

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МОРСКОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра электрооборудования судов

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Методические указания
к лабораторным работам

Санкт-Петербург
1993

Методические указания к лабораторным работам составлены в соответствии с программой курса "Электрические машины" для студентов дневного, вечернего и заочного факультетов ГМТУ.

В методические указания включены лабораторные работы по наиболее распространенным электрическим машинам. Для проверки усвоения материала каждая лабораторная работа снабжена контрольными вопросами.

ПАВЛОВА
Людмила Павловна
СЕНЬКОВ
Алексей Петрович
ТИТАР
Анатолий Семенович

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Методические указания
к лабораторным работам

© Изд. ГМТУ,
1993

Ответственный редактор канд. техн. наук,
доц. А. П. Сеньков

Литературный редактор Т. А. Канн

Зак. Р-35. Тир. 1000. Уч.-изд. л. 2,6.
Тип. СПб. ГМТУ. Зак. 93.

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Прежде чем приступить к выполнению лабораторной работы, студент должен ознакомиться с правилами внутреннего распорядка и правилами техники безопасности.

1. Сборка рабочей электрической схемы должна производиться при отключенном питании в строгом соответствии со схемой, представленной в методических указаниях.

2. Собранную схему нужно предъявить для проверки преподавателю или дежурному лаборанту.

3. При обнаружении каких-либо неисправностей в схеме необходимо немедленно отключить ее от сети и сообщить об этом преподавателю или лаборанту.

4. Производить различные переключения и исправления в схеме только при выключенном электропитании.

5. Не прикасаться к оголенным токоведущим частям схемы, находящимся под напряжением.

6. При работах на машинах не стоять около соединительных муфт, а также не прикасаться к вращающимся частям машины.

7. Работая с конденсаторами, необходимо помнить, что на зажимах конденсаторов, отключенных от сети, некоторое время сохраняется электрический заряд, который может стать причиной поражения электрическим током. Во избежание этого после отключения конденсаторы должны быть разряжены путем замыкания их выводов изолированным проводником.

8. При обнаружении повреждений электрического оборудования в схеме, а также при появлении дыма, специфического запаха или искрения необходимо немедленно отключить питание и поставить об этом в известность преподавателя или лаборанта.

9. После выполнения лабораторной работы следует отключить питание, разобрать схему и привести в порядок рабочее место.

3. Составить и нарисовать схему опыта холостого хода. Провести опыт холостого хода, по опытным данным определить параметры в режиме холостого хода, построить и нарисовать схему замещения трансформатора з режиме холостого хода.
4. Составить и нарисовать схему опыта короткого замыкания. Провести опыт короткого замыкания, по опытным данным определить параметры в режиме короткого замыкания, построить и нарисовать схему замещения трансформатора в режиме короткого замыкания.
5. Составить и нарисовать схему для снятия внешней характеристики трансформатора. Снять внешнюю характеристику трансформатора. Построить и нарисовать схему замещения трансформатора при работе с нагрузкой.
6. Построить графические зависимости по опытным и расчетным данным $\eta = f(I_2)$; $\Delta U_2 = f(I_2)$; $\eta = f(I_2)$.
7. Сравнить опытные и расчетные значения параметров схем замещения, параметров расчетного задания. Проанализировать полученные результаты.
8. Ответить на контрольные вопросы.

Определение параметров и эксплуатационных характеристик трансформатора

1. Ознакомиться со отчетом испытаний однофазного двухобмоточного трансформатора в различных режимах, которые достигаются с помощью установок переключателей П1 и П2 в соответствующие положения согласно инструкции, имеющейся на каждом стенде.
2. Записать паспортные данные трансформатора.
3. Записать в табл. I.2 все электроизмерительные приборы, используемые в работе:

Таблица I.2

Наименование	Пределы измерений	Система	Класс точности	Номер прибора	Примечание

10. При попадании человека под напряжение необходимо немедленно отключить питание электроустановки и удалить пострадавшего от частей, находившихся под напряжением.
11. При потере сознания и отсутствии дыхания необходимо немедленно освободить пострадавшего от стесняющей его одежды и сделать искусственное дыхание до прибытия врача.

Работа I. ОДНОФАЗНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР

Цель работы: ознакомиться с конструкцией и принципами действия однофазного трансформатора, приобрести навыки расчетного и экспериментального определения параметров и эксплуатационных характеристик трансформатора, схем замещения.

Задание

1. Ознакомиться с описанием лабораторной установки.
2. По паспортным данным установленного на стенде трансформатора S (кВА); U_1/U_2 (В); P_{Σ} (Вт); P_{Σ} (Вт); I_{Σ} (%), U_{Σ} (%), выполнить расчетное задание (табл. I.1).

Таблица I.1

Вариант задания	Задание	Значение $\cos \varphi_{\text{нгр}}$
1	Рассчитать и построить $U_2 = f(I_2)$	I
2		0,5
3		
4	Рассчитать и построить $\Delta U_2 = f(I_2)$	I
5		0,5
6		
7	Рассчитать и построить $\eta = f(I_2)$	I
8		0,5
9		

4. Провести опыт холостого хода - первичная обмотка трансформатора подключена к источнику, а вторичная разомкнута (рис.1.1,а). Собрать схему опыта согласно инструкции на стенде. Напряжение на первичной обмотке трансформатора подается от сети включением автоматического выключателя (кнопка "ВКЛ"), установленного на входе питания.

Показания приборов записать в табл.1.3.

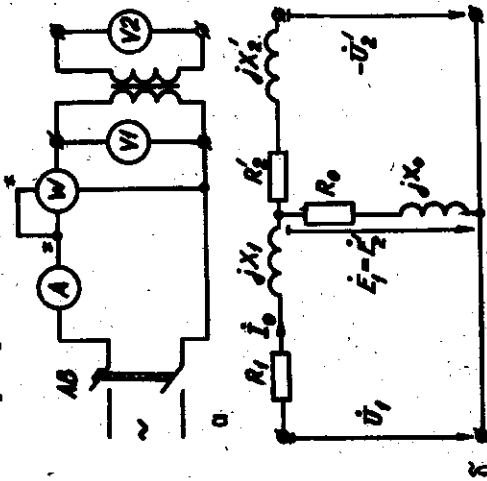


Рис.1.1. Схема опыта холостого хода трансформатора (а) и схема замещения трансформатора (б)

Таблица 1.3

Измерено				Вычислено			
$U_{ном1}$ В	$P_{х.х.}$ Вт	$I_{х.х.}$ А	κ	$I_{х.х.}$ %	$\cos \varphi_{х.х.}$	Z_{μ} Ом	R_{μ} Ом

Амперметр, включенный в первичную обмотку трансформатора в режиме холостого хода, дает показания только при нажатии кнопки "К".

По результатам измерений вычислить:

- коэффициент трансформации $\kappa = U_{ном1} / U_{ном2}$;
- коэффициент мощности трансформатора в режиме холостого

хода $\cos \varphi_{х.х.} = P_{х.х.} / U_{ном1} I_{х.х.}$;

- параметры намагничивающего контура схемы замещения трансформатора в режиме холостого хода (рис.1.1,б).

Поскольку сопротивления обмоток трансформатора R_1 и X_1 примерно на два порядка меньше сопротивлений намагничивающего контура, ими (R_1 и X_1) можно пренебречь в режиме холостого хода и считать, что $Z_{\mu} = U_{ном1} / I_{х.х.}$ - полное сопротивление намагничивающего контура; $R_{\mu} = P_{х.х.} / I_{х.х.}^2$ - активное сопротивление намагничивающего контура; $X_{\mu} = \sqrt{Z_{\mu}^2 - R_{\mu}^2}$ - индуктивное сопротивление намагничивающего контура.

Вычисленные параметры намагничивающего контура записать в табл.1.3. Построить схему замещения трансформатора в режиме холостого хода (см.рис.1.1,б).

5. Провести опыт короткого замыкания при пониженном напряжении на первичной обмотке $U_{кз1} \approx 0,1 U_{ном1}$. Понижение напряжения осуществляется включением в цепь питания первичной обмотки трансформатора лампового реостата. Вторичная обмотка трансформатора замыкается накоротко через амперметр (рис.1.2,а).

Для проведения опыта необходимо:

- убедиться, что все лампы лампового реостата отключены;
- собрать схему опыта согласно инструкции на стенде;
- постепенно увеличивая число включенных ламп, устанавливать различные значения тока I_1 от 0 до $I_{ном1}$. При этом записывать в табл.1.4 показания электроизмерительных приборов (4-5 точек) приблизительно через равные интервалы изменения тока I_1 от 0 до $I_{ном1}$.

По результатам измерений вычислить:

- напряжение короткого замыкания $U_{кз}$ в процентах от номинального

$$U_{k.3} = \frac{U_{k.3}}{U_{ном1}} \cdot 100\%$$

- сопротивление обмоток трансформатора.

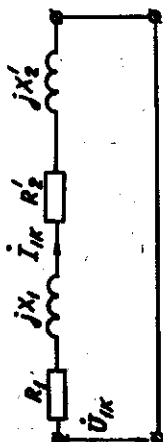
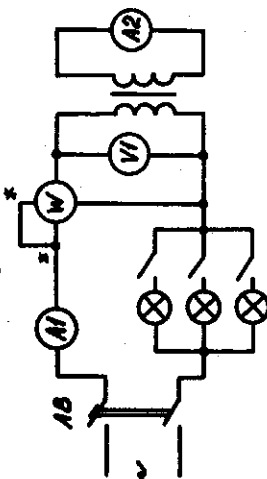


Рис.1.2. Схема опыта короткого замыкания трансформатора (а) и схема замещения трансформатора

Таблица 1.4

Измерено		Вычислить только при $I_1 = I_{ном1}, I_2 = I_{ном2}$									
P	W	$U_{k.3}$	$I_{k.3}$	$I_{k.3}'$	$P_{k.3}$	$R_{k.3}$	$X_{k.3}$	$Z_{k.3}$	$\cos \varphi_{кз}$	$\cos \varphi_{нор}$	Сравнить с $Z_{нор}, R_{нор}, X_{нор}$
		B	A	A	Bг	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом
I											
:											
n											

Из схемы замещения трансформатора в опыте короткого замыкания (рис.1.2,б) следует, что:

- $Z_{k.3} = \frac{U_{k.3}}{I_{ном1}}$ - полное сопротивление обмоток;
- $R_{k.3} = \frac{P_{k.3}}{I_{ном1}^2}$ - активное сопротивление обмоток;
- $X_{k.3} = \sqrt{Z_{k.3}^2 - R_{k.3}^2}$ - индуктивное сопротивление обмоток.

Причем можно принять $R_1 \approx R_2' = \frac{R_{k.3}}{2}$; $X_1 \approx X_2' = \frac{X_{k.3}}{2}$.

Вычисленные параметры короткого замыкания для номинальных токов записать в табл.1.4.

6. Снять внешнюю характеристику трансформатора $U_2 = f(I_2)$ при $U_1 = U_{ном1} = const$ и соответствующему варианту задания $\cos \varphi_{нор}$.

Внешняя характеристика снимается в режиме работы трансформатора под нагрузкой, т.е. в нормальном режиме работы, при котором к первичной обмотке подается номинальное напряжение, а ко вторичной подключается нагрузка. В лабораторной установке в качестве активной нагрузки используется ламповый реостат, а в качестве индуктивной - катушка индуктивности. Требуемый $\cos \varphi_{нор}$ устанавливается соответствующим отношением активного и полного токов, так например, при $\cos \varphi_{нор} = 0,5$ отношение токов $I_{акт}/I_2 = 0,5$ (рис.1.3,а).

Для проведения опыта необходимо:

- убедиться, что все лампы лампового реостата отличены, а сердечник катушки индуктивности полностью введен;
- собрать схему опыта согласно инструкции на стенде;
- постепенно увеличивая число включенных ламп и выводя сердечник катушки индуктивности, устанавливать различные значения токов I_1 и I_2 от 0 до номинальных значений, соблюдая требуемое соотношение составляющих $I_{акт}$ и I_2 . При этом записать в табл.1.5 показания электроизмерительных приборов (4-5 точек) приблизительно через равные интервалы изменения тока I_2 от 0 до $I_{ном2}$.

По результатам измерений вычислить:

- полезную мощность, отдаваемую трансформатором $P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_{нор}$;

- коэффициент полезного действия $\eta = (P_2 / P_1) 100\%$ при изменении тока нагрузки от 0 до номинального.

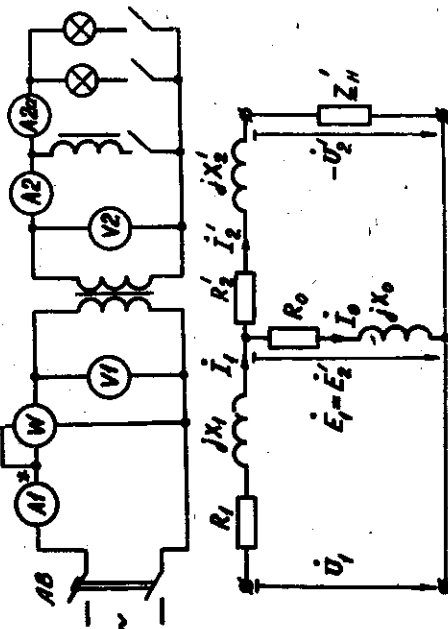


Рис. 1.3. Схема испытания работы трансформатора под нагрузкой (а) и схема замещения трансформатора (б)

Таблица 1.5

№ п/п	Измерено				Вычислено			
	U_1 , В	I_1 , А	P_1 , Вт	$\cos \varphi_1$	U_2 , В	I_2 , А	P_2 , Вт	$\cos \varphi_2$
I								
...								
...								
...								
...								

По паспортным данным можно рассчитать η (при расчёте принять $U_2 = U_{ном2} = \text{const}$):

$$\eta = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_{нагр}}{U_2 I_2 \cos \varphi_{нагр} + R_{к.з} I_2^2 + P_{хх}}$$

и падения напряжения на вторичной обмотке трансформатора при

увеличении тока нагрузки I_2 от 0 до номинального в процентах к номинальному напряжению

$$\Delta U_2 = \frac{U_{ном2} - U_2}{U_{ном2}} 100\%$$

Используя паспортные данные, можно рассчитать ΔU_2

$$\Delta U_2 = \frac{W_2}{W_1} (R_{к.з} \cos \varphi_{нагр} + x_{к.з} \sin \varphi_{нагр}) I_2$$

Вычисленные параметры записать в табл. 1.5.

Построение графических зависимостей

На одном графике в масштабе построить:

- зависимость $P_{хх} = f(I_2)$ по данным опыта холостого хода;
- зависимость $P_{к.з} = f(I_2)$ по данным опыта короткого замыкания;

- зависимость $\eta = f(I_2)$.

Построить внешнюю характеристику трансформатора $U_2 = f(I_2)$

при $U_1 = U_{ном1}$, $\cos \varphi_{нагр} = \text{const}$.

Объяснить характер изменения построенных зависимостей.

В соответствии с вариантом задания построить на графике одну из зависимостей $U_2 = f(I_2)$, $\Delta U_2 = f(I_2)$ или $\eta = f(I_2)$, найденных опытным и расчетным путем, и оценить полученные результаты.

Контрольные вопросы и задания

1. Провести технико-экономическое обоснование целесообразности использования трансформаторов в электротехнических установках, в судовых условиях.
2. Какой основной закон электротехники лежит в основе принципа действия трансформатора?
3. Оценить изменение величины напряжения вторичной обмотки, магнитного потока и тока намагничивания однофазного двухобмоточного трансформатора при увеличении в два раза:
 - числа витков первичной обмотки;
 - числа витков вторичной обмотки;



- числа витков первичной и вторичной обмоток.
- 4. Оценить изменение величины напряжения вторичной обмотки, магнитного потока и тока намагничивания трансформатора при следующих изменениях параметров питающего напряжения:
 - на 20% увеличивается амплитуда напряжения;
 - на 20% увеличивается частота напряжения.
- 5. Чем определяется величина магнитных потерь в сердечнике? Чему равны потери в сердечнике исследуемого трансформатора в режиме холостого хода; номинальной нагрузки; оптимального короткого замыкания при напряжении короткого замыкания. Чему равны потери в обмотках исследуемого трансформатора в режимах холостого хода; номинальной нагрузки; нагрузки, вдвое меньшей номинальной.
- 7. Чем определяется величина суммарных потерь трансформатора? Чему равны суммарные потери исследуемого трансформатора в режимах: холостого хода; номинальной нагрузки; оптимального короткого замыкания при напряжении короткого замыкания; нагрузки, вдвое меньшей номинальной.
- 8. Чему равны потери в сердечнике при использовании исследуемого трансформатора в качестве понижающего? Как они изменятся, если исследуемый трансформатор использовать как повышающий?
- 9. Определить значение тока холостого хода исследуемого трансформатора при питании со стороны обмотки низкого напряжения.
- 10. Вычислить приведенный ток во вторичной обмотке исследуемого трансформатора при номинальной нагрузке.
- 11. Определить величины первичного и вторичного токов исследуемого трансформатора в режиме короткого замыкания, если к первичной обмотке приложено напряжение $U_1 = 0,5 U_{ном1}$.
- 12. Объяснить принцип саморегулирования трансформатора.
- 13. Оценить целесообразное соотношение между диаметрами провода первичной и вторичной обмоток исследуемого трансформатора.
- 14. При некоторой нагрузке потери мощности в обмотках трансформатора оказались в 4 раза больше, чем потери в сердечнике. Оценить изменение общих потерь мощности трансформатора при уменьшении его нагрузки в два раза.

- 15. Вычислить приведенный ток во вторичной обмотке трансформатора, если напряжение первичной обмотки $U_1 = 10$ кВ, вторичной $U_2 = 400$ В, ток вторичной обмотки $I_2 = 40$ А.
- 16. При включении трансформатора в сеть $U_1 = 35$ кВ в режиме холостого хода напряжение на вторичной обмотке $U_2 = 400$ В. Пренебрегая намагничивающим током, определить ток в первичной обмотке, если ток нагрузки $I_2 = 145$ А.
- 17. Какой должна быть номинальная мощность понижающего трансформатора для присоединения к сети 1,2 кВ трехфазного электродвигателя, работающего при номинальном (линейном) напряжении 380 В, токе 25 кА, $\cos \varphi = 0,9$?
- 18. Вычислить приведенные значения напряжения, сопротивления и тока приемника для схемы замещения трансформатора, если номинальное вторичное напряжение понижающего трансформатора равно 100 В, коэффициент трансформации 5, сопротивление приемника 15 Ом.
- 19. В режиме короткого замыкания трансформатора ОСВ-1/0,5 к его первичной обмотке прикладывается напряжение $U_1 = 0,35 U_{ном1}$. Определить величины первичного и вторичного токов, имеющих место в этом режиме.

Работа 2. ТРЕХФАЗНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Цель работы: ознакомиться с конструкцией и паспортными данными асинхронных электродвигателей, приобрести практические навыки пуска и реверса, научиться опытным путем определять механическую и рабочие характеристики асинхронного двигателя (АД).

Задание

- 1. Ознакомиться с описанием лабораторной установки и методикой выполнения лабораторной работы.
- 2. По паспортным данным установленного на стенде АД рас-

возбуждения ЭТ поступает постоянный ток, с выхода однофазного двухполупериодного мостового выпрямителя 6. Напряжение ЭТ входе выпрямителя и, значит, ток в обмотке возбуждения ЭТ можно регулировать с помощью автотрансформатора (АТ).

В лабораторной установке используются следующие измерительные приборы: амперметр A_1 - для измерения линейного тока АД; вольтметр V - для измерения линейного напряжения сети; ваттметр W - для измерения мощности, потребляемой одной фазой АД; амперметр A_2 - для измерения тока возбуждения ЭТ.

Скорость вращения ротора АД измеряется с помощью ТТ - генератора постоянного тока, магнитное поле которого возбуждается постоянным магнитом, расположенным на статоре ТТ. Напряжение на выходе ТТ пропорционально скорости вращения его ротора, соединенного с валом ротора АД. Выходное напряжение ТТ измеряется вольтметром (на рис.2.1 обозначен n), шкала которого проградуирована в оборотах в минуту.

Для создания на валу АД момента нагрузки и его измерения используется ЭТ.

Конструктивная схема ЭТ показана на рис.2.2. Ротор ЭТ - закрепленный на валу стальной диск 1. Статор состоит из нескольких электромагнитов 2 (рис.2.2, показаны два из них), закрепленных на общем основании 3, на которых расположена обмотка возбуждения ОБ. При протекании через ОБ постоянного тока электромагниты создают неподвижные относительно статора магнитные потоки Φ , пересекающие дисковый ротор. Статор установлен на подшипниках и может поворачиваться относительно неподвижной станины. К статору прикреплен противовес 4.

Если ротор неподвижен, момент, действующий на статор ЭТ, равен нулю, и статор устанавливается в такое положение, при котором противовес занимает крайнее нижнее положение, т.е. угол $\alpha = 0$. Стрелка, связанная со статором, в этом положении указывает на шкалу, закрепленной на неподвижной станине, момент, равный нулю.

Если вращающийся ротор пересекает потоки Φ , то в нем возникает ток Фуко, взаимодействующие с магнитными потоками Φ статора, и между ротором и статором ЭТ возникает момент взаимодействия. Момент, действующий на ротор ЭТ, через общий вал прикладывается к ротору АД. Такой же по величине момент

действует на статор ЭТ и поворачивает статор ЭТ в направлении вращения ротора на такой угол α , при котором этот момент уравновешивается моментом, созданным противовесом ЭТ. По углу поворота статора ЭТ и определяется момент, действующий на ротор АД.

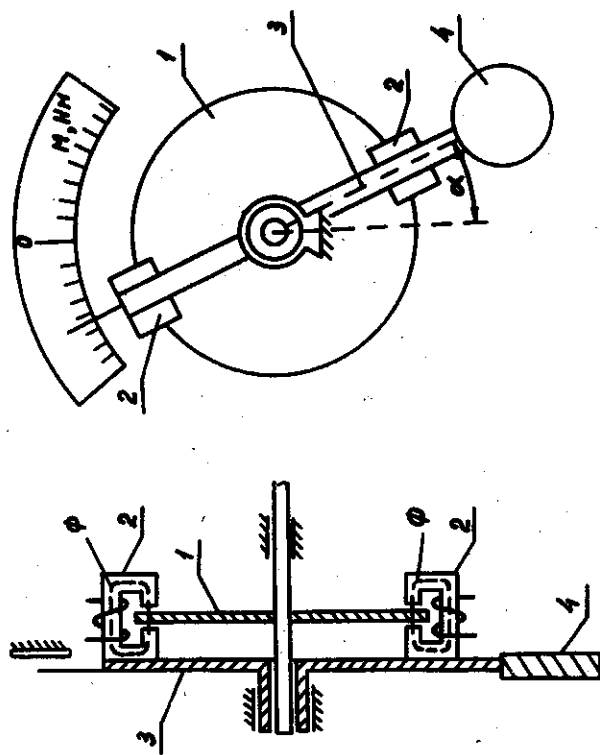


Рис.2.2. Схема электромагнитного тормоза

Паспортные данные асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором АДМ 32-4

А - асинхронный, 0 - обдуваемый, М - морской, 3 - габарит, 2 - условная длина, 4 - число полюсов

Номинальная мощность	$P_n = 1,5 \text{ кВт}$
Номинальная частота вращения	$n_n = 1390 \text{ об/мин}$
Номинальное напряжение	$U_n = 220 \text{ В}$
Номинальный ток	$I_n = 7,6 \text{ А}$
КПД в номинальном режиме	$\eta_n = 70\%$

Коэффициент мощности в номинальном режиме

$$\cos \varphi = 0,74$$

Пусковой ток

$$I_n = 4,0 \text{ о.е.}$$

Пусковой момент

$$M_n = 1,9 \text{ о.е.}$$

Максимальный момент

$$M_{\max} = 2,0 \text{ о.е.}$$

Минимальный момент

$$M_{\min} = 1,1 \text{ о.е.}$$

Методика выполнения лабораторной работы

Методика построения расчетной механической характеристики $n_r = f(M)$ по паспортным данным АД приведена в [2]. При построении нужно задаваться рядом значений скольжения s и определить соответствующие выбранным s расчетную частоту вращения n_r и момент M . Результаты расчета записать в табл.2.1 и по этим результатам построить график

Таблица 2.1

s	0	0,05	...
n_r , об/мин			
M , Нм			

Для измерения пускового тока I_n и пускового момента M_n двигателя нужно при отключенном двигателе и остановленном роторе вставить в отверстие ротора ЭТ шпильку, соединяющую ротор и статор ЭТ. При установке шпильки ротор ЭТ, а значит и ротор АД, не могут вращаться, и при подаче питания на АД к статору ЭТ будет приложен момент, равный пусковому моменту АД.

После установки шпильки с помощью автоматического выключателя АВ подключить АД к сети и, дождавшись остановки стрелки амперметра A_1 и стрелки ЭТ, измерить I_n и M_n , записать в табл.2.2.

ВНИМАНИЕ! Во избежание перегрева АД держать заторможенный двигатель под напряжением разрешается не более 15 с.

Таблица 2.2

Измерено		Вычислено		Отклонение от паспортных данных	
U_B	M_n, I_n, I_A	I_n/I_n	M_n/M_n	$\delta I_n, \%$	$\delta M_n, \%$

После измерения I_n и M_n нужно удалить шпильку из отверстия ротора ЭТ.

По результатам измерения вычисляются I_n и M_n в относительных единицах, т.е. кратность пускового тока и момента по сравнению с соответствующими номинальными величинами: I_n/I_n и M_n/M_n .

Отклонения I_n и M_n от паспортных данных определяются по выражениям

$$\delta I_n = \frac{I_n - I_{np}}{I_n} \cdot 100\%; \quad \delta M_n = \frac{M_n - M_{np}}{M_n} \cdot 100\%,$$

где I_{np} и M_{np} - значения пускового тока и момента по паспорту.

При работе АД под нагрузкой нужно включить АВ и запустить двигатель. Первое измерение параметров и их запись в табл.2.3 сделать на холостом ходу двигателя при $M = 0$, т.е. при $I_{ЭТ} = 0$. Затем включить АД и, поворачивая ручку АД и плавно увеличивая $I_{ЭТ}$ и M , определить максимальное значение момента $M_{\max}$. При достижении $M_{\max}$ и дальнейшем увеличении $I_{ЭТ}$ и M происходит резкое снижение скорости вращения ротора и момента АД. После определения $M_{\max}$ уменьшить M и $I_{ЭТ}$ до нуля. Разделить диапазон от 0 до $M_{\max}$ на 4-5 равных интервала и, устанавливая с помощью АД фактные значения моментов нагрузки, произвести измерения параметров АД и записать их в табл.2.3.

По результатам выполненных измерений определяются и выносятся в табл.2.3 расчетные параметры АД:

- полная мощность ($kB \cdot A$), потребляемая двигателем от сети

$$S = \sqrt{3} UI$$

- активная мощность (кВт), потребляемая двигателем от сети

$$P_1 = \sqrt{3} UI \cos \varphi = 3 P_\phi$$

- механическая мощность (кВт) на валу двигателя

$$P_2 = M \omega = M \frac{2\pi n}{60}$$

где ω [1/с] - угловая скорость вращения ротора АД;

- коэффициент полезного действия

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

- скольжение

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} 100\%$$

где n_0 - частота вращения магнитного поля АД, об/мин;

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S}$$

Таблица 2.3

№ п/п	Измерено					Вычислено			
	U, В	I, А	I _н , А	M, Нм	n, об/мин	S, кВт	P ₁ , кВт	P ₂ , кВт	cos φ
1									
2									
3									
...									

При построении экспериментальной механической характеристики $n=f(M)$ кроме данных табл.2.3 нужно использовать значение M_n из табл.2.2.

Рабочими характеристиками АД называют зависимость от механической мощности P_2 ряда параметров двигателя:

$$n=f(P_2), M=f(P_2), I=f(P_2), s=f(P_2),$$

$$\cos \varphi = f(P_2), \eta = f(P_2).$$

Графики рабочих характеристик строятся по данным табл.2.3.

6. Для определения погрешности построения расчетной механической характеристики нужно на интервале от 0 до 1,5 M_n выбрать и записать в табл.2.4 несколько значений моментов, включая M_n . Затем определить соответствующие этим моментам частоты вращения по опытной механической характеристике n и по расчетной механической характеристике n_p . Погрешность расчета частоты вращения определяется по выражению

$$\delta n = \frac{n - n_p}{n} 100\%$$

Таблица 2.4

M, Нм	0	...	M _n	...	1,5M _n
n _p , об/мин					
n, об/мин					
δn, %					

7. Реверс АД осуществляется переключением любой пары фаз, (см., например, рис.2.3).

8. Построить в одной системе координат экспериментальную механическую характеристику АД и нагрузки. По точке пересечения характеристик определить M и n двигателя при заданной нагрузке и развиваемую АД мощность на валу $P_2 = M \omega$. Затем по найденному P_2 и рабочим характеристикам найти требуемые параметры АД.

1. Какой способ пуска АД используется в лабораторной установке?
2. Поясните принцип действия ЭТ.
3. Как в лабораторной работе измеряется частота вращения АД?
4. Каким образом создается вращающееся магнитное поле АД?
5. От каких параметров зависит частота вращения ротора АД?
6. Какие конструкции ротора применяются в АД?
7. Как изменяется скольжение s и частота ЭДС f_2 ротора АД при увеличении частоты вращения от 0 до частоты вращения холостого хода?
8. Что называют номинальным режимом АД?
9. Как влияет изменение напряжения питания на момент АД?
10. Какие виды потерь мощности существуют в АД?
11. Какие способы пуска АД применяются на практике?
12. Как можно регулировать скорость вращения ротора АД?

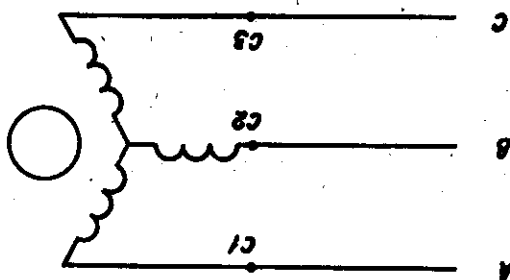
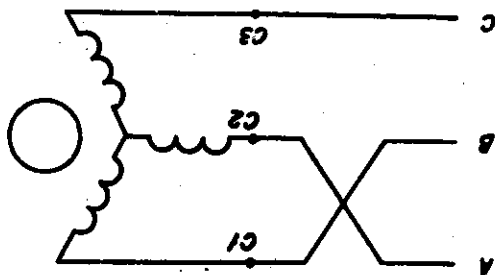
Работа 3. СИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР

Цель работы: изучить устройство синхронного генератора (СГ), научиться опытным и расчетным путем определять его основные характеристики и приобрести практические навыки по управлению режимами работы СГ.

Задание

1. Ознакомиться с описанием лабораторной установки и методикой выполнения лабораторной работы.
2. Опытным путем определить характеристику холостого хода $E = f(I_f)$.
3. Опытным путем построить характеристику короткого замыкания $I = f(I_f)$.
4. Измерить активное сопротивление фазы обмотки якоря R_ϕ .

Рис. 2.3. Схема переключения фаз АД при реверсе



5. По характеристикам холостого хода и короткого замыкания определить индуктивное сопротивление фаз обмотки якоря по продольной оси x_d и поперечной оси x_q .
6. Построить расчетную внешнюю характеристику $U=f(I)$ для активно-индуктивной нагрузки при заданном $\cos \varphi$:

Вариант	$\cos \varphi$
1	0,3
2	0,4
3	0,5
4	0,6
5	0,8
6	1,0

7. Построить расчетную регулировочную характеристику $I_g = f(I)$ при заданном $\cos \varphi$.
8. Определить экспериментальную внешнюю характеристику.
9. Определить экспериментальную регулировочную характеристику.
10. Определить погрешность расчета внешней и регулировочной характеристики.

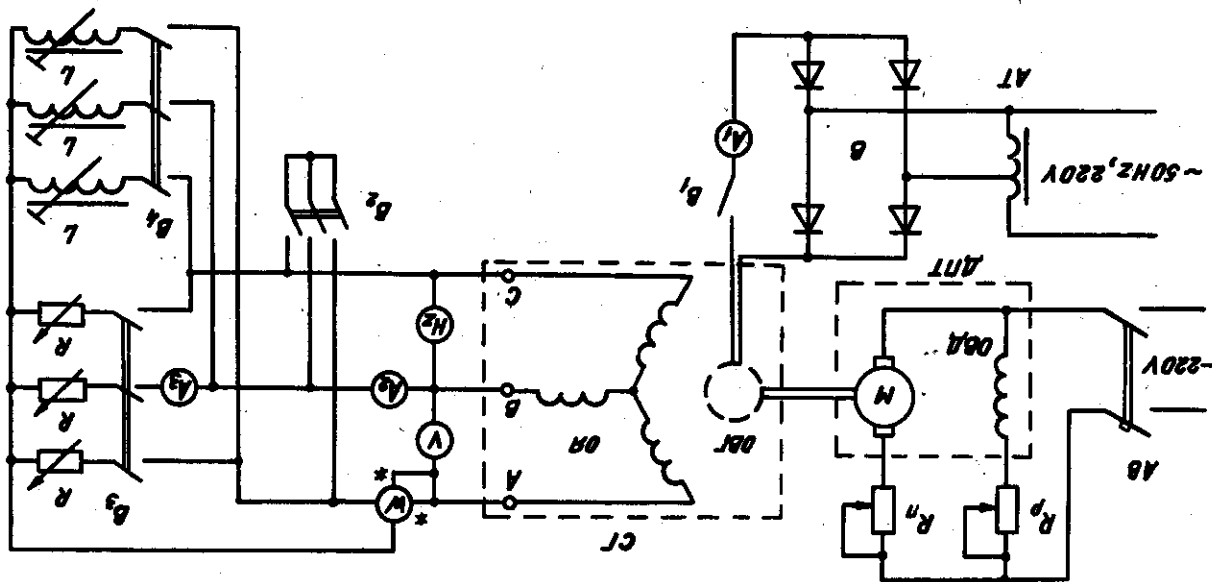
Описание лабораторной установки

Трехфазная обмотка якоря (статора) СТ соединена звездой (рис.3.1). В обмотку возбуждения СТ, размещенную на роторе, подается постоянный ток, поступающий с выхода однофазного мостового выпрямителя. Ток возбуждения и напряжение СТ можно регулировать с помощью автотрансформатора АТ, выходное напряжение которого поступает на вход выпрямителя.

Ротор СТ приводится во вращение двигателем постоянного тока ДПТ, ротор которого соединен общим валом с ротором СТ. Запуск ДПТ производится с помощью пускового реостата R_n , ограничивающего пусковой ток его якоря. Перед пуском ДПТ необходимо убедиться, что пусковой реостат находится в положении "СТОП". При запуске ДПТ включить автоматический выключатель АВ, подавший постоянное напряжение на ДПТ, и рукояткой пускового реостата ввести сопротивление реостата R_n до нуля.

Скорость вращения ротора ДПТ и СТ, а значит, и частота напряжения СТ, регулируются за счет изменения тока в обмотке

Рис.3.1. Схема лабораторной установки с СТ



возбуждения ДПТ (ОВД) с помощью регулирующего реостата R_p . В качестве нагрузки СТ в лабораторной работе используется трехфазный ламповый реостат и трехфазная катушка индуктивности. Активная нагрузка СТ (R) регулируется изменением количества включенных ламп лампового реостата. Индуктивная нагрузка (L) изменяется за счет вывода магнитопровода из внутренней полости катушки индуктивности с помощью механической винтовой передачи. Нагрузка подключается к выходу СТ с помощью выключателей B_3 и B_4 .

При проведении опыта короткого замыкания обмотки якоря замыкается накоротко выключателем B_2 .

ВНИМАНИЕ! Выключатель B_2 можно включать только в опыте короткого замыкания.

В лабораторной установке используются следующие измерительные приборы: амперметр A_1 - для измерения тока возбуждения I_B СТ; вольтметр V - для измерения линейного напряжения U ; частотомер H_z - для измерения частоты напряжения f ; амперметр A_2 - для измерения линейного тока I ; амперметр A_3 - для измерения активной составляющей линейного тока I_a .

Методика выполнения лабораторной работы

Характеристика холостого хода СТ - зависимость ЭДС фазы генератора от тока возбуждения $E = f(I_B)$ - снимается при номинальной частоте напряжения $f_H = \text{const}$ на холостом ходе, т.е. при токе нагрузки $I = 0$.

Для снятия характеристики холостого хода нужно выключить B_3 и B_4 отключить от обмотки якоря СТ нагрузку R и L . При отсутствии нагрузки напряжение холостого хода на выходе СТ пропорционально фазной ЭДС $U_x = \sqrt{3} E$.

Затем с помощью АВ подключить ДПТ к сети постоянного напряжения 220 В и, плавно поворачивая рукоятку R_H до упора, загрузить ДПТ. Подключить АТ к сети переменного напряжения и, включив B_1 , подать питание на ОБГ. Регулируя с помощью R_p частоту вращения ДПТ, установить на выходе СТ номинальную частоту вращения $f_H = 50 \text{ Hz}$. При этом учесть, что показания частотомера достоверны при напряжении на выходе СТ не менее 100 В. После этого установить с помощью АТ такой ток

возбуждения, при котором напряжение генератора достигнет предельных изменений вольтметра, и сделать первое измерение I_B и U_x , результаты которого записать в табл.3.1.

Таблица 3.1

№ п/п	I_B, A	U_x, B	E, B	Условия опыта
1				$I = 0$
2				$f = \text{const}$
.				
.				

Затем, уменьшая ток возбуждения, зафиксировать еще ряд значений I_B и соответствующие им значения U_x . Характеристику холостого хода снимать при монотонно убывающем токе возбуждения, не допуская увеличения I_B .

Последнее измерение делать при разомкнутом B_1 и обесточенной ОБГ, в этом случае напряжение на выходе СТ определяет величину остаточной ЭДС $E_0 = U_x / \sqrt{3}$. Для измерения E_0 к клеммам СТ подключается вольтметр с меньшим пределом измерения.

Характеристикой короткого замыкания называется зависимость тока в фазе обмотки якоря СТ от тока возбуждения $I = f(I_B)$ при $0 \leq I_B \leq I_{Bn}$, $f = \text{const}$, $U = 0$.

Для определения характеристики короткого замыкания сначала нужно на холостом ходе произвести запуск ДПТ и установить на выходе СТ f_H .

Характеристику короткого замыкания снимают при возрастающем токе возбуждения. Поэтому следует при замкнутом выключателе B_1 с помощью АТ установить $I_B = 0$. Затем выключателем B_2 замкнуть обмотку статора СТ накоротко и, плавно увеличивая ток возбуждения I_B , зафиксировать и записать в табл.3.2 значения I_B и соответствующие им значения тока якоря I . По полученным данным построить график $I = f(I_B)$.

Измерение активного сопротивления R_ϕ фазы СТ производится с помощью омметра. Измерения производят при остановленном ДПТ и разомкнутых выключателях $B_2 - B_4$.

В лабораторной работе используется явноточная СТ, у которого синхронное индуктивное сопротивление обмотки якоря

по продольной оси x_d и поперечной оси x_q различны.
Таблица 3.2

№ п/п	Измерено		Вычислено				Условия опыта
	I_{bn} , А	I , А	x_d , Ом	x_q , Ом	$x_{d\varphi}$, Ом	$x_{q\varphi}$, Ом	
1							$U=0$ $f=\text{const}$
2							
...							

Индуктивное сопротивление фазы обмотки якоря по продольной оси x_d определяется по выражению

$$\frac{E(I_{bn})}{I_{bn}} = \sqrt{R_\varphi^2 + x_d^2}$$

откуда

$$x_d = \sqrt{\left(\frac{E(I_{bn})}{I_{bn}}\right)^2 - R_\varphi^2}$$

где I_{bn} и I_{bn} - ток возбуждения и ток якоря, определенные при измерении номер n в опыте короткого замыкания; $E(I_{bn})$ - ЭДС фазы СТ, соответствующая I_{bn} по характеристике холостого хода.

Индуктивное сопротивление фазы якоря по поперечной оси $x_q = \frac{2}{3} x_d$.

После определения x_d и x_q для каждого измерения, внешнего в табл. 3.2, определяются средние значения $x_{d\varphi}$ и $x_{q\varphi}$:

$$x_{d\varphi} = \frac{\sum_{i=1}^n x_{di}}{n}; \quad x_{q\varphi} = \frac{\sum_{i=1}^n x_{qi}}{n}$$

используемые при построении расчетной внешней характеристики.

Расчетная внешняя характеристика $U=f(I)$ строится при $f=\text{const}$, $I_\varphi=\text{const}$ и $\cos\varphi=\text{const}$.
Фазное напряжение генератора определяется по уравнению

$$\underline{U}_\varphi = \underline{E} - jI_d x_d - jI_q x_q - I R_\varphi$$

где $\underline{E}$ - ЭДС фазы; $I_d = I \sin\psi$ - продольная составляющая тока якоря; $I_q = I \cos\psi$ - поперечная составляющая тока якоря; ψ - угол сдвига фаз между $\underline{E}$ и $\underline{I}$.

При построении векторной диаграммы, поясняющей уравнение, определяющее $\underline{U}_\varphi$, удобно выбрать начало отсчета времени в момент, когда начальная фаза ЭДС равна $\pi/2$, тогда $\underline{E} = jE$ (рис. 3.2, а). Вектор тока якоря $\underline{I}$ при активно-индуктивной нагрузке отстает от вектора $\underline{E}$ на угол ψ . Продольная составляющая тока якоря направлена по оси вещественных чисел: $\underline{I}_d = I \sin\psi$; поперечная составляющая тока якоря совпадает по направлению с $\underline{E}$: $\underline{I}_q = jI \cos\psi$. Падение напряжения $jI_d x_d$ на x_d опережает по фазе на $\pi/2$ вектор тока $\underline{I}_d$, напряжение $jI_q x_q$ на x_q опережает на $\pi/2$ ток $\underline{I}_q$, а напряжение $I R_\varphi$ совпадает по фазе с $\underline{I}$. Последовательно вычитая из вектора ЭДС $\underline{E}$, векторы падения напряжения на x_d , x_q и R_φ , получим фазное напряжение $\underline{U}_\varphi$.

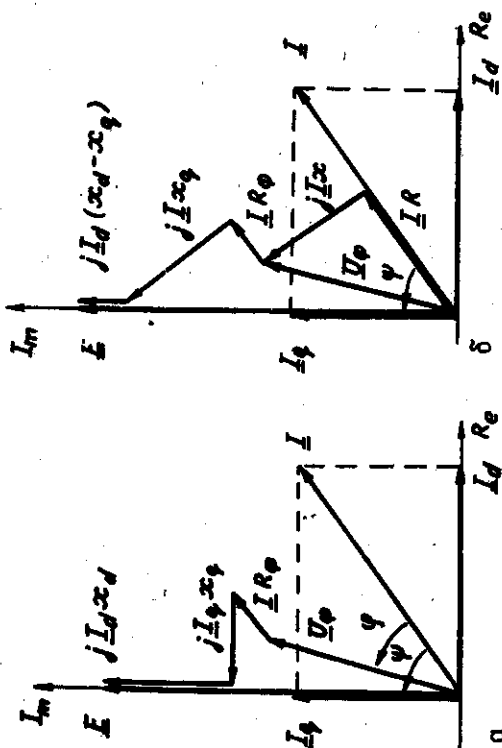


Рис. 3.2. Векторные диаграммы СТ при активно-индуктивной нагрузке

Для определения U_ϕ векторную диаграмму удобно представить в несколько ином виде (рис.3.2,б), т.е. представить в виде суммы

$$U_\phi = \bar{I}R + j\bar{I}x,$$

где R - активное сопротивление нагрузки; x - индуктивное сопротивление нагрузки.

Сумма падений напряжений на x_d и x_q будет равна

$$\begin{aligned} j\bar{I}_d x_d + j\bar{I}_q x_q &= j\bar{I}_d (x_d - x_q) + j\bar{I}_d x_q + j\bar{I}_q x_q = \\ &= j\bar{I}_d (x_d - x_q) + j\bar{I}_q (\bar{I}_d + \bar{I}_q) = \\ &= j\bar{I}_d (x_d - x_q) + j\bar{x}_q \bar{I}. \end{aligned}$$

На основе анализа векторной диаграммы можно получить ряд соотношений, которые позволяют построить внешнюю характеристику КУ.

Первая точка внешней характеристики строится при $\bar{I} = 0$ в режиме холостого хода. В этом случае $U = \sqrt{3}E_n = U_n$, и по характеристике холостого хода определяется ток возбуждения, при котором строится характеристика. Затем нужно задаться рядом значений сопротивления нагрузки, например z , равных: $0,2z_n$, $0,4z_n$, $0,6z_n$, $0,8z_n$, $1,0z_n$, $1,2z_n$, $1,4z_n$, $1,6z_n$, $1,8z_n$, $2,0z_n$, где $z_n = U_{\phi n} / I_n$ - номинальное сопротивление нагрузки; $U_{\phi n} = U_n / \sqrt{3}$ - номинальное фазное напряжение; I_n - номинальный ток СТ). Выбранные значения z записать в табл.3.3.

Таблица 3.3

№ п/п	z, Ω	R, Ω	x, Ω	ψ , град	I , А	U_ϕ , В	U , В	ΔU , %
1								
2								
3								
...								

При заданном значении $\cos \varphi$ для каждого z можно определить активное и индуктивное сопротивление нагрузки:

$$R = z \cos \varphi, \quad x = z \sin \varphi. \quad (3.1)$$

Из векторной диаграммы следует, что

$$\psi = \arcsin \frac{x_q + x}{R_\phi + R};$$

$$I = \frac{E - I(x_d - x_q) \sin \psi}{\sqrt{(R_\phi + R)^2 + (x_q + x)^2}}. \quad (3.2)$$

Отсюда можно найти ток якоря при заданной нагрузке:

$$I = \frac{E}{\sqrt{(R_\phi + R)^2 + (x_q + x)^2} + (x_d - x_q) \sin \psi}. \quad (3.3)$$

Фазное напряжение на нагрузке

$$U_\phi = I z, \quad (3.4)$$

линейное напряжение

$$U = \sqrt{3} U_\phi. \quad (3.5)$$

Таким образом, для каждого выбранного значения z по выражениям (3.1)-(3.5) последовательно определяются R, x, ψ, I, U_ϕ, U и строится график внешней характеристики $U = f(I)$. Относительное изменение напряжения определяется по выражению

$$\Delta U = \frac{U_n - U}{U_n} 100\%.$$

Регулировочная характеристика $I_\phi = f(I)$ строится при $f = \text{const}$, $\cos \varphi = \text{const}$, $U = \text{const}$.

Она показывает, как нужно изменять I_ϕ генератора, чтобы при увеличении тока якоря I обеспечить $U = \text{const}$. При активно-индуктивной нагрузке с увеличением I напряжение U уменьшается. Для обеспечения $U = \text{const}$ нужно по мере увеличения I увеличивать I_ϕ и, следовательно, E .

Первая точка регулировочной характеристики определяется на холостом ходе при $I = 0$. В этом случае $U_n = \sqrt{3}E_n$, и

Экспериментальная внешняя характеристика $U=f(I)$ снимается при $f = \text{const}$, $I_2 = \text{const}$, $\cos \varphi = \text{const}$.

Для этого нужно сначала запустить приводной двигатель, включить V_1 и установить на холостом ходу СТ ($V_2 - V_4$ - разомкнуты) номинальное напряжение на выходе СТ. Регулируя частоту вращения ДПТ с помощью R_p , установить номинальную частоту напряжения $f_n = 50$ Гц.

Первая точка внешней характеристики снимается на холостом ходу $I = 0$, $U = U_n$. Затем выключатели B_1 и B_2 к

Первая точка внешней характеристики снимается на холостом ходу $I = 0$, $U = U_n$. Затем выключателями B_3 и B_4 к СГ подключается нагрузка R и L . Уменьшая R и L , на-грузки и, соответственно, увеличивая линейный ток СГ I и активную составляющую линейного тока I_a , регистрируют ряд точек внешней характеристики. Для получения заданного $\cos \varphi$ необходимо обеспечить $I_a/I = \cos \varphi$.

U.

Рис. 3.3. Вектор напряжения и векторы токов СТ

Таблица 3.5

[illegible]

Экспериментальная регулировочная характеристика $\Gamma_B = f(I)$ принимается при $U = \text{const}$, $f = \text{const}$, $\cos \varphi = \text{const}$.

Для этого нужно запустить ДИТ и установить на холостом ходу СТ $f=f_n$ и $U=U_n$. Затем с помощью B_3 и B_4 под-ключить нагрузку к СТ и, уменьшая R и L , измерить ряд значений для построения регулировочной характеристики. Из-менения R и L , нужно следить, чтобы $I_a/I \cdot \cos \varphi$. Пе-ред каждым измерением по мере увеличения тока I нужно с по-мощью АТ настолько увеличивать I_b СТ, чтобы обеспечить $U = \text{const}$. Кроме того, при снятии регулировочной характе-ристики, так же как и при снятии внешней характеристики, резисто-ром R_p обеспечивается $f = \text{const}$.

Результаты измерений записываются в табл.3.6, и по ним строится график $I_b=f(I)$.

Таблица 3.6

№ п/п	I, A	I_b , A	U, B	Условия опыта
1				U = const
2				f = const
.				cos φ = const
.				
n				

Для определения погрешности расчета внешней характери-сти в табл.3.7 записывается несколько значений тока СТ от 0 до максимального, полученных при определении эксперименталь-ной внешней характеристики. Для каждого выбранного значения тока по графикам расчетной и экспериментальной внешней харак-теристики определяется расчетное U_p и экспериментальное U_s напряжения и заносятся в табл.3.7. После этого определяется относительная погрешность расчета

$$\delta U = \frac{U_s - U_p}{U_s} 100\%.$$

Для определения погрешности расчета регулировочной ха-рактеристики в табл.3.8 записывается ряд значений тока СТ от 0 до максимального, полученного при определении эксперимен-тальной регулировочной характеристики. Затем для каждого зна-чения тока по графикам расчетной и экспериментальной харак-

теристик определяется расчетное I_{bp} и экспериментальное I_{bs} значения тока возбуждения и записываются в табл.3.8. Относительная погрешность расчета

$$\delta I_b = \frac{I_{bs} - I_{bp}}{I_{bs}}.$$

Таблица 3.7

№ п/п	I, A	U_p , B	U_s , B	δU , %
1				
2				
.				
.				
n				

Таблица 3.8

№ п/п	I, A	I_{bp} , A	I_{bs} , A	δI_b , %
1				
2				
.				
.				
n				

Контрольные вопросы и задания

1. Поясните устройство и принцип действия СТ.
2. Каким образом можно изменить амплитуду напряжения СТ?
3. Как можно изменить частоту напряжения СТ?
4. Почему характеристика холостого хода СТ нелинейна?
5. Что такое реакция якоря СТ?
6. Каковы особенности реакции якоря в явномолосном СТ?

7. При каких условиях снимается внешняя характеристика?
8. Почему внешняя характеристика зависит от вида нагрузки?
9. Каким образом можно обеспечить $U = \text{const}$ при изменении нагрузки СТ?
10. При каких условиях снимается регулировочная характеристика?

Работа 4. ГЕНЕРАТОР ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы: изучить устройство генератора постоянного тока (ГПТ) и способы его возбуждения; опытным путем определить его основные характеристики, приобрести практические навыки при включении ГПТ и управлении режимами его работы.

Задание

1. Ознакомиться со стендом испытания генератора, постоянного тока.
2. Записать номинальные данные ГПТ: мощность P_n , напряжение U_n , ток I_n , коэффициент полезного действия η_n , частоту вращения n_n , сопротивления обмотки якоря R_a и обмоток возбуждения OB_1 и OB_2 .
3. Записать в табл. 4.1 электроизмерительные приборы, используемые в работе.

Таблица 4.1

Наименование прибора	Пределы измерений	Система	Класс точности	Номер прибора	Примечание

4. Провести опыт холостого хода.
5. Снять внешние характеристики ГПТ при параллельном и смешанном возбуждении.
6. Снять нагрузочную характеристику генератора с параллельным возбуждением.

Описание лабораторной установки

Схема лабораторной установки изображена на рис. 4.1. В качестве приводного двигателя (ПД) в данной работе используется двигатель постоянного тока (Д). Для запуска двигателя необходимо включить автомат B_1 , подающий питание от сети, и медленно до упора вывести сопротивление пускового реостата (ПР). Постоянная частота вращения генератора (Г) обеспечивается воздействием на регулятор скорости ПД, в данном случае на реостат R_1 в обмотке возбуждения двигателя (ОВД).

Нагрузочное сопротивление R_5 подключается к генератору выключателем B_5 . Регулирование тока в параллельной обмотке возбуждения осуществляется реостатом R_4 .

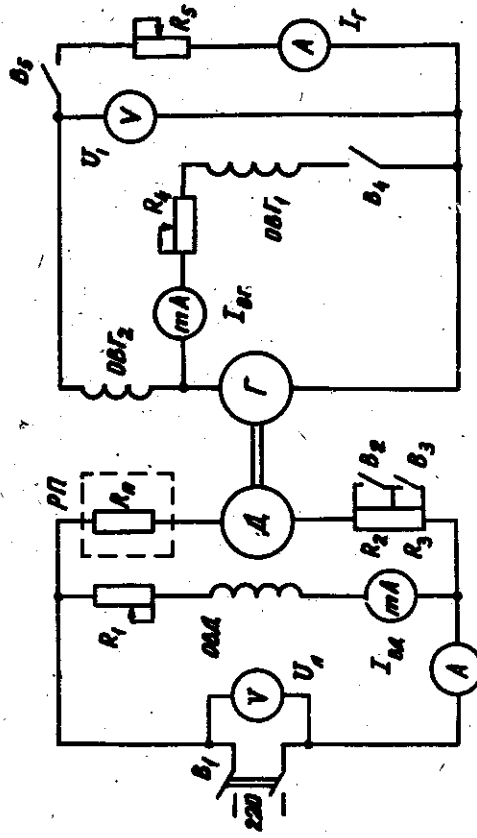


Рис. 4.1. Принципиальная схема исследования машины постоянного тока

В работе исследуется генератор при двух способах возбуждения: параллельном и смешанном. Это достигается путем переключения схемы соединения параллельной ОВГ₁ и последовательной ОВГ₂ обмоток возбуждения при помощи двух переключателей Π_1 и Π_2 . Принципиальная схема коммутации якорной цепи генератора представлена на рис. 4.2.

Для определения влияния параметров цепи возбуждения на процесс самовозбуждения произвести расчет напряжения самовозбуждения для двух значений R_4 по полученной характеристике холостого хода при номинальной частоте вращения (рис.4.3):

$$\tan \alpha = \frac{U}{I_{gr}} = R_B + R_4,$$

где R_4 — сопротивление обмотки возбуждения ОБГ₁.

Определить величину критического сопротивления по графику и сравнить ее с опытными значениями, полученным путем увеличения R_4 до прекращения самовозбуждения.

2. Снятие внешних характеристик при параллельном и смешанном возбуждении.

Внешней характеристикой ГПТ называется зависимость напряжения от тока нагрузки $U_r = f(I)$ при постоянной частоте вращения $n = \text{const}$ и неизменном сопротивлении в цепи возбуждения генератора.

При снятии внешних характеристик измеряют напряжение генератора U_r , ток якоря I_r , ток ОБГ₁ I_{gr} ; частота вращения n при этом поддерживается постоянной.

Для снятия внешней характеристики ГПТ при параллельном возбуждении переключатель Π_1 ставится в положение II. При нагруженном генераторе, изменяя реостатом R_4 ток возбуждения, устанавливаем номинальное напряжение ГПТ. В дальнейшем сопротивление в цепи возбуждения ГПТ остается неизменным. Полученная точка холостого хода является первой точкой внешней характеристики.

Затем, подключив к ГПТ нагрузочный реостат R_5 , постепенно выводим его до нуля, т.е. до режима короткого замыкания (точка I_{k3} на рис.4.4).

Показания приборов занести в табл.4.3.

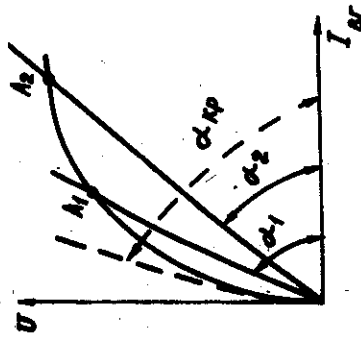


Рис.4.3. Самовозбуждение генератора постоянного тока

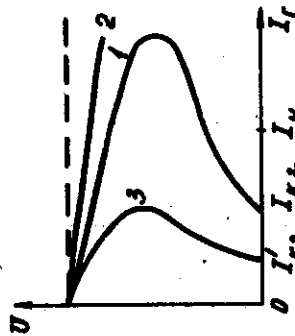


Рис.4.4. Внешние характеристики генератора постоянного тока

На основании полученных данных строят внешнюю характеристику ГПТ при параллельном возбуждении (кривая I на рис.4.4).

Для снятия внешних характеристик ГПТ смешанного возбуждения переключатель Π_1 ставится в положение I. Начальная точка отсчета U_x при $I = 0$ устанавливается с помощью реостатов R_1 и R_4 такой же, как при параллельном возбуждении генератора.

Характеристика снимается при согласном включении последовательной обмотки ОБГ₂, когда магнитные потоки параллельной и последовательной обмоток совпадают, и при встречном включении последовательной обмотки, когда магнитные потоки параллельной и последовательной ОБГ направлены встречно.

Согласное включение обмоток ОБГ₁ и ОБГ₂ достигается постановкой переключателя Π_2 в положение I, а встречное — переключением его в положение II.

Порядок снятия внешних характеристик при смешанном возбуждении аналогичен снятию внешней характеристики при параллельном возбуждении, причем при встречном включении сопротивление R_5 также уменьшается до нуля, т.е. до режима короткого замыкания (точка I'_{k3} на рис.4.4).

Показания приборов заносятся в табл.4.4.

На основании полученных данных строят внешнюю характеристику (см. кривые 2 и 3 на рис.4.4).

Внешняя характеристика генератора на рабочем участке аппроксимируется прямой линией, тогда ее уравнение имеет вид

$$U_r = U_x - I_r R_a.$$

Таблица 4.3

$U_r, В$	$I_r, А$	$I_{gr}, мА$	$n, об/мин$	$\alpha, \%$	Примечание
					$n = \text{const}$ $R_4 = \text{const}$

где U_r — напряжение на нагрузке; U_x — напряжение холостого хода; R_a — сопротивление цепи якоря ГПТ.

Таблица 4.4

№ п/п	U_r , В	I_r , А	I_{Br} , мА	n , об/мин	Примечание
	Согласное включение последовательной обмотки				
1					$n = \text{const}$
2					
3					
...					
	Внутреннее включение последовательной обмотки				
1					$R_H = \text{const}$
2					
3					
...					

Из построенных характеристик видно, что с ростом нагрузки напряжение падает. При помощи внешней характеристики определяется относительное падение напряжения при переходе от режима холостого хода к режиму номинальной нагрузки по формуле

$$\Delta U = \frac{U_x - U_r}{U_r} \cdot 100\%$$

3. Снятие нагрузочной характеристики генератора с параллельным возбуждением.

Нагрузочная характеристика представляет собой зависимость $U_r = f(I_r)$ при $I_r = \text{const}$ и $n = \text{const}$, т.е. в частном случае при $I = 0$ она является характеристикой холостого хода. По нагрузочной характеристике можно определить влияние различных факторов на снижение напряжения.

Для снятия нагрузочной характеристики переключатель Π_1 ставится в положение II, устанавливается номинальное напряжение генератора при заданной нагрузке с помощью реостатов R_4 и R_5 .

Постепенно уменьшая возбуждение генератора при поддержании $I_r = \text{const}$ с помощью реостата R_5 , получают 3-4 точки нагрузочной характеристики, частоту вращения при этом поддерживают такой, какая принята была при снятии характеристики холостого хода. Опытные данные заносят в таблицу, аналогичную табл. 4.2, но при $I_r = \text{const} \neq 0$.

По нагрузочной характеристике и характеристике холостого хода построить характеристический треугольник при номинальном напряжении.

4. Снятие регулировочных характеристик ГПТ с параллельным и смешанным возбуждением.

Регулировочной характеристикой генератора называется зависимость тока возбуждения от тока нагрузки (или полезной мощности) $I_{Br} = f(I_r)$ при неизменном напряжении на зажимах $U_r = \text{const}$ и постоянной частоте вращения машины $n = \text{const}$.

Регулировочная характеристика указывает, как нужно изменять возбуждение ГПТ, чтобы поддерживать напряжение неизменным для любых нагрузок.

При снятии регулировочной характеристики измеряют ток якоря I_r , ток ОБГ I_{Br} при постоянном напряжении генератора U_r .

Снятие регулировочной характеристики производят в следующем порядке. Переводят переключатель Π_1 в положение II и устанавливают номинальное напряжение на ненагруженном генераторе. Затем подключают к ГПТ нагрузку, постепенно увеличивая ток якоря генератора до $I = I_H$.

При увеличении нагрузки для поддержания напряжения на заданных генератора постоянным необходимо регулировать ток возбуждения ГПТ. Показания приборов заносятся в табл. 4.5.

На основании полученных данных строят регулировочные характеристики.

Работа 5. ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы: ознакомиться с конструкцией двигателя постоянного тока (ДПТ), приобрести практические навыки его пуска, остановки и реверса, научиться опытным путем определять характеристики двигателя.

Задание

- 1. Ознакомиться со способом испытания двигателя постоянного тока.
- 2. Исследование основных свойств ДПТ производится на стенде, принципиальная схема которого изображена на рис.4.1 (см. работу № 4). В качестве нагрузки используется генератор постоянного тока со смешанным возбуждением при согласном включении обмоток ОВГ₁ и ОВГ₂, переключатели П₁ и П₂ находятся в положении 1 (см. рис.4.2 в лабораторной работе 4). В работе определяются рабочие и регулировочные характеристики.
- 3. Записать номинальные данные ДПТ: мощность Р_н, напряжение U_н, ток нагрузки I_н, коэффициент полезного действия η_н, частоту вращения n_н, сопротивление обмотки якоря.
- 4. Записать в табл.5.1 электроизмерительные приборы, используемые в работе.

Таблица 5.1

Наименование прибора	Пределы измерений	Система	Класс точности	Номер прибора	Примечание

- 5. Рассчитать пусковое сопротивление R_п для случая I_н = 2,5 I_{ном}.
- 6. Произвести пуск ДПТ и сравнить расчетные и опытные данные.
- 7. Снять рабочие характеристики ДПТ.

Таблица 4.5

№ п/п	I, А	I _{яг} , мА	n, об/мин	U _г , В	Примечание
1					U _г = const
2					n = const
3					
...					

Контрольные вопросы и задания

- 1. Каковы основные особенности конструкции ГПТ?
- 2. Какие существуют способы возбуждения ГПТ?
- 3. Как ток якоря изменяет магнитное поле ГПТ?
- 4. Какой вид имеет характеристика холостого хода?
- 5. Каковы причины падения напряжения генератора параллельного возбуждения?
- 6. Как объяснить различие в наклонах внешних характеристик при встречном и согласном включении обмоток возбуждения ГПТ?
- 7. В чем отличие внешних характеристик генератора со смешанным возбуждением от внешних характеристик генератора с параллельным возбуждением?
- 8. Какие параметры входят в уравнение внешней характеристики ГПТ?
- 9. Как снимается регулировочная характеристика?
- 10. Как объяснить неравенство I_{к.з} ≠ I' ?
- 11. Перечислите условия самовозбуждения ГПТ.
- 12. Какую информацию дает величина катетов характеристикического треугольника при снятии нагрузочной характеристики?

8. Исследовать возможные способы регулирования частоты вращения ДПТ на лабораторном стенде.

9. Осуществить реверс ДПТ.

Методика выполнения лабораторной работы

1. Пуск ДПТ производят с помощью пускового реостата, включенного последовательно с обмоткой якоря для ограничения пускового тока:

$$I_n = \frac{U_D}{R_a + R_n}$$

где U_D - напряжение сети; R_a - сопротивление обмотки якоря ДПТ; R_n - сопротивление пускового реостата.

С помощью автоматического выключателя, установленного на щите питания, подать питание к схеме ДПТ, а затем медленным поворотом рукоятки пускового реостата до упора осуществить плавный пуск двигателя. Тем самым к концу пуска реостат полностью выводится (сопротивление R_n равно нулю). В начале пуска зафиксировать величину пускового тока.

2. Снятие рабочих характеристик ДПТ с параллельным возбуждением. Рабочими характеристиками ДПТ называются зависимости частоты вращения n , полезного момента M , тока якоря I_D и КПД η от полезной мощности ДПТ P_2 при напряжении на зажимах ДПТ $U_D = U_n = \text{const}$ и токе возбуждения $I_{вд} = I_{ан} = \text{const}$. Зависимость $n = f(P_2)$ при $U_D = \text{const}$ и $I_{вд} = \text{const}$ называется скоростью характеристики. Частота вращения n определяется из уравнения $U_D = E_D + I_D R_a$. Если подставить в него значение $E_D = C_e n \Phi$, то

$$n = \frac{U_D - I_D R_a}{C_e \Phi}$$

где Φ - основной магнитный поток ДПТ. Полезная мощность ДПТ $P_2 = U_D I_D \eta$, а так как КПД двигателя приблизительно остается постоянным при изменении нагрузки в пределах от 0,5 P_n до 1,2 P_n , можно считать, что в наиболее часто встречающихся режимах работы двигателя $I_D \sim P_2$.

На этом основании скоростную характеристику, т.е. зависимость $n = f(P_2)$, часто строят в функции от тока I_D , а не от P_2 .

С возрастанием нагрузки P_2 происходит увеличение $I_D R_a$, так как растет ток, потребляемый двигателем из сети I_D , основной магнитный поток ДПТ практически остается постоянным, поэтому характеристика $n = f(P_2)$ - падающая.

При увеличении нагрузки P_2 от холостого хода до номинальной частота вращения ДПТ параллельного возбуждения уменьшается незначительно, характеристика $n = f(P_2) = f(I_D)$ жесткая, что является отличительным свойством двигателя параллельного возбуждения.

Зависимость $M = f(P_2) = f(I_D)$ при $U_D = U_n = \text{const}$, $I_{вд} = I_{ан} = \text{const}$ называется моментной характеристикой. При установившемся режиме работы момент

$$M = C_M I_D \Phi = M_x + M_2 = M_c$$

При холостом ходе

$$M = M_x = C_M I_x \Phi$$

где I_x - ток холостого хода ДПТ.

Поскольку магнитный поток при увеличении тока I_D несколько уменьшается из-за размагничивающего действия поперечной реакции якоря, то моментная характеристика растет несколько медленнее, чем ток I_D . Зависимость полезного момента M_2 идет ниже характеристики момента M_c на величину момента холостого хода M_x (рис.5.1).

Зависимость КПД двигателя $\eta = f(P_2)$ для $U_D = U_n$, $I_{вд} = I_{ан}$ быстро растет при изменении нагрузки в пределах от холостого хода до $P_2 = 0,25 P_n$, при $P_2 = 0,5 P_n$ достигает максимума и в пределах от $P_2 = 0,5 P_n$ до $P_2 = P_n$ остается практически постоянной.

Рабочие характеристики снимаются при работе двигателя под нагрузкой, для создания которой используется постоянный ток со смешанным возбуждением.

Ток в ябре возбужденного генератора создает электромагнитный момент, который для двигателя является тормозным. Увеличивая ток в генераторе путем уменьшения сопротивления нагрузки реостата R_5 , увеличивает нагрузку на двигатель.

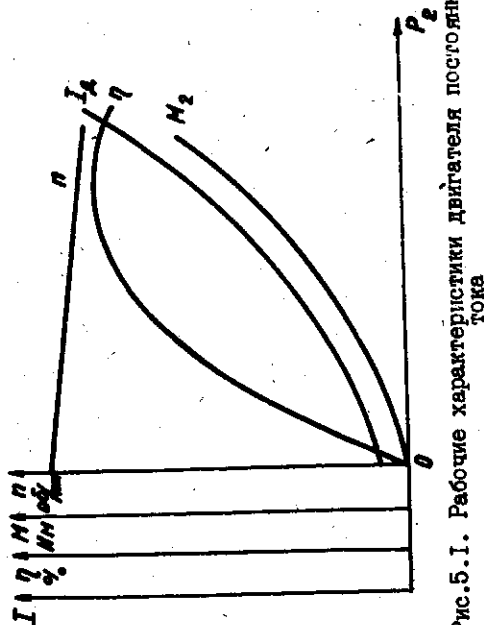


Рис. 5.1. Рабочие характеристики двигателя постоянного тока

Для получения рабочих характеристик измеряют напряжение и ток якоря двигателя, ток в обмотке возбуждения двигателя, частоту вращения, напряжение и ток якоря генератора.

Первое измерение производят при отсутствии тока в якоре генератора в режиме холостого хода двигателя с номинальной частотой вращения. Затем с помощью регулировочного реостата R_n в обмотке возбуждения генератора устанавливают номинальное напряжение, подключают нагрузочный реостат, который должен быть полностью введен (имеет наибольшее сопротивление).

Постепенно уменьшая сопротивление нагрузочного реостата, увеличивают ток генератора и нагружают двигатель от холостого хода до $P = P_n$. Показания приборов заносятся в табл. 5.2. Таблица 5.2

№ п/п	Измерено					Вычислено				
	U_n В	I_a А	n , об/мин	U_r , В	I_r , А	P_r , Вт	$\eta_{\text{ср.}}$, %	P_1 , Вт	P_2 , Вт	M , Нм

По полученным данным рассчитывают мощность, потребляемую двигателем от сети $P_1 = U_r I_r$; мощность генератора $P_r = U_r I_r$; КПД агрегата $\eta_{\text{ср}} = (P_r / P_1) 100\%$; КПД электродвигателя $\eta = \sqrt{\eta_{\text{ср}}}$ предполагая равенство $\eta_{\text{ср}} = \eta_1^2$, так как здесь генератор и двигатель являются однопотными машинами с примерно равной мощностью $\eta_r = \eta_d = \eta$, откуда $\eta_{\text{ср}} = \eta_r \eta_d = \eta^2$; полезную мощность $P_2 = P_1 \eta$. Поскольку ток якоря двигателя $I_{\text{ад}} \gg I_{\text{вд}}$, принимаем $I_{\text{ад}} = I_d$. Вращающий момент двигателя

$$M = \frac{P_2}{\omega} = \frac{P_2}{2\pi n} 60,$$

где мощность P_2 выражается в ваттах, а момент — в ньютон-метрах (Нм).

По результатам измерений и вычислений строят рабочие характеристики двигателя параллельного возбуждения, примерный вид которых показан на рис. 5.1.

3. Снятие регулировочных характеристик ДПТ параллельного возбуждения. Из уравнения для частоты вращения ДПТ

$$n = \frac{U_d - I_d (R_a + R_p)}{C_E \Phi}$$

следует, что частоту вращения можно регулировать изменением подводимого напряжения к двигателю U_d , включением в цепь якоря добавочного сопротивления R_p и изменением потока возбуждения Φ .

Регулирование частоты вращения посредством изменения величины подводимого напряжения U_d возможно только при наличии специального источника электроэнергии, допускающего регулирование U_d . Регулирование частоты вращения с помощью дополнительного сопротивления в цепи якоря неэкономно, так как через дополнительное сопротивление проходит весь ток якоря I_d , а это обуславливает значительные потери мощности $I_d^2 R_p$.

Частота вращения n обратно пропорциональна основному магнитному потоку Φ . Пока машина на насыщена, можно считать, что магнитный поток Φ пропорционален току возбуждения $I_{\text{вд}}$. Следовательно, частоту вращения ДПТ можно регули-

ревать изменением тока возбуждения $I_{\text{вд}}$. Зависимость $n = f(I_{\text{вд}})$ при $U_{\text{в}} = U_{\text{н}} = \text{const}$, $M_2 = 0$ называется регулировочной или характеристикой холостого хода. Характеристика холостого хода снимается по схеме рис. 4.1. Выключатель B_2 устанавливается в положение "ВЫКЛЮЧЕНО", что соответствует холостому ходу ДПТ. Регулировочный реостат в цепи возбуждения ДПТ R_1 установлен в такое положение, при котором частота вращения ДПТ составляет $1,2 n_{\text{н}}$. Затем, постепенно уменьшая сопротивление реостата R_1 , увеличивают ток возбуждения $I_{\text{вд}}$, а следовательно, и поток Φ . Частота вращения ДПТ при этом уменьшается. Опыт проводится до тех пор, пока сопротивление R_1 не будет полностью выведено. При снятии характеристики холостого хода $n = f(I_{\text{вд}})$ измеряют ток возбуждения $I_{\text{вд}}$, частоту вращения n и ток якоря $I_{\text{я}}$ (всего 3-4 измерения).

Показания приборов заносятся в табл. 5.3.

Таблица 5.3

R п/п	$I_{\text{вд}}, \text{mA}$	$n, \text{об/мин}$	$I_{\text{я}}, \text{A}$	Примечание
				$U_{\text{в}} = \text{const}$ $M_2 = 0$

По полученным данным строят зависимость $n = f(I_{\text{вд}})$, примерный вид которой показан на рис. 5.2. Поскольку сила тока $I_{\text{вд}}$ относительно мала (порядка 2-3% от $I_{\text{я}}$), дополнительные потери мощности $I_{\text{вд}}^2 (R_2 + R_1)$ при регулировании частоты вращения ослаблением потока Φ так же относительно малы, благодаря чему такое регулирование экономично (R_2 - сопротивление обмотки возбуждения ДПТ). Регулирование частоты вращения ДПТ с помощью дополнительного сопротивления в цепи якоря неэкономично, так как через дополнительное сопротивление (на рис. 4.1 R_2 и R_3) проходит весь ток якоря $I_{\text{я}}$, а это обуславливает значительные потери мощности $I_{\text{я}}^2 (R_2 + R_3)$. Построить естественную и искусственные скоростные характеристики ДПТ $n = f(I_{\text{я}})$ при $I_{\text{вд}} = \text{const}$: а) при замкнутых B_2 и B_3 , б) при замкнутом B_2 и разомкнутом B_3 ; в) при разомкнутых B_2 и B_3 .

Опытные данные занести в таблицу, аналогичную табл. 5.2, с требуемым числом столбцов.

4. Реверс ДПТ с параллельным возбуждением осуществляется двумя способами: изменением направления тока в обмотке возбуждения или в обмотке якоря. Произвести необходимые переключения и убедиться в возможности реверса ДПТ.



Рис. 5.2. Характеристика холостого хода двигателя для постоянного тока

Контрольные вопросы

1. В чем суть принципа обратимости электрических машин?
2. Какие существуют способы возбуждения ДПТ?
3. Какую роль играет ЭДС ДПТ в процессе саморегулирования?
4. От каких величин зависит вращающий момент ДПТ?
5. Какое влияние оказывает реакция якоря ДПТ на его работу?
6. Какие существуют способы регулирования частоты вращения ДПТ?
7. Какие величины входят в уравнение для тока, потребляемого двигателем от сети?
8. Как ограничивается пусковой ток ДПТ?
9. Почему с ростом нагрузки на двигатель частота вращения изменяется незначительно, т.е. характеристика $n = f(P_{\text{э}})$ жесткая?
10. Почему при изменении нагрузки от холостого хода до $0,25 P_{\text{н}}$ КПД резко возрастает, а при увеличении нагрузки свыше номинальной убывает?
11. Как объяснить характер изменения вращающего момента ДПТ при изменении его нагрузки от холостого хода до номинальной?

12. Как определяется частота вращения идеального холостого хода ДПГ?
13. Что произойдет при обрыве обмотки возбуждения ДПГ?
14. К каким последствиям приведет обрыв в цепи возбуждения нагрузочного генератора?

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. АРХАНГЕЛЬСКИЙ Е.Н. и др. Судовая электротехника и электромеханика. Л.: Судостроение, 1985.
2. БОРИСОВ В.М. и др. Электротехника. М.: Энергоатомиздат, 1985.
3. БРУСКИН Д.Э. и др. Электрические машины. М.: Высш.шк., 1987.

С о д е р ж а н и е

Правила техники безопасности при выполнении лабораторных работ	3
Работа 1. Однофазный трансформатор	4
Работа 2. Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором	13
Работа 3. Синхронный генератор	23
Работа 4. Генератор постоянного тока	36
Работа 5. Двигатель постоянного тока	45
Литература	52