

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ АВИАЦИОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Цель работы: ознакомление с конструкцией авиационных генераторов постоянного тока и снятие их основных характеристик.

1.1. Основные положения

Авиационные генераторы постоянного тока серии ГС (генератор самолетный) с параллельным возбуждением имеют номинальное напряжение $U_{ном} = 28,5$ В и номинальную мощность от 3 до 24 кВт. Привод генераторов постоянного тока осуществляется от авиационных двигателей; при этом нормальный (Н) диапазон изменения частоты вращения генератора составляет от 3800 до 6500 об/мин, расширенный (Р) от 4000 до 9000 об/мин. Авиационные генераторы постоянного тока могут применяться в качестве стартера для запуска авиационных двигателей. Стартер-генераторы СТГ в режиме стартера (двигателя) имеют независимое возбуждение, а ГСР-СТ – смешанное (параллельно-последовательное) возбуждение. Охлаждение генераторов интенсивное воздушное, путем продува заборного воздуха.

Авиационные электрические машины постоянного тока по сравнению с машинами общего применения имеют значительно меньшие габариты и массу. Авиационные генераторы постоянного тока выполняются из высококачественных изоляционных, магнитных, конструктивных материалов и рассчитаны на повышенные электрические, магнитные, тепловые и механические нагрузки. При этом срок службы не превышает 1500 часов при правильной эксплуатации машины и своевременном выполнении регламентных работ.

Основными характеристиками авиационных генераторов постоянного тока являются: *характеристика холостого хода, характеристика короткого замыкания, внешняя, регулировочная, нагрузочная характеристики.*

Характеристика холостого хода $E_0 = f(I_B)$ – это зависимость ЭДС генератора E_0 от тока возбуждения I_B при постоянной частоте вращения $n = const$ и токе нагрузки I , равном нулю.

Особенность *характеристики холостого хода* авиационного генератора постоянного тока состоит в наличии на его зажимах при $I_B = 0$ остаточной ЭДС $E_{ост}$, обусловленной остаточной намагниченностью индуктора генератора, что является необходимым условием для самовозбуждения генератора.

Характеристика холостого хода используется для определения степени насыщения магнитной цепи генератора и для построения других его характеристик. Например, по *характеристике холостого хода* и *вольт-амперной характеристике* цепи возбуждения генератора $I_B \cdot R_B = f(I_B)$, построенной для номинального сопротивления $R_{вном} = U_{ном} / I_{вном}$ (где $I_{вном}$ – номинальный ток возбуждения), можно определить *номинальное процентное изменение напря-*

жения генератора при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной (рис. 1.1):

$$\Delta U_{НОМ}\% = \frac{U_0 - U_{НОМ}}{U_{НОМ}} \cdot 100\% = \frac{\Delta U_{НОМ}}{U_{НОМ}} \cdot 100\% ,$$

где U_0 – напряжение генератора при холостом ходе;
 $U_{НОМ}$ – номинальное напряжение генератора.

Для авиационных генераторов постоянного тока с параллельным возбуждением $\Delta U_{НОМ}\%=(30...40)\%$ без компенсационной обмотки и $\Delta U_{НОМ}\%=(20...30)\%$ с компенсационной обмоткой.

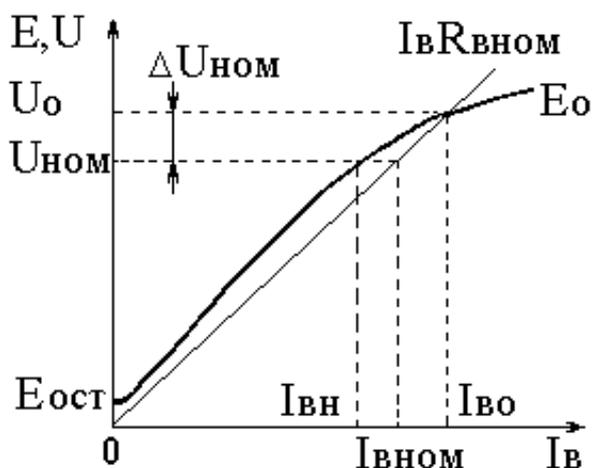


Рис. 1.1. Характеристика холостого хода генератора и вольт-амперная характеристика цепи возбуждения. Определение изменения напряжения

Характеристика короткого замыкания $I_{ак} = f(I_{в})$ – это зависимость тока якоря при коротком замыкании $I_{ак}$ от тока возбуждения $I_{в}$ при напряжении на зажимах генератора $U = 0$ и постоянной частоте вращения $n = const$. Характеристика короткого замыкания (рис. 1.2) авиационного генератора постоянного тока снимается по схеме с независимым возбуждением.

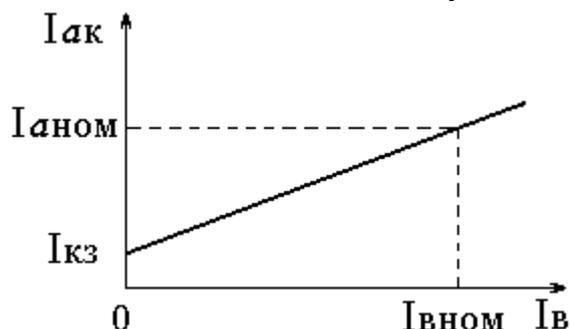


Рис. 1.2. Характеристика короткого замыкания генератора

Опыт короткого замыкания проводится при пониженном напряжении, таком, чтобы ток якоря не превышал номинального значения $I_{аном}$. При этом

магнитная цепь генератора не насыщена, и характеристика короткого замыкания представляет собой прямую линию. При $I_B = 0$ величина тока

$$I_{кз} = E_{ост} / R_a ,$$

где R_a – сопротивление цепи якоря.

Внешняя характеристика $U = f(I)$ – это зависимость напряжения U на зажимах генератора от тока нагрузки I при постоянном сопротивлении цепи возбуждения $R_B = const$ и постоянной частоте вращения $n = const$.

Принимая для авиационного генератора постоянного тока $I \approx I_a$ (так как $I_B \ll I_a$), *внешнюю характеристику* представим в виде $U = f(I_a)$.

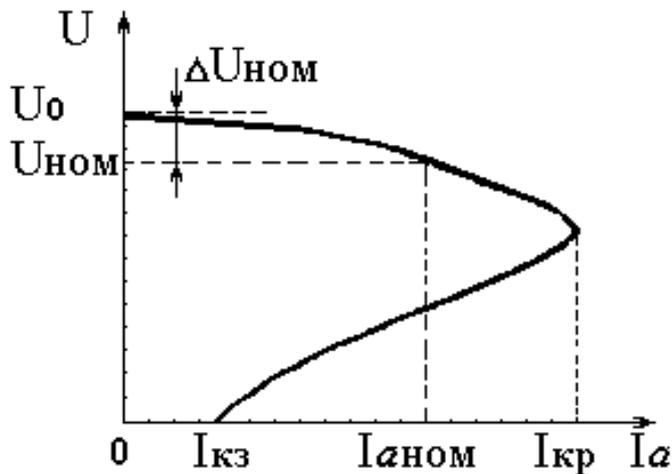


Рис. 1.3. Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения

При уменьшении сопротивления нагрузки (увеличении тока нагрузки) напряжение авиационного генератора постоянного тока снижается, что объясняется тремя причинами: увеличением внутреннего падения напряжения ($I_a \cdot R_a$), размагничивающим влиянием МДС реакции якоря и уменьшением тока возбуждения (рис. 1.3). Ток якоря при этом возрастает до критического значения $I_{кр}$. Дальнейшее уменьшение сопротивления нагрузки приводит к уменьшению тока, так называемому «опрокидыванию» *внешней характеристики* из-за размагничивания магнитной цепи генератора.

При напряжении на зажимах генератора $U=0$ по обмотке якоря протекает ток короткого замыкания $I_{кз}$, обусловленный наличием потока остаточного намагничивания.

Регулировочная характеристика $I_B = f(I)$ – зависимость тока возбуждения I_B от тока нагрузки I при постоянном (номинальном) напряжении $U = U_{ном}$ и постоянной частоте вращения $n = const$ (рис. 1.4).

Регулировочная характеристика показывает, как нужно изменять ток возбуждения при изменении тока нагрузки для поддержания постоянного напряжения.

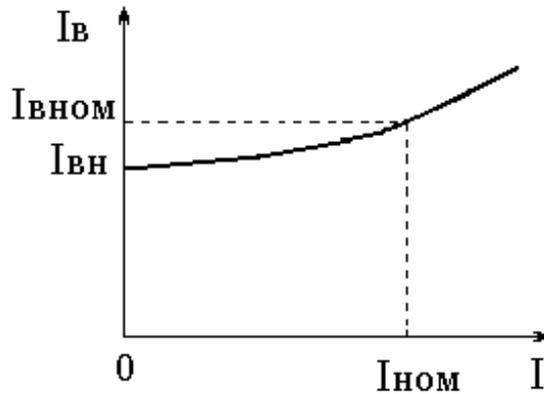


Рис. 1.4. Регулировочная характеристика авиационного генератора постоянного тока

Нелинейный характер зависимости $I_{в} = f(I)$ объясняется необходимостью компенсировать не только падение напряжения в цепи якоря $I_a \cdot R_a$, но и размагничивающее влияние МДС реакции якоря.

Нагрузочная характеристика $U = f(I_{в})$ – зависимость напряжения на зажимах генератора U от тока возбуждения $I_{в}$ при неизменном токе нагрузки $I = const$ и постоянной частоте вращения $n = const$.

Частным случаем *нагрузочной характеристики* является характеристика холостого хода $E_0 = f(I_{в})$, для которой ток нагрузки $I = 0$.

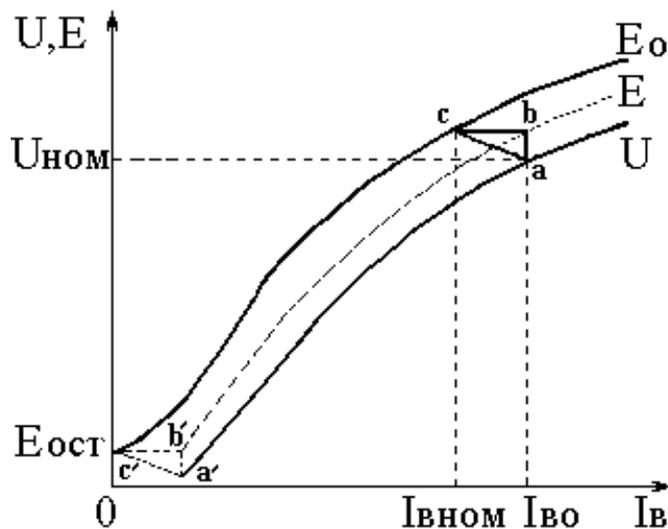


Рис. 1.5. Построение характеристического треугольника по характеристике холостого хода и нагрузочной характеристике

Если к ординатам *нагрузочной характеристики* (значениям U) прибавить падение напряжения в цепи якоря ($I_a \cdot R_a$), получим *внутреннюю характеристику* $E = f(I_{в})$ – зависимость ЭДС генератора $E = U + I_a \cdot R_a$ от тока возбуждения $I_{в}$.

По *характеристике холостого хода и нагрузочной характеристике* можно построить так называемый характеристический треугольник (рис. 1.5). Катет треугольника $|ab|$ равен падению напряжения в цепи якоря ($I_a \cdot R_a$), катет $|bc|$ – МДС реакции якоря (в масштабе тока возбуждения), гипотенуза $|ac|$ пропорциональна току нагрузки. Падение напряжения, равное разности ординат характеристик $|E_0 - E|$, вызывается размагничивающим действием реакции якоря.

Основные расчетные соотношения:

1) ЭДС машины постоянного тока

$$E = c_e \cdot n \cdot \Phi \quad \text{или} \quad E = c_m \cdot \Omega \cdot \Phi; \quad (1.1)$$

2) уравнение для напряжения на зажимах генератора

$$U = E - I_a \cdot R_a; \quad (1.2)$$

3) ток якоря генератора

$$I_a = I + I_B, \quad (1.3)$$

где I – ток нагрузки;

4) ток возбуждения

$$I_B = \frac{U}{R_B} = \frac{U}{R_{OB} + R_{BГ}}, \quad (1.4)$$

где $R_B, R_{OB}, R_{BГ}$ – сопротивления цепи возбуждения, обмотки возбуждения, добавочное сопротивление в цепи возбуждения генератора;

5) электромагнитный момент

$$M = c_m \cdot \Phi \cdot I_a; \quad (1.5)$$

6) электромагнитная мощность

$$P_{ЭМ} = E \cdot I_a = M \cdot \Omega; \quad (1.6)$$

7) уравнение равновесия моментов на валу генератора

$$M_1 = M_0 + M, \quad (1.7)$$

где M_1 – момент приводного двигателя;

M_0 – момент холостого хода генератора;

8) коэффициент полезного действия

$$\eta = P_2 / P_1, \quad (1.8)$$

где $P_1 = P_0 + P_{ЭМ}$ – подведенная мощность;

P_0 – мощность холостого хода;

$P_2 = U \cdot I$ – полезная мощность.

1.2. Описание лабораторной установки

Экспериментальное исследование характеристик авиационного генератора постоянного тока параллельного возбуждения производится на лаборатор-

ной установке, принципиальная электрическая схема которой представлена на рис. 1.6.

Испытуемый генератор **G** приводится во вращение двигателем параллельного возбуждения **M**, частота вращения которого регулируется реостатом **Рвд**. Контроль частоты вращения осуществляется датчиком **BR** частоты вращения (тахогенератором), на зажимы которого включен указательный прибор – вольтметр **Vн**. Реостат **Рвг** предназначен для регулирования тока возбуждения генератора. С помощью выключателя **Q2** к генератору подключается нагрузка **Rн**.

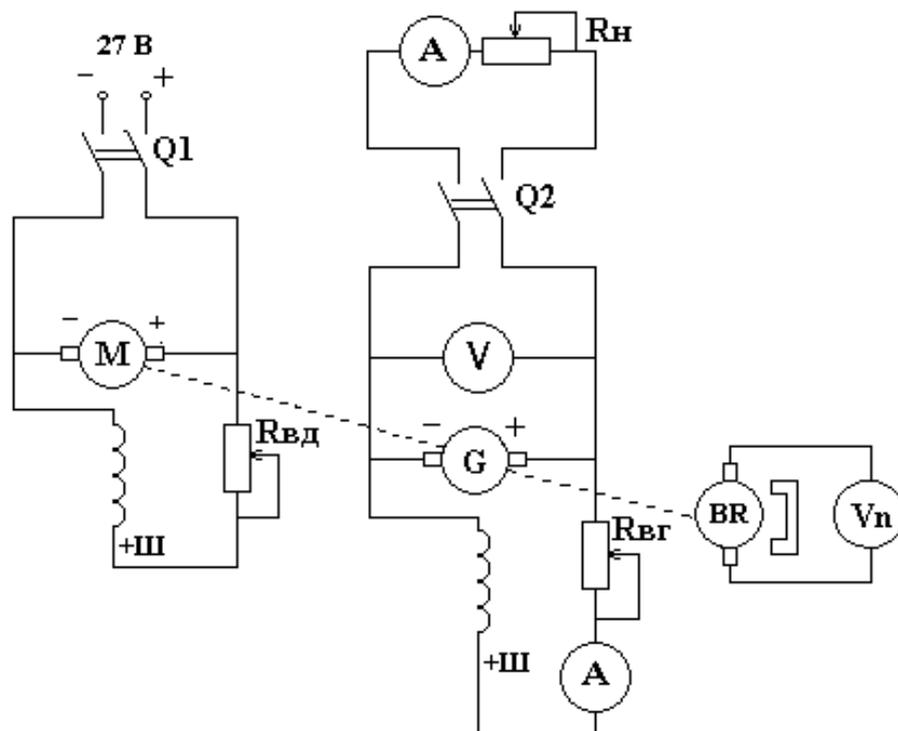


Рис. 1.6. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки

1.3. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой, записать номинальные данные исследуемого генератора.

2. Снять *характеристику холостого хода* $E_0 = f(I_b)$ при $n = const$ и $I = 0$.

Характеристика снимается по схеме рис. 1.6 при разомкнутом выключателе **Q2**. Первый замер производится при разомкнутой цепи возбуждения. Затем, замкнув цепь, увеличивают ток возбуждения, пока ЭДС не достигнет величины $(1,2...1,25) \cdot U_{ном}$. Далее производят замеры для тех же значений тока возбуждения, уменьшая ЭДС. Таким образом снимаются восходящая (\uparrow) и нисходящая (\downarrow) ветви характеристики холостого хода; практически в качестве *характеристики холостого хода* принимают среднюю линию, проведенную между этими ветвями.

Примечание 1.2. Для расчета мощности $P_1 = P_{эм} + P_0$ необходимо знать мощность холостого хода P_0 . Так как при $n = const$ для генератора постоянного тока $P_0 = const$, ее величину можно определить из паспортных данных генератора для номинального режима работы:

$$P_0 = P_{1ном} - E_{ном} \cdot I_{аном} = const, \text{ где } P_{1ном} = P_{1ном} / \eta_{ном}.$$

4. Снять *регулирующую характеристику* $I_B = f(I)$ при $U_{ном} = const$ и $n = const$.

При холостом ходе и номинальной частоте вращения установить ток возбуждения (I_B), при котором напряжение на зажимах генератора равно номинальному ($U_{ном}$); затем, поддерживая частоту вращения постоянной, постепенно увеличивать ток нагрузки генератора до номинального, одновременно регулируя ток возбуждения так, чтобы напряжение на зажимах генератора оставалось неизменным. Полученные данные занести в табл. 1.3.

Таблица 1.3

$U = U_{ном}, В$	$I, А$	$I_B, А$	$n, об/мин$	Примечание
				Ток нагрузки увеличивать не более, чем до $1,1 \cdot I_{ном}$

5. Снять *нагрузочную характеристику* $U = f(I_B)$ при $I = const$ и $n = const$.

При заданной частоте вращения, регулируя ток возбуждения генератора, получить напряжение $U = 1,1 \cdot U_{ном}$. Затем, подключив сопротивление нагрузки, установить нужный ток $I = (0,5...1) \cdot I_{ном}$. Далее, уменьшая сопротивление нагрузки, необходимо так уменьшать ток возбуждения, чтобы ток нагрузки оставался постоянным. Данные полученных измерений и вычислений занести в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Измерено				Вычислено	
$U, В$	$I, А$	$I_B, А$	$n, об/мин$	$I_a, А$	$E = U + I_a \cdot R_a, В$

1.4. Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Номинальные данные генератора.
3. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки.
4. Таблицы измерений и вычислений.
5. Характеристики: *холостого хода, внешняя, регулировочная, нагрузочная*; зависимость $\eta = f(I)$.

1.5. Контрольные вопросы

1. Каковы особенности конструкции авиационных генераторов постоянного тока?
2. Каковы преимущества и недостатки генераторов параллельного возбуждения по сравнению с генераторами независимого возбуждения?
3. Сформулируйте условия самовозбуждения авиационного генератора постоянного тока и поясните процесс самовозбуждения.
4. Как определить величину установившегося тока короткого замыкания генератора параллельного возбуждения? Почему при различных частотах вращения токи короткого замыкания авиационного генератора постоянного тока не остаются постоянными.
5. Как влияет наличие обмотки дополнительных полюсов на величину установившегося тока короткого замыкания авиационного генератора постоянного тока?
6. Перечислите и поясните причины снижения напряжения при переходе от холостого хода к номинальной нагрузке авиационного генератора постоянного тока (по внешней характеристике).
7. Что такое критический ток $I_{кр}$? Поясните причину «опрокидывания» внешней характеристики авиационного генератора постоянного тока.
8. Чем объясняется различная крутизна регулировочных характеристик авиационного генератора постоянного тока при различных частотах вращения?
9. Почему в авиационном генераторе постоянного тока его обмотка возбуждения включается по схеме «с общим минусом»?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Цель работы: ознакомление с конструкцией двигателя постоянного тока параллельного возбуждения, изучение способов пуска, сравнение способов регулирования частоты вращения, получение опытным путем характеристик двигателя.

2.1. Основные положения

Авиационные двигатели постоянного тока выполняются с независимым, параллельным, последовательным и смешанным возбуждением.

Двигатели параллельного возбуждения используются в устройствах, требующих поддержания практически постоянной частоты вращения или регулирования ее в широком диапазоне (например, в приводах топливных насосов). Конструктивно авиационные двигатели параллельного возбуждения подобны авиационным генераторам параллельного возбуждения.

Основные соотношения:

1) напряжение на зажимах двигателя

$$U = E + I_a \cdot R_a ; \quad (2.1)$$

2) ток якоря двигателя

$$I_a = \frac{U - E}{R_a} = \frac{U - c_e \cdot n \cdot \Phi}{R_a} ; \quad (2.2)$$

3) ток, потребляемый двигателем из сети

$$I = I_a + I_B ; \quad (2.3)$$

4) частота вращения двигателя

$$n = \frac{U - I_a \cdot R_a}{c_e \cdot \Phi} ; \quad (2.4)$$

5) угловая скорость двигателя

$$\Omega = \frac{2\pi \cdot n}{60} ; \quad (2.5)$$

б) коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma \Delta P}{P_1} , \quad (2.6)$$

где $P_1 = U \cdot I$ – подведенная мощность; (2.7)

$P_2 = 1 - \Sigma \Delta P$ – полезная мощность; (2.8)

$\Sigma \Delta P = P_0 + \Delta P_{\text{эла}} + \Delta P_{\text{в}}$ – сумма потерь; (2.9)

$P_0 = \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{мг}} = E_0 \cdot I_{a0} \approx U_{\text{ном}} \cdot I_{a0}$ – мощность холостого хода; (2.10)

$\Delta P_{\text{эла}} = I_a^2 \cdot R_a$ – электрические потери в цепи якоря; (2.11)

$\Delta P_{\text{в}} = U \cdot I_B$ – потери на возбуждение; (2.12)

$\Delta P_{\text{мех}}, \Delta P_{\text{мг}}$ – механические и магнитные потери;

7) уравнение равновесия моментов

$$M = M_0 + M_2, \quad (2.13)$$

$$\text{где } M_0 = P_0 / \Omega_{\text{ном}} - \text{момент холостого хода двигателя}; \quad (2.14)$$

$$M_2 = P_2 / \Omega_{\text{ном}} - \text{момент нагрузки}. \quad (2.15)$$

Характерной особенностью запуска авиационных электрических двигателей постоянного тока является непосредственное включение их на напряжение сети, то есть без применения пусковых реостатов. Возможность прямого пуска обусловлена тем, что двигатели небольшой мощности, в том числе авиационные, имеют относительно большое сопротивление обмотки якоря, поэтому их начальный пусковой ток $I_{\text{ап}} = U / R_a$ относительно невелик, и кратность пускового тока $K_{\text{п}} = (I_{\text{ап}} / I_{\text{ном}}) \leq (5 \dots 6)$. При большей величине $K_{\text{п}}$ с целью ограничения начального пускового тока $I_{\text{ап}}$ в цепь якоря вводится пусковое сопротивление $R_{\text{п}}$:

$$I_{\text{ап}} = U / (R_a + R_{\text{п}}).$$

Для получения максимального пускового момента $M_{\text{п}} = c_m \cdot \Phi \cdot I_{\text{ап}}$ при заданном ограниченном $I_{\text{ап}}$ необходимо запускать двигатель при максимальном магнитном потоке, то есть при полностью выведенном реостате $R_{\text{вд}}$ в цепи возбуждения.

Понижение напряжения на зажимах двигателя параллельного возбуждения при пуске приводит к уменьшению не только тока якоря, но и магнитного потока. Пусковой момент при этом значительно снижается.

Свойства двигателей постоянного тока описываются следующими основными характеристиками: холостого хода, регулировочной, рабочими (скоростной, моментной и характеристикой КПД), механической.

Характеристика холостого хода $E_0 = f(I_{\text{в}})$ – это зависимость (рис. 2.5) ЭДС двигателя E_0 от тока возбуждения $I_{\text{в}}$ при постоянной частоте вращения $n_{\text{ном}} = \text{const}$, постоянном номинальном напряжении $U = U_{\text{ном}} = \text{const}$ и при отсутствии нагрузки на валу двигателя.

Регулировочная характеристика $I_{\text{в}} = f(I_{\text{а}})$ – это зависимость (рис. 2.1) тока возбуждения $I_{\text{в}}$ от тока якоря $I_{\text{а}}$ при номинальных значениях напряжения $U = U_{\text{ном}} = \text{const}$ и частоты вращения $n = n_{\text{ном}} = \text{const}$.

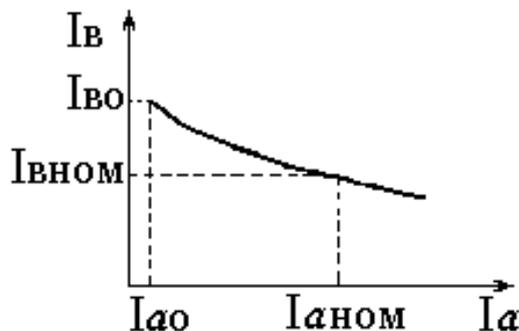


Рис. 2.1. Регулировочная характеристика двигателя параллельного возбуждения

Регулировочная характеристика показывает, как следует изменять ток I_b при изменении тока I_a с целью поддержания постоянной частоты вращения.

Рабочие характеристики двигателя постоянного тока параллельного возбуждения – это зависимости $n = f(I_a)$ – *скоростная характеристика*, $M = f(I_a)$ – *моментная характеристика*; $\eta = f(I_a)$ – *характеристика КПД*, показанные на рис. 2.2 и снятые при $U = U_{ном} = const$ и $I_b = I_{вном} = const$.

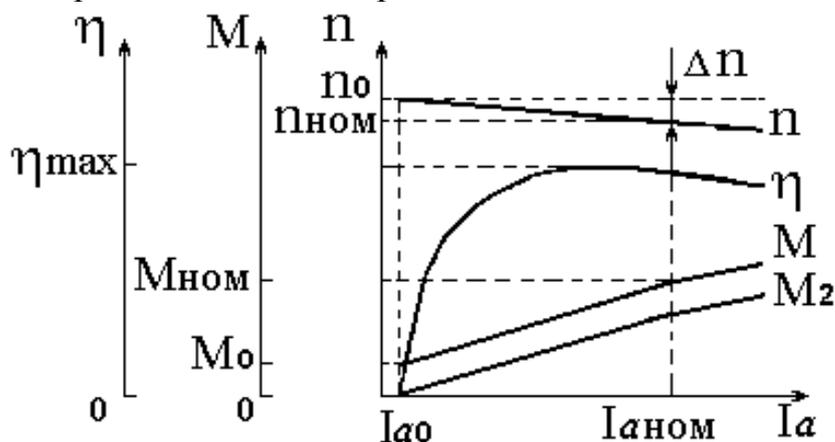


Рис. 2.2. Рабочие характеристики двигателя параллельного возбуждения

На скоростную характеристику оказывает влияние два фактора – падение напряжения в якорной цепи ($I_a \cdot R_a$) и размагничивающее действие поперечной реакции якоря. Скоростная характеристика в общем случае (выражение (2.4)) может иметь возрастающий (преобладание размагничивающего влияния реакции якоря) или падающий (преобладание падения напряжения в цепи якоря) характер. Работа двигателя устойчива только при падающей скоростной характеристике.

По скоростной характеристике двигателя параллельного возбуждения можно определить *номинальное изменение частоты вращения* $\Delta n\%$ при переходе от холостого хода к номинальной нагрузке при номинальном напряжении на зажимах двигателя:

$$\Delta n\% = \frac{n_0 - n_{ном}}{n_{ном}} \cdot 100\% = \frac{\Delta n_{ном}}{n_{ном}} \cdot 100\% , \quad (2.16)$$

где n_0 – частота вращения при холостом ходе двигателя.

Скоростная характеристика авиационных двигателей параллельного возбуждения называется «жесткой». Для таких двигателей $\Delta n\% = (2...15)\%$.

Моментная характеристика несколько отличается от прямой, так как при постоянстве тока возбуждения магнитный поток с увеличением нагрузки будет несколько уменьшаться вследствие размагничивающего действия реакции якоря.

Зависимость КПД от тока якоря может быть получена расчетным путем (формулы (2.6)...(2.12)). Наибольшее значение КПД имеет при равенстве постоянных и переменных потерь: $P_0 + U \cdot I_B = I_a^2 \cdot R_a$.

Механическая характеристика $n = f(M)$ – зависимость частоты вращения двигателя n от электромагнитного момента M при $U = U_{ном} = const$, $I_B = const$ и постоянном сопротивлении якорной цепи $R_{ца} = const$.

Если с целью регулирования частоты вращения в цепь якоря вводится добавочное сопротивление ($R_{ца} = R_a + R_d$), то выражение скоростной характеристики принимает вид:

$$n = \frac{U - I_a(R_a + R_d)}{c_e \cdot \Phi}. \quad (2.17)$$

Если пренебречь током якоря при холостом ходе ($I_{a0} \approx 0$), то получим значение частоты вращения идеального холостого хода:

$$n_0 = \frac{U}{c_e \cdot \Phi}. \quad (2.18)$$

При нагрузке частота вращения уменьшается на величину

$$\Delta n = \frac{I_a(R_a + R_d)}{c_e \cdot \Phi}, \quad (2.19)$$

причем уменьшение частоты вращения тем больше, чем больше ток якоря и добавочное сопротивление.

Если в выражение (2.19) подставить значение тока $I_a = M / (c_m \cdot \Phi)$, получим уравнение *механической характеристики*:

$$n = \frac{U}{c_e \cdot \Phi} - \frac{M(R_a + R_d)}{c_e \cdot c_m \cdot \Phi^2}. \quad (2.20)$$

На рис. 2.3 приведены *механические характеристики* – *естественная* при $R_d = 0$ и *искусственные* при различных значениях $R_{д2} > R_{д1} > 0$. Пунктиром показаны *механические характеристики* при отсутствии размагничивающего действия реакции якоря.

Частота вращения, соответствующая *естественной механической характеристике*, называется основной. Как видно из выражения (2.17), частоту вращения двигателя постоянного тока можно регулировать изменением:

- а) сопротивления цепи якоря – «вниз» от основной частоты вращения;
- б) магнитного потока – «вниз» и «вверх» от основной;
- в) напряжения – также «вниз» и «вверх» от основной.

Последний способ применяется при наличии регулируемого источника питания.

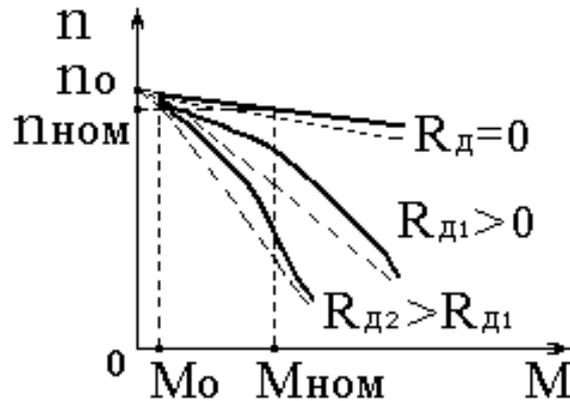


Рис. 2.3. Механические характеристики двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

2.2. Описание лабораторной установки

Объектом испытаний является авиационный двигатель параллельного возбуждения **М**. На одном валу с ним находится датчик частоты вращения – магнитоэлектрический тахогенератор **ВР**, подключенный к указательному прибору – вольтметру **V_п**, и электромагнитный тормоз **Y**, предназначенный для создания момента нагрузки на валу двигателя. Реостаты **R_п**, **R_д**, **R_{вд}**, **R_т** являются пуско-регулирующей аппаратурой.

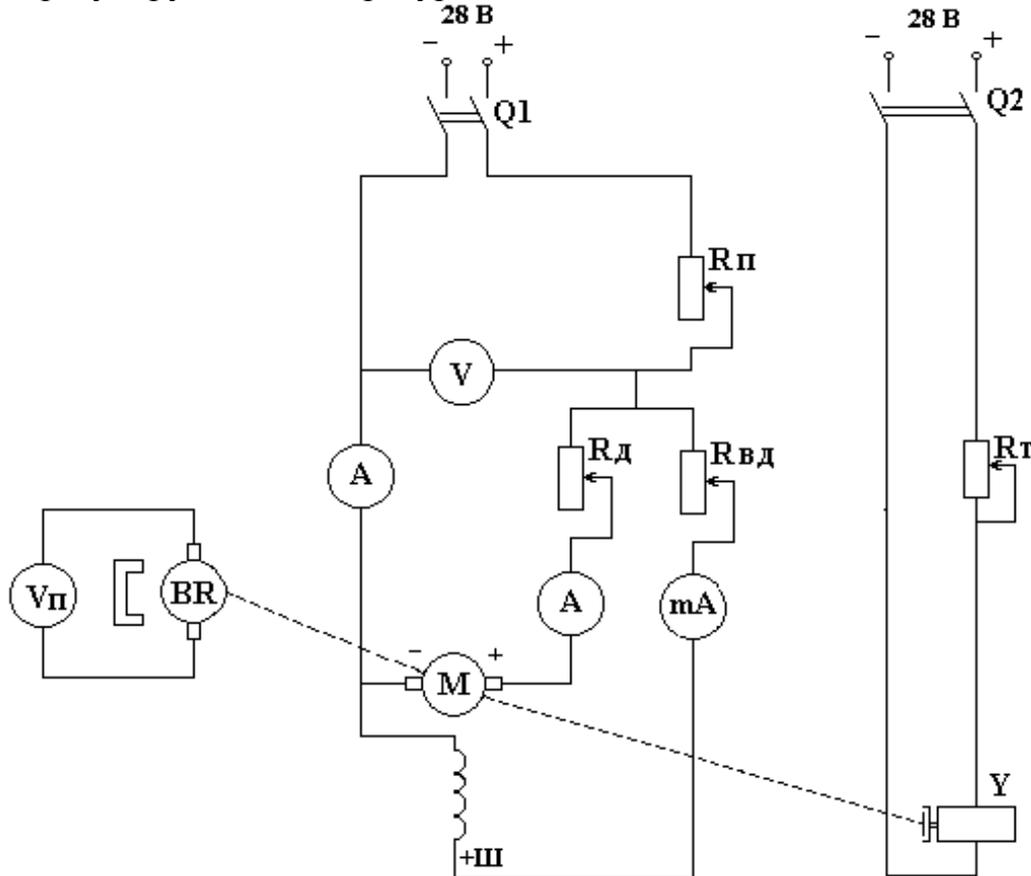


Рис. 2.4. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки

2.3. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой, записать номинальные данные двигателя.

2. Снять *характеристику холостого хода* $E_0 = f(I_B)$.

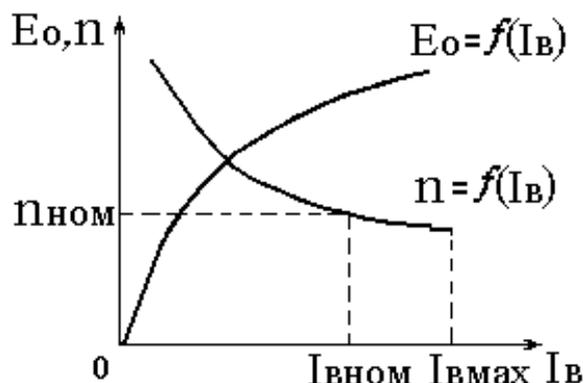


Рис. 2.5. Характеристика холостого хода двигателя параллельного возбуждения

Реостат $R_{вд}$ в цепи возбуждения двигателя должен быть полностью выведен, что соответствует максимальному току возбуждения $I_{Bмаx}$. Затем, постепенно увеличивая сопротивление цепи возбуждения, получить зависимость $n = f(I_B)$ при $U_{ном} = const$. Опыт проводить до частоты вращения не более $2 \cdot n_{ном}$.

Данные измерений и вычислений занести в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Измерено			Вычислено			
I_{a0} , А	I_B , А	Vn , В	n , об/мин	$E_0' = U - I_{a0} \cdot R_{at}$, В	E_0 , В	P_0 , Вт

Примечание 2.1:

а) значения n , об/мин = $Vn \cdot 1000 / 6$;

б) при расчетах использовать значение сопротивления R_{at} , приведенное к рабочей температуре (*Примечание 1.1* лабораторной работы №1);

в) значения ЭДС E_0 , соответствующие номинальной частоте вращения, определяются выражением $E = E_0' \cdot (n_{ном} / n)$, где E_0' – ЭДС при измеренной частоте вращения n ;

г) мощность холостого хода P_0 вычисляется по формуле (2.10).

3. Снять *регулировочную характеристику* $I_B = f(I_a)$ при $n_{ном} = const$, $U_{ном} = const$.

Характеристику начинают снимать с холостого хода, ток якоря при этом равен I_{a0} (рис. 2.1). Затем, постепенно нагружая двигатель, ток возбуждения уменьшают так, чтобы частота вращения оставалась постоянной.

Данные измерений заносятся в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Измерено			Вычислено
I_a, A	I_b, A	V_n, B	$n, \text{об/мин}$

4. Снять *рабочие характеристики*: $n = f(I_a)$, $M = f(I_a)$ при $U_{\text{ном}} = \text{const}$, $I_{\text{вном}} = \text{const}$.

Первый замер производится при холостом ходе, затем при помощи электромагнитного тормоза Y нагрузка двигателя увеличивается до номинальной. Данные заносятся в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Измерено				Вычислено								
U, B	I_a, A	I_b, A	V_n, B	I, A	$n, \text{об/мин}$	$P_1, Bт$	$\Sigma \Delta P, Bт$	$P_2, Bт$	$M_0, Hм$	$M_2, Hм$	$M, Hм$	η

Примечание 2.2. Зависимость $\eta = f(I_a)$ рассчитывается по формуле (2.6).

5. Снять *механические характеристики* $n = f(M)$ при $U = U_{\text{ном}} = \text{const}$ и $R_{\text{ца}} = \text{const}$ для следующих значений добавочного сопротивления в цепи якоря двигателя: $R_d = 0$, $R_{d1} = 2,5 \cdot R_{at}$, $R_{d2} = 5 \cdot R_{at}$. Данные занести в табл. 2.4.

2.4. Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Номинальные данные двигателя.
3. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки.
4. Таблицы измерений и вычислений.
5. График зависимости потерь холостого хода от частоты вращения $P_0 = f(n)$.

6. Характеристики: *холостого хода, регулировочная, рабочие, механические.*

7. Краткие выводы по работе.

Таблица 2.4

Измерено			Вычислено									
I_a , А	I_b , А	V_n , В	I , А	n , об/мин	P_1 , Вт	$\Sigma\Delta P$, Вт	P_2 , Вт	M_0 , Нм	M_2 , Нм	M , Нм	η	Примечание
												$R_d = 0$
												$R_{d1} = 2,5 \cdot Rat$
												$R_{d2} = 5 \cdot Rat$

2.5. Контрольные вопросы

1. Почему при пуске с увеличением частоты вращения двигателя уменьшается потребляемый им ток?

2. В каком положении должен находиться ползунок реостата $R_{вд}$ в цепи возбуждения двигателя при пуске?

3. Как обеспечить постоянство частоты вращения двигателя параллельного возбуждения при увеличении его момента нагрузки?

4. В каком случае частота вращения двигателя параллельного возбуждения может достичь недопустимой величины? Как при этом изменится ток якоря двигателя?

5. Как повлияет на работу двигателя параллельного возбуждения изменение полярности питающего напряжения? К чему приводит на практике такое нарушение?

6. Как регулируется частота вращения двигателя параллельного возбуждения «вверх» от основной? Какие процессы происходят при этом в машине?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3 ИССЛЕДОВАНИЕ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Цель работы: ознакомление с конструктивным исполнением двигателя постоянного тока последовательного возбуждения, изучение свойств двигателя путем опытного получения его основных характеристик.

3.1. Основные положения

Двигатель последовательного возбуждения имеет обмотку возбуждения, включенную последовательно с обмоткой якоря, поэтому его основной магнитный поток зависит от тока нагрузки.

При ненасыщенной магнитной системе двигатель обладает свойством развивать вращающий момент, пропорциональный квадрату тока нагрузки. Благодаря этому свойству двигатели последовательного возбуждения применяются в установках, требующих значительного пускового момента (например, в электростартерах для запуска авиационных двигателей), а также в реверсивных приводах управления различными механизмами.

Реакция якоря двигателя последовательного возбуждения при пуске не оказывает размагничивающего действия, так как магнитная цепь машины сильно насыщена пусковым током, являющимся в то же время током обмотки возбуждения.

Двигатели последовательного возбуждения, используемые в реверсивном приводе, выполняются с двумя обмотками возбуждения, называемыми обмотками левого «Л» и правого «П» вращения. При переключении питающего напряжения с одной обмотки на другую изменяется направление тока якоря и знак вращающего момента (рис. 3.1).

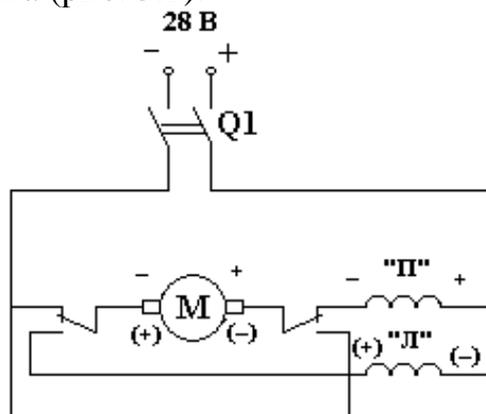


Рис. 3.1. Реверсивный двигатель постоянного тока последовательного возбуждения

Для изучения свойств двигателя постоянного тока последовательного возбуждения необходимо иметь следующие его характеристики: *скоростную, механическую, рабочие.*

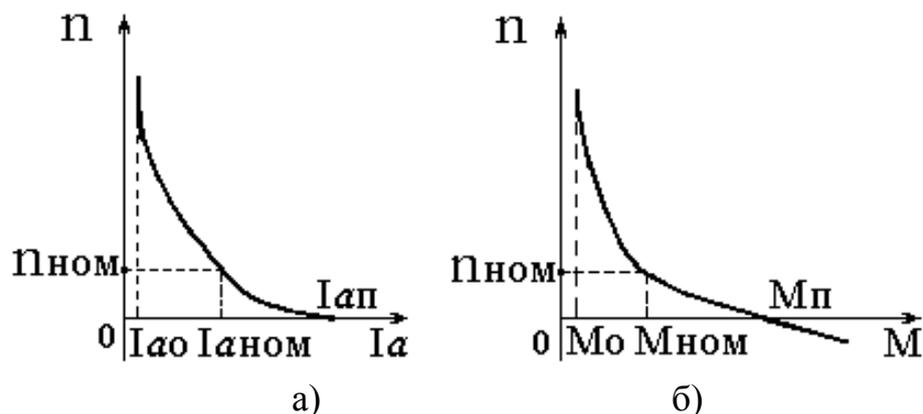


Рис. 3.2. Естественные характеристики двигателя последовательного возбуждения: а) скоростная; б) механическая

Естественные скоростная и механическая характеристики двигателя последовательного возбуждения представлены на рис. 3.2. Как видно из рисунка, частота вращения двигателя с изменением нагрузки изменяется в широких пределах, то есть характеристики являются «мягкими». С уменьшением нагрузки частота вращения резко возрастает и при моменте сопротивления, равном нулю, частота вращения теоретически равна бесконечности (так называемый «разнос») двигателя. Однако практически двигатель развивает момент $M=M_0$ (при токе якоря $I=I_{a0}$), обусловленный наличием механических и магнитных потерь холостого хода, при этом частота вращения превышает номинальную в три – четыре раза. Включение двигателя последовательного возбуждения без нагрузки недопустимо из-за возможных механических повреждений.

Механическая характеристика двигателя последовательного возбуждения (рис. 3.2, б) располагается в первом и четвертом квадрантах: в первом характеристика для двигательного режима, в четвертом – для режима *торможения противовключением*. В последнем случае ротор двигателя вращается исполнительным механизмом (например, опускающимся грузом) в сторону, противоположную направлению электромагнитного момента, ЭДС меняет знак, и выражение для тока якоря принимает вид:

$$I_a = \frac{U + E}{R_a + R_d}, \quad (3.1)$$

где $R_a = (R_{oa} + R_{ов})_t$ – сопротивление цепи якоря (обмотки якоря R_{oa} и обмотки возбуждения $R_{ов}$) при рабочей температуре;

R_d – добавочное сопротивление, ограничивающее ток якоря.

Механическая характеристика не проходит через второй квадрант. Это означает, что двигатель последовательного возбуждения в естественных условиях не может перейти в режим *рекуперативного торможения* ни при какой частоте вращения, так как при идеальном холостом ходе ($n=\infty, I_a=0$) противо-ЭДС, обусловленная потоком остаточного намагничивания, уравнивается

напряжение сети, то есть $E_{ост} + U = 0$, а для рекуперации энергии необходимо соблюдение неравенства $E_{ост} > U$.

На рис. 3.3 показаны *скоростные характеристики* двигателя постоянного тока последовательного возбуждения при различных значениях добавочного сопротивления в цепи якоря R_d .

При этом выражение для частоты вращения двигателя имеет вид:

$$n = \frac{U - I_a \cdot (R_a + R_d)}{c_e \cdot \Phi} \quad (3.2)$$

Это уравнение *искусственной скоростной характеристики*.

При $R_d=0$ получаем уравнение *естественной скоростной характеристики*:

$$n = \frac{U - I_a \cdot R_a}{c_e \cdot \Phi} \quad (3.3)$$

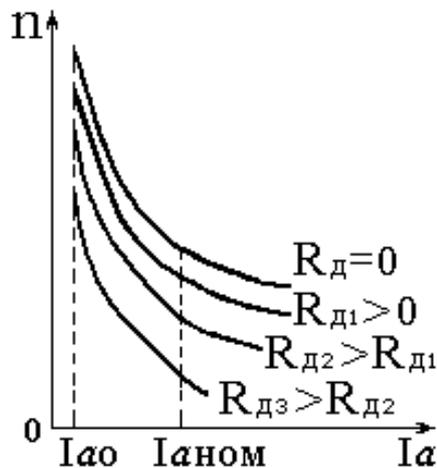


Рис. 3.3. Скоростные характеристики двигателя последовательного возбуждения при различных значениях добавочного сопротивления

Для получения *искусственных скоростных характеристик* возможно также применение шунтирующих сопротивлений, включаемых параллельно обмотке якоря или обмотке возбуждения. *Скоростная характеристика* двигателя при *шунтировании якоря* показана на рис. 3.4.

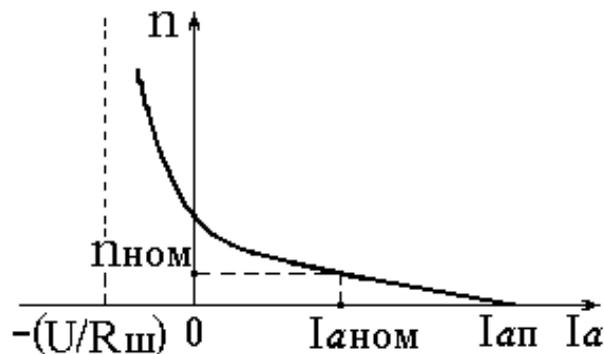


Рис. 3.4. Скоростная характеристика двигателя последовательного возбуждения с шунтированием якоря

Как видно из рисунка, двигатель постоянного тока последовательного возбуждения при идеальном холостом ходе ($I_a = 0$) имеет конечную частоту вращения. Он может быть переведен в *генераторный режим* с отдачей энергии в сеть, то есть в *режим рекуперативного торможения* (второй квадрант скоростной характеристики).

3.2. Описание лабораторной установки

Принципиальная электрическая схема лабораторной установки приведена на рис. 3.5.

Объектом испытаний является авиационный двигатель последовательного возбуждения **М**. На одном валу с двигателем расположены магнитоэлектрический тахогенератор **BR**, подключенный к указательному прибору – вольтметру **Vп**, и электромагнитный тормоз **Y**, предназначенный для загрузки испытуемого двигателя. Реостаты **Rд** и **Rш** предназначены для получения искусственных скоростных характеристик. С помощью реостата **Rт** осуществляется регулирование момента нагрузки двигателя.

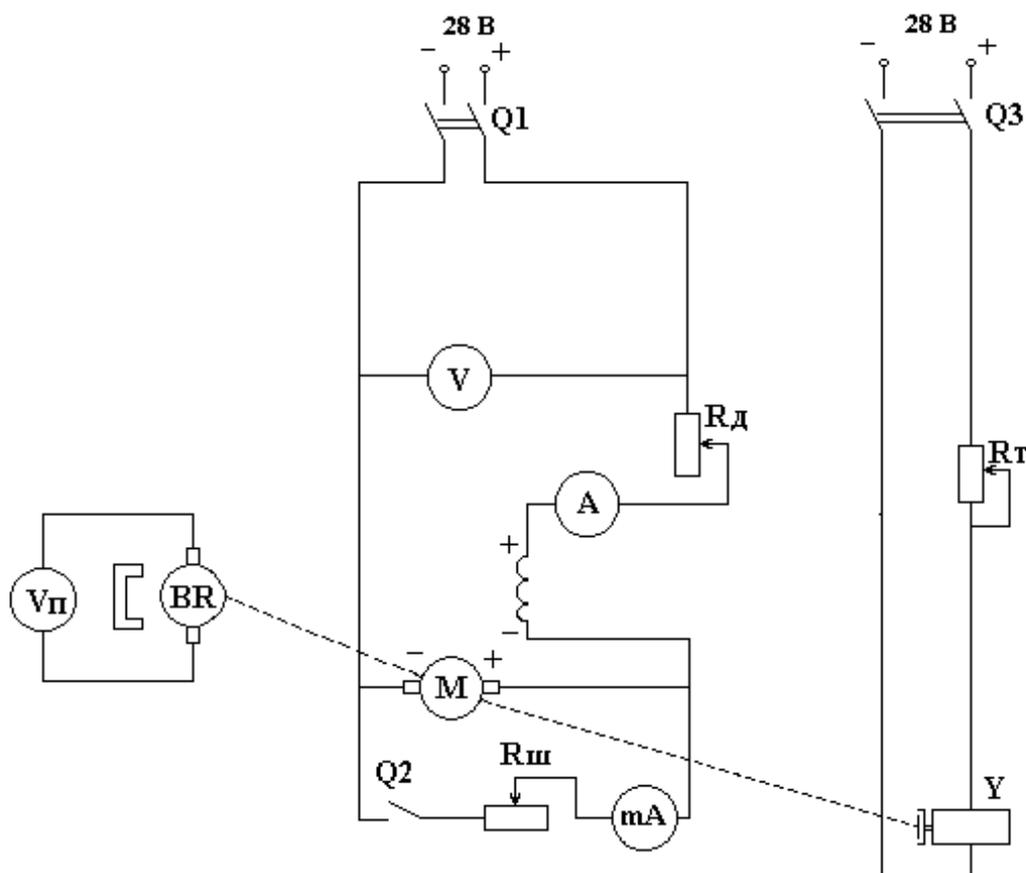


Рис. 3.5. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки

3.3. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой, записать номинальные данные испытуемого двигателя.

2. Определить зависимость потерь холостого хода двигателя от частоты вращения $P_0 = f(n)$ при $U = U_{ном} = const$. Для этого собрать схему рис. 3.6.

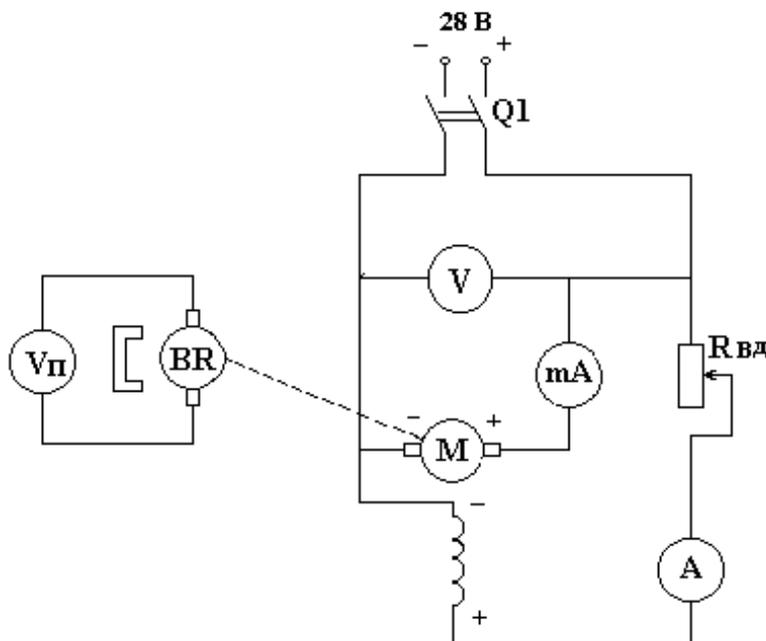


Рис. 3.6. Принципиальная электрическая схема для определения потерь холостого хода

Двигатель, не имеющий нагрузки на валу, включается при полностью выведенном регулировочном реостате $R_{вд}$. На зажимах якоря устанавливается номинальное напряжение и производится первый отсчет. Далее при условии $U_{ном} = const$ сопротивление цепи возбуждения постепенно увеличивается. С ослаблением магнитного потока частота вращения якоря возрастает. Опыт проводится до значений частоты вращения не более $2 \cdot n_{ном}$.

Данные измерений и вычислений заносятся в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Измерено				Вычислено	
$U_{ном}, В$	$I_{a0}, А$	$I_b, А$	$V_n, В$	$n, об/мин$	$P_0, Вт$

Мощность, потребляемая двигателем при холостом ходе, расходуется на покрытие механических и магнитных потерь (потерь в стали). Электрические потери в обмотках пренебрежимо малы.

Вычисление потерь холостого хода производится на основе соотношения:

$$P_0 = E_0 \cdot I_{a0} \approx U_{\text{ном}} \cdot I_{a0},$$

где I_{a0} – ток якоря при холостом ходе.

3. Снять *скоростные характеристики* $n = f(I_a)$ при $U_{\text{ном}} = \text{const}$:

а) *естественную* при $R_d = 0$;

б) *искусственную* при $R_d = R_a = \text{const}$;

в) *искусственную с шунтированием якоря* при $R_{\text{ш}} = 2 \cdot U_{\text{ном}} / I_{a\text{ном}}$ и $R_d = 0$.

На обмотку якоря подается номинальное напряжение ($R_d=0$), нагрузкой для двигателя служит электромагнитный тормоз Y . Первый отсчет производится при токе якоря двигателя $I_a = (1,2 \dots 1,3) \cdot I_{a\text{ном}}$. Затем нагрузка на валу уменьшается. Опыт проводится до достижения частоты вращения $n \approx 1,2 \cdot n_{\text{ном}}$. Данные заносятся в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Измерено			Вычислено				Примечание
$U=U_{\text{ном}}, \text{ В}$	$I=I_a, \text{ А}$	$Vn, \text{ В}$	$P_1, \text{ Вт}$	$\Sigma \Delta P, \text{ Вт}$	$P_2, \text{ Вт}$	$n, \text{ об/мин}$	
							а) $R_d = 0$
							б) $R_d = R_a$

При расчетах используются следующие соотношения:

- подведенная к двигателю мощность

$$P_1 = U \cdot I; \quad (3.4)$$

- полезная мощность на валу двигателя

$$P_2 = P_1 - \Sigma \Delta P; \quad (3.5)$$

- суммарные потери мощности

$$\Sigma \Delta P = P_0 + I_a^2 \cdot (R_a + R_d), \quad (3.6)$$

где P_0 – потери холостого хода, определяемые по графику зависимости $P_0 = f(n)$ для соответствующей частоты вращения.

Искусственная скоростная характеристика при введении в цепь якоря добавочного сопротивления $R_d = R_a$ снимается аналогично. Данные опыта записываются также в табл. 3.3.

Искусственная скоростная характеристика с шунтированием якоря снимается при замкнутом выключателе **Q2** по описанной выше методике. Для вычисления суммарных потерь используется соотношение:

$$\sum \Delta P = P_0 + I^2 \cdot R_{\text{овт}} + I_a^2 \cdot R_{\text{оат}} + I_{\text{ш}}^2 \cdot R_{\text{ш}}, \quad (3.7)$$

где ток двигателя $I = I_a + I_{\text{ш}}$ и $I_{\text{ш}}$ – ток шунта.

Данные измерений и вычислений записываются в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Измерено				Вычислено					Примечание
$U=U_{\text{ном}}$, В	I , А	$I_{\text{ш}}$, А	Vn , В	I_a , А	P_1 , Вт	$\Sigma \Delta P$, Вт	P_2 , Вт	n , об/мин	
									$R_{\text{ш}} = 2 \cdot U_{\text{ном}} / I_{\text{аном}} =$ $= \text{ Ом}$ $R_d = 0$

4. Рабочие и механическая характеристики: $n = f(I_a)$, $M = f(I_a)$, $\eta = f(I_a)$ и $n = f(M)$ при $U_{\text{ном}} = \text{const}$ и $R_d = 0$.

Характеристики строятся по данным опыта п. 3, а.

Вычисления проводятся по следующим формулам:

- полезный момент двигателя

$$M_2 = P_2 / \Omega, \quad (3.8)$$

где $\Omega = 2\pi \cdot n / 60$ – угловая скорость двигателя;

- электромагнитный момент

$$M = M_2 + M_0, \quad (3.9)$$

где $M_0 = P_0 / \Omega$ – момент холостого хода;

- коэффициент полезного действия

$$\eta = (P_2 / P_1) \cdot 100\%. \quad (3.10)$$

Данные измерений и вычислений записываются в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Измерено			Вычислено						Примечание
$U=U_{ном}, В$	$I=I_a, А$	$Vn, В$	$n, об/мин$	$\Omega, рад/с$	$M_2, Нм$	$M_0, Нм$	$M, Нм$	$\eta, \%$	
									Данные измерений – из табл. 3.2,а

3.4. Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Номинальные данные двигателя.
3. Схемы проведения опытов.
4. Таблицы измерений и вычислений.
5. График зависимости потерь холостого хода от частоты вращения $P_0 = f(n)$.
6. Скоростные характеристики: естественная и искусственные – с добавочным сопротивлением и шунтированием якоря.
7. Рабочие характеристики.
8. Механическая характеристика.
9. Выводы по работе.

3.5. Контрольные вопросы

1. Какие требования предъявляются к нагрузке двигателя последовательного возбуждения?
2. Что такое естественная механическая характеристика?
3. Как включается добавочное сопротивление для увеличения (уменьшения) частоты вращения двигателя последовательного возбуждения?
4. Как осуществляется реверс авиационных двигателей постоянного тока последовательного возбуждения?
5. При каких условиях возможно рекуперативное торможение двигателя последовательного возбуждения?

Рекомендуемая литература

1. Панасюк Г.И., Попов Г.В., Привалов И.А. Авиационные электрические машины. – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1985.
2. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы. – СПб.: Питер, 2008.

Содержание

Лабораторная работа №1. Исследование авиационного генератора постоянного тока параллельного возбуждения.....	3
Лабораторная работа №2. Исследование авиационного двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.....	12
Лабораторная работа №3. Исследование авиационного двигателя по- стоянного тока последовательного возбуждения.....	20
Рекомендуемая литература.....	27