационной и защитной аппаратуры.....	35
Лабораторная работа № 4. Изучение первичной системы электроснабжения самолета Ту-154.....	49