

Министерство образования и науки Российской Федерации

Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова

Кафедра электроэнергетики

Утверждено
научно-методическим советом
университета

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Методические указания к выполнению лабораторных работ
для студентов всех специальностей

Белгород, 2012

Министерство образования и науки Российской Федерации

Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Методические указания к выполнению лабораторных работ
для студентов всех специальностей

Белгород, 2012

УДК 621.313.2
ББК 31.261
Э45

Составители: Духанин С.А., ст. преподаватель
Рудаков Ю.И., ст. преподаватель
Рецензент Виноградов А.А., канд. техн. наук, проф.

Электрические машины постоянного тока:
Э45 Метод. указания. – 3-е изд., перераб. –
Белгород: изд-во БГТУ, 2012. – 29 с.

Методические указания к лабораторным работам по разделу «Электрические машины постоянного тока» разработаны на основании типовой программы по электротехнике.

В каждой лабораторной работе даются краткие теоретические сведения, порядок выполнения работы, контрольные вопросы и литература.

Предназначены для студентов всех специальностей.

УДК 621.313.2
ББК 31.261

© Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ),

Содержание

Введение	3
Лабораторная работа №1. Генераторы постоянного тока.....	4
Лабораторная работа №2. Двигатель постоянного тока	18
Список используемой литературы	26

Введение

Электрические машины являются основными преобразователями механической энергии в электрическую или электрической энергии в механическую. В первом случае машина работает в качестве электрогенератора, во втором – та же машина становится электродвигателем. Этим свойством обратимости обладают все электрические машины. Кроме того, электрическая машина может выполнять функцию электромагнитного тормоза и некоторые специальные функции (специальные машины).

Среди электрических машин одними из первых являются двигатели постоянного тока. Первый двигатель постоянного тока был использован в 1838 году академиком Б.С. Якоби. Двигатель работал от батареи гальванических элементов. Первые генераторы постоянного тока появились значительно позже – в 1870 году.

Электрические машины постоянного тока до сих пор широко применяются в качестве генераторов и двигателей, несмотря на преимущественное распространение электроэнергии переменного тока. Двигатели постоянного тока обладают важными преимуществами перед другими электродвигателями:

1. допускают плавное регулирование частоты вращения;
2. создают большой момент при пуске.

Поэтому их широко используют в качестве тяговых двигателей на электротранспорте. Плавное регулирование частоты вращения двигателей осуществляется с помощью относительно простой аппаратуры управления, а иногда и системой машин, в которую входят генератор и двигатель постоянного тока.

В системах автоматического регулирования специальные генераторы постоянного тока используются как усилители электрических сигналов управления и как тахогенераторы – датчики частоты вращения, а двигатели часто являются исполнительными звеньями таких систем. Широкое применение находят генераторы постоянного тока и для других целей. Генераторы низкого напряжения используются для питания электролитических ванн и зарядки аккумуляторов, а также для высококачественной сварки.

Машины постоянного тока входят в число элементов автомобильного, судового и самолетного электрооборудования. Они выпускаются на различные мощности и напряжения: крупные машины (мощность 6000 кВт) – для прокатных станов и микромашины (доли ватта) – для систем автоматики.

Машины высокого напряжения (до 30 кВ) мощностью от 3 до 150 кВт используются в радиотехнических установках. Низкое напряжение 20...60 В имеют сварочные генераторы, 6...12 В – электрические машины на автотранспорте и др.

Основной недостаток машины постоянного тока связан с так называемым щеточно-коллекторным механизмом. При определенных условиях щет-

ки могут искрить (коммутация). Это снижает надежность и требует надзора за машиной.

Во взрывоопасных средах такую машину использовать нельзя. Коллектор усложняет и удорожает ее конструкцию и эксплуатацию по сравнению с безколлекторной машиной переменного тока. Кроме того, для питания двигателей постоянного тока необходимо дополнительное оборудование – генераторы постоянного тока или выпрямители, так как основной вид энергообеспечения промышленности – электроэнергия переменного тока.

Лабораторная работа № 1

ГЕНЕРАТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы: ознакомление с конструкцией генератора постоянного тока, аппаратурой измерения и управления, характеристиками, методами испытания.

Основные формулы и понятия

Электрические машины, которые преобразуют механическую энергию, подводимую к их валу от первичного двигателя, в электрическую энергию постоянного напряжения, называют генераторами постоянного тока. Работа этих генераторов основана на законе электромагнитной индукции, согласно которому при пересечении проводником магнитных силовых линий в проводнике индуцируется электродвижущая сила (ЭДС).

Различают несколько способов возбуждения машин постоянного тока: независимое возбуждение (рис. 1.1, а) – питание обмотки возбуждения от независимого источника и самовозбуждение – питание обмотки возбуждения от обмотки якоря самого генератора.

Самовозбуждение в генераторах постоянного тока может быть осуществлено при соединении обмоток возбуждения с обмоткой якоря: параллельном (рис. 1.1, б), последовательном (рис. 1.1, в) и смешанном согласном или встречном (рис. 1.1, г).

Самовозбуждение генератора происходит при наличии трёх условий:

1. остаточного магнитного потока, создающего остаточную ЭДС ($E_{ост}$) (рис. 1.2);
2. совпадения направления поля обмотки возбуждения с направлением остаточного магнитного потока;
3. сопротивление обмотки возбуждения (при параллельном возбуждении) меньше критического, т.е. когда ток возбуждения способен достигнуть значения, обеспечивающего на характеристике холостого хода заданное значение ЭДС (E).

Последнее вытекает из равенства $R_B I_B = E - R_A I_A$, которое на рис. 1.2 соответствует точке пересечения A зависимостей $E=f(I_B)$ и $U_B = I_B R_B$. А при увеличении сопротивления (R_B) точка A будет перемещаться по кривой (E) вниз, и когда (R_B) достигнет критического значения, т.е. $R_B = R_{кр}$, генератор практически не самовозбудится.

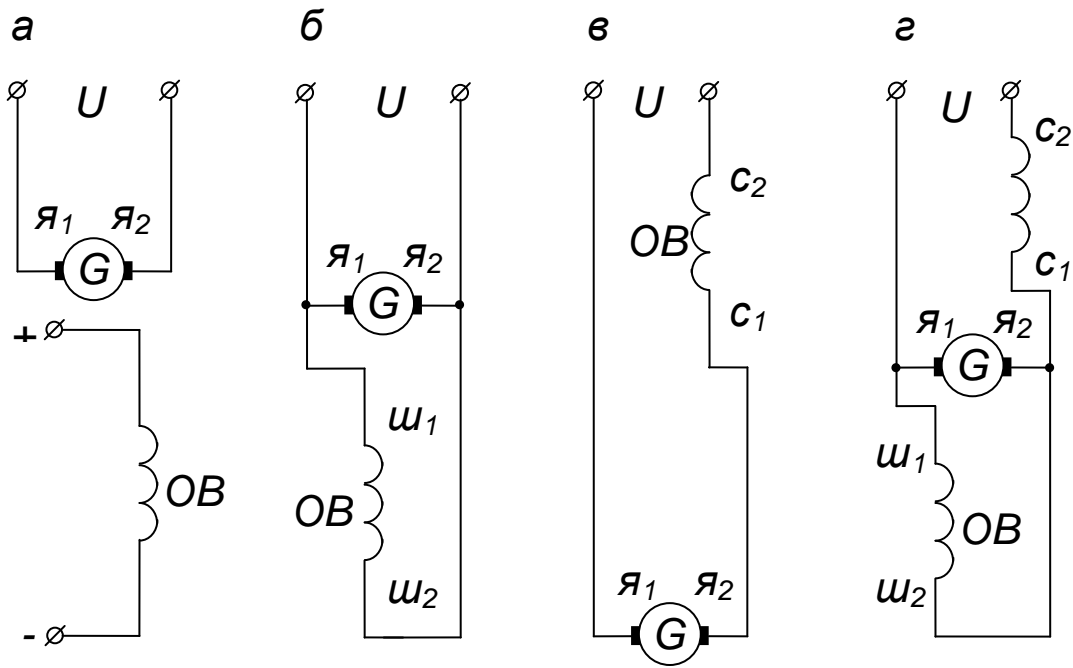


Рис. 1.1. Схемы возбуждения генераторов постоянного тока: а – независимое; б – параллельное; в – последовательное; г – смешанное

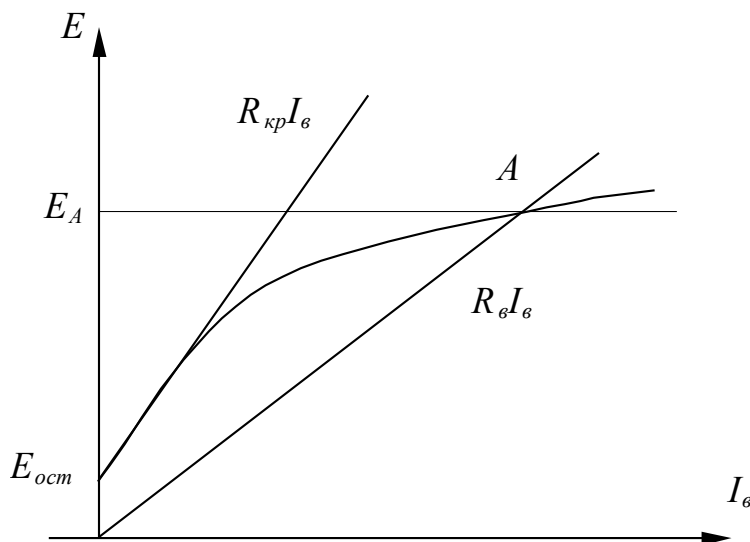


Рис. 1.2. Самовозбуждение генератора постоянного тока

В данной работе исследуются генераторы с независимым, параллельным и смешанным возбуждением. Основными величинами, характеризующими работу генераторов постоянного тока, являются: мощность генератора P , напряжение на выводах U , ток возбуждения I_B , ток якоря I_A или ток нагрузки I_H и частота вращения n (как правило $n=\text{const}$).

Зависимости между отдельными величинами, характеризующими свойства генератора, обычно даются в виде характеристик. Основными характеристиками являются: характеристика холостого хода, внешняя и регулировочная характеристики.

Характеристика холостого хода – зависимость напряжения на зажимах генератора от тока возбуждения:

$$U=f(I_B) \text{ при } I_H=0 \text{ и } n=\text{const},$$

где I_H – ток нагрузки; n – частота вращения.

При холостом ходе машины, когда цепь нагрузки разомкнута, напряжение на зажимах обмотки якоря равно ЭДС: $E=C_E\Phi_n$. Так как $n=\text{const}$, напряжение при холостом ходе зависит только от магнитного потока Φ_n , т.е. тока возбуждения I_B . Поэтому характеристика $U=f(I_B)$ подобна магнитной характеристике $\Phi=f(I_B)$ (рис. 1.3).

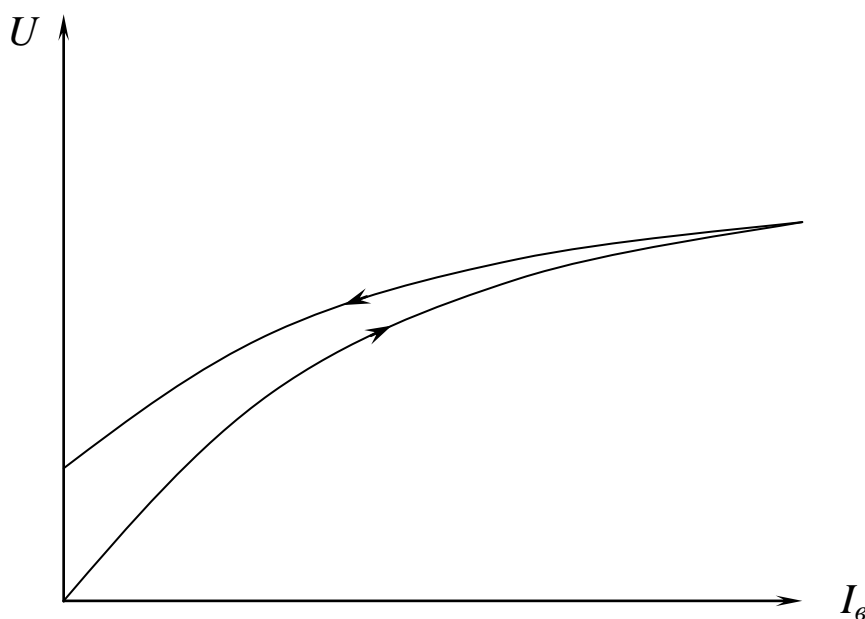


Рис. 1.3. Характеристики холостого хода генератора

Расхождение восходящей и нисходящей ветвей объясняется наличием гистерезиса в магнитопроводе машины.

Внешняя характеристика – зависимость напряжения на зажимах генератора от тока нагрузки:

$$U=f(I_H) \text{ при } n=\text{const} \text{ и } R_B=\text{const};$$

где R_B – сопротивление параллельной обмотки возбуждения.

В генераторе параллельного возбуждения при увеличении тока нагрузки I_n ток якоря увеличивается, так как $I_a = I_b + I_n$, а напряжение на зажимах уменьшается $U = E - R_a I_a$.

Уменьшение напряжения приводит к снижению тока возбуждения, так как $I_b = \frac{U}{R_{об} + R_p}$, что в свою очередь ещё больше уменьшит напряжение.

Кроме того, с увеличением тока повышается реакция якоря, которая ведет к снижению напряжения (рис. 1.4).

Чтобы скомпенсировать такое нежелательное падение напряжения, в генераторах добавляют ещё одну обмотку возбуждения, включаемую последовательно с нагрузкой. Такой генератор называется генератором смешанного возбуждения. Через последовательную обмотку возбуждения проходит ток нагрузки, при его возрастании поток возбуждения увеличивается, следовательно, становится больше и ЭДС генератора.

Такое соединение обмоток называется согласным включением. Можно так рассчитать последовательную обмотку, что увеличение падения напряжения скомпенсируется и величина напряжения на зажимах будет постоянной или даже немного увеличится (см. рис. 1.4, кривая 3).

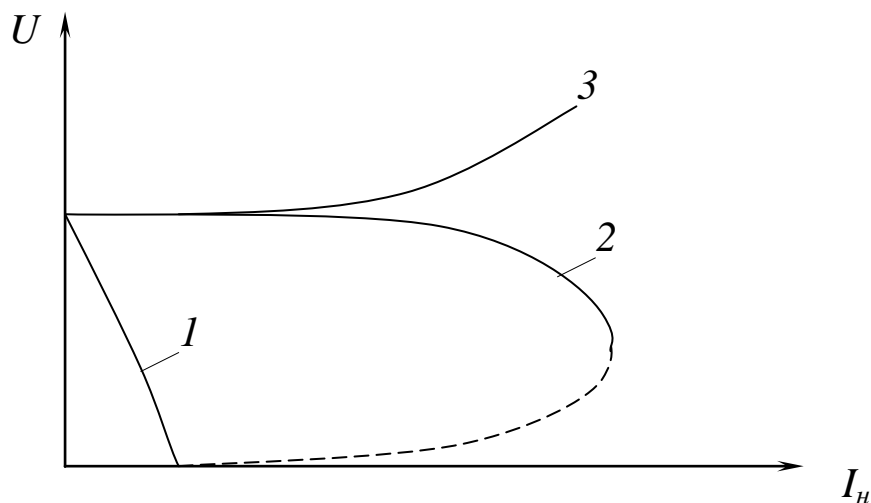


Рис. 1.4. Внешние характеристики генераторов: 1 – при смешанном соединении (встречное соединение обмоток возбуждения); 2 – при параллельном возбуждении; 3 – при смешанном соединении (согласное соединение обмоток возбуждения).

Если же включить последовательную обмотку возбуждения встречно с параллельной, то увеличение тока нагрузки приведёт к резкому падению напряжения (см. рис. 1.4, кривая 1). Такое встречное (несогласное) включение делают, например, в сварочных генераторах для ограничения тока короткого замыкания.

Регулировочная характеристика генератора – это зависимость тока возбуждения от тока нагрузки:

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

Регулировочная характеристика показывает, как следует изменять ток возбуждения генератора при изменении тока нагрузки, чтобы напряжение на зажимах генератора оставалось неизменным.

Из внешней характеристики генератора параллельного возбуждения (см. рис. 1.4, кривая 2) видно, что с увеличением тока нагрузки напряжение на его зажимах понижается, чтобы вновь восстановить его прежнее значение, необходимо увеличить ток возбуждения. Регулировочные характеристики генераторов приведены на рис. 1.5.

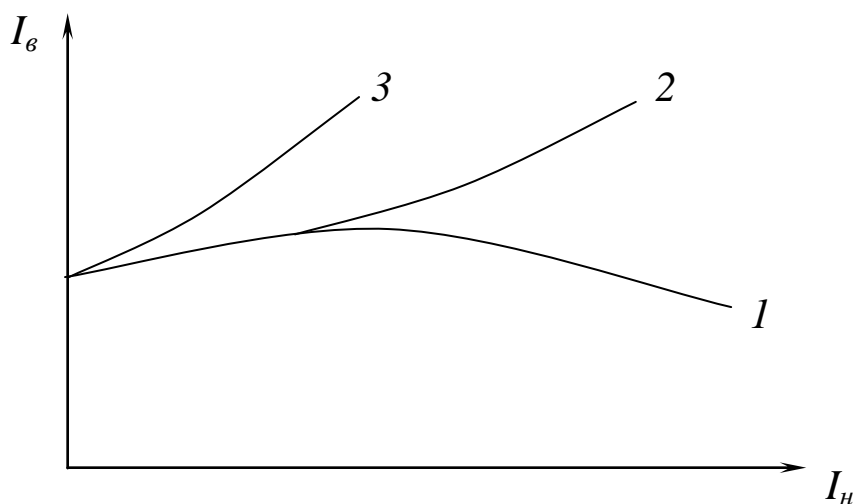


Рис. 1.5. Регулировочные характеристики генератора: 1 – при смешанном соединении (согласное соединение обмоток возбуждения); 2 – при параллельном возбуждении; 3 – при смешанном соединении (встречное соединение обмоток возбуждения).

Методика выполнения лабораторной работы (лаборатория № 221)

1. Ознакомиться на демонстрационном стенде «Машины постоянного тока» с устройством генератора постоянного тока, а на лабораторном стенде – с приборами, аппаратами и подлежащим испытанию генератором.

Записать в отчёт по лабораторной работе технические паспортные данные генератора.

2. На рабочей панели стенда «Генератор постоянного тока» в соответствии с принципиальной схемой (рис. 1.6) собрать электрическую цепь для снятия характеристики холостого хода генератора независимого возбуждения.

В качестве независимого источника электрической энергии для питания обмотки возбуждения генератора используется блок постоянной регулировки напряжения +110 В (ручка «Регулировка возбуждения» синхронной машины и генератора постоянного тока). В случае генератора с параллельным возбуждением изменение тока возбуждения осуществляется резистором $R_{\text{в}}$

«Регулировка возбуждения». Нагрузка генератора изменяется ступенчатым нагрузочным реостатом, переводя ручку из положения «1» в положение «7». Все необходимые электроизмерительные приборы показаны на электрической схеме и на передней панели стенда «Машины постоянного тока».

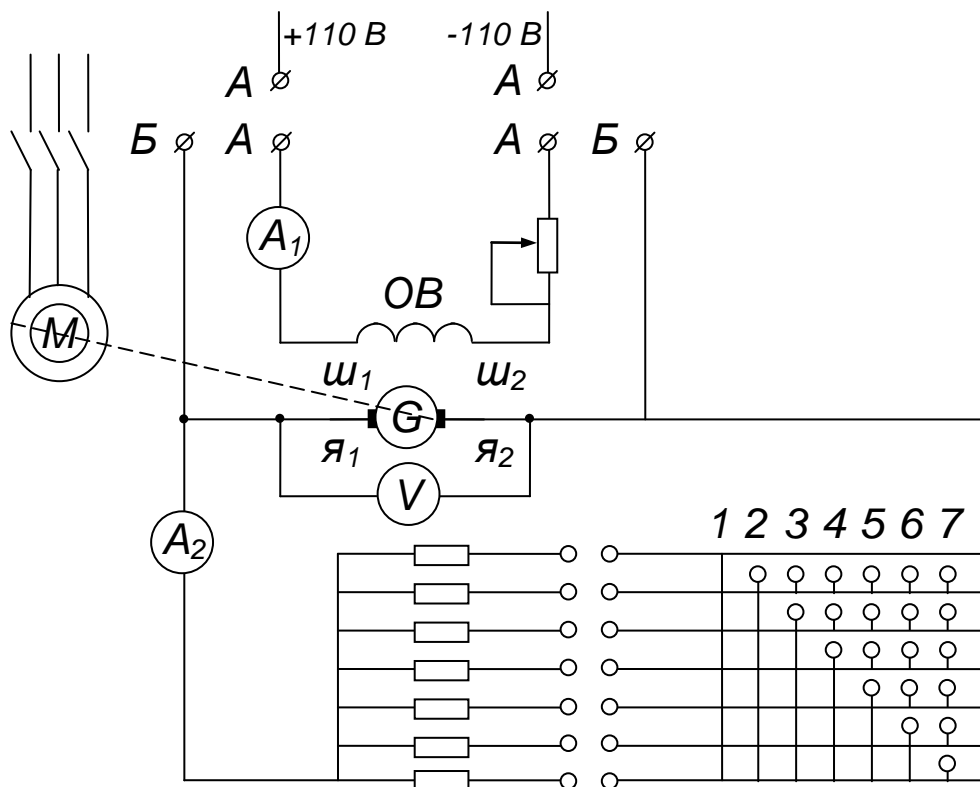


Рис. 1.6. Принципиальная электрическая схема генератора постоянного тока

Монтаж электрической цепи производить согласно монтажной схеме, указанной на рис. 1.7.

Перед пуском исследуемого генератора необходимо убедиться в том, что:

- а) нагрузка генератора отключена (ручка нагрузочного реостата находится в крайнем левом положении «1»;
- б) сопротивление реостата в цепи обмотки возбуждения генератора полностью выведено (ручка реостата «Регулировка возбуждения» на панели «Машины постоянного тока» находится в крайнем правом положении;
- в) напряжение на обмотке возбуждения генератора равно нулю (ручка «Регулировка возбуждения» синхронной машины и генератора постоянного тока находится в крайнем левом положении).

3. Произвести пуск генератора независимого возбуждения. Для этого необходимо:

- а) нажать кнопку «ВКЛ» на нагрузочной панели стенда;
- б) нажать кнопку «ВКЛ» на панели «Машины постоянного тока» (загорится лампа «Сеть»);

- в) нажать кнопку «ВКЛ» – включение синхронной и асинхронной машин на панели «Синхронная машина»;
- г) нажать кнопку «ВКЛ» возбуждения синхронной машины и генератора постоянного тока;
- д) плавно изменяя ток возбуждения ручкой «Регулировка» на панели «Синхронная машина», снять характеристику холостого хода генератора постоянного тока независимого возбуждения.

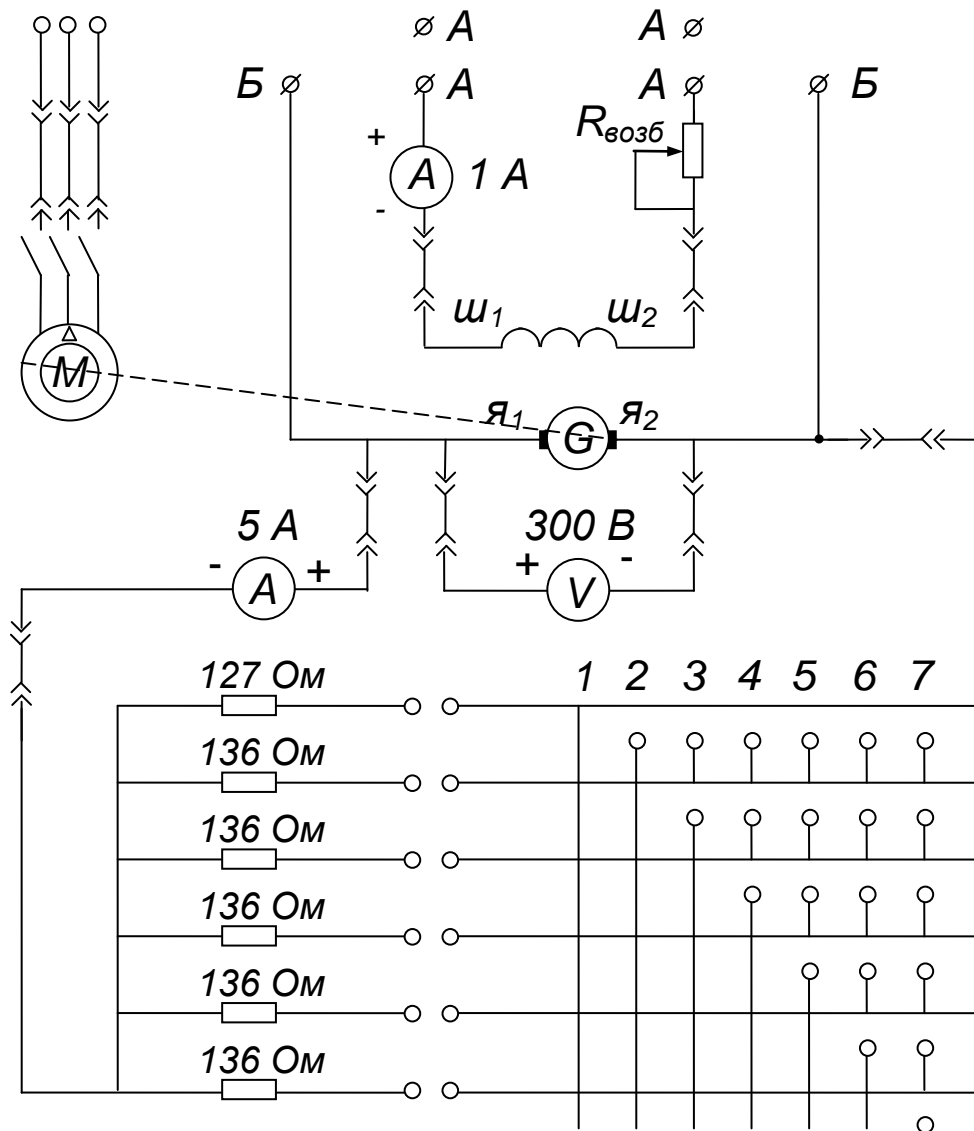


Рис. 1.7. Монтажная схема лабораторной работы

При этом ток возбуждения I_b увеличивайте ступенями от нуля до $I_b = I_{b \max}$, а затем уменьшайте ток возбуждения до нуля. Полученные результаты запишите в табл. 1.1.

Таблица 1.1

№ п/п	I_B, A	E, B (увеличение)	E, B (уменьшение)
1			
2			
3			
⋮			
⋮			
⋮			

4. Снять внешнюю характеристику генератора независимого возбуждения, $U=f(I)$ при неизменных частоте вращения $n=n_n=const$ и токе возбуждения $I_B=I_{вн}=const$.

Для этого в режиме холостого хода установить номинальное напряжение $U=U_n$, воспользовавшись рекомендациями п. 3 а, б, в, г.

Ток нагрузки увеличивать ступенями, переводя ручку нагрузочного реостата генератора из положения «1» в положение «7».

Полученные данные записать в табл. 1.2.

Таблица 1.2

I_n, A									
U, B									

5. Снять регулировочную характеристику генератора независимого возбуждения $I_B=f(I)$ при условии поддержания постоянных напряжения на выводах генератора ($U=const$) и частоты вращения якоря $n=n_n=const$.

Изменяя нагрузку генератора нагрузочным реостатом, напряжение генератора поддерживайте постоянным при помощи ручки «Регулировка» на панели «Синхронная машина».

Полученные данные записать в табл. 1.3.

Таблица 1.3

I_n, A									
I_B, A									

6. На рабочей панели стенда «Генератор постоянного тока» собрать электрическую цепь генератора постоянного тока параллельного возбуждения. Для этого необходимо переключки из положения А–А переставить в положение А–Б (см. монтажную схему лабораторного стенда).

Перед пуском генератора необходимо убедиться в том, что:

- а) нагрузка генератора отключена (ручка нагрузочного реостата находится в крайнем левом положении «1»);
- б) сопротивление реостата в цепи обмотки возбуждения генератора полностью введено (ручка реостата «Регулировка возбуждения» на панели «Машины постоянного тока» находится в крайнем левом положении);
- в) напряжение на обмотке возбуждения генератора равно нулю (ручка «Регулировка возбуждения» синхронной машины и генератора постоянного тока находится в крайнем левом положении).

7. Снять внешнюю характеристику генератора параллельного возбуждения.

Для этого, воспользовавшись рекомендациями п. 3 а, б, установить номинальное напряжение $U=U_n$, изменяя сопротивление реостата в цепи обмотки возбуждения (ручка реостата «Регулировка возбуждения» на панели «Машины постоянного тока»).

Ток нагрузки увеличивать ступенями, переводя ручку нагрузочного реостата генератора из положения «1» в положение «7».

Полученные данные записать в табл. 1.4 аналогичную предыдущей (см. табл. 1.2).

8. Снять регулировочную характеристику генератора параллельного возбуждения.

Изменяя нагрузку генератора нагрузочным реостатом, напряжение генератора поддерживать постоянным при помощи ручки реостата «Регулировка возбуждения» на панели «Машины постоянного тока».

Полученные данные записать в табл. 1.5 аналогичную предыдущей (см. табл. 1.3).

9. По данным табл. 1.1 – 1.5 построить характеристику холостого хода, внешние и регулировочные характеристики. Внешние и регулировочные характеристики для разных видов возбуждений построить в одной системе координат.

10. Рассчитать:

- а) ток якоря генератора при номинальной нагрузке:
 $I_a=I_n$ для генератора независимого возбуждения,
 $I_a=I_n+ I_{вн}$ для генератора параллельного возбуждения;
- б) номинальную мощность генератора: $P_n=U_n I_n$;
- в) изменение напряжения генераторов независимого и параллельного возбуждений при номинальной нагрузке, воспользовавшись внешними характеристиками:

$$U\% = \frac{U_{xx} - U_n}{U_{xx}} \cdot 100\%;$$

- г) мощность на валу первичного двигателя генераторов независимого и параллельного возбуждений:

$$P_{\text{мех.н}} = P_n + \Delta UI_{\text{я}} + I_{\text{в}}^2 R_{\text{в}} + 0,04P_n$$

(механические и магнитные потери составляют 4% от P_n);

- д) коэффициент полезного действия генератора: $\eta = \frac{P_n}{P_{\text{мех.н}}}$.

11. Сделать и записать выводы по работе.

Описание лабораторного стенда (лаборатория № 421)

В нижней части стенда установлены генератор постоянного тока и асинхронный двигатель, приводящий через ременную передачу во вращение якорь генератора. В закрытой части стенда также размещены нагрузочные реостаты, пускатель асинхронного двигателя.

Все необходимые коммутации осуществляются путём переключений тумблеров, размещённых на рабочей панели стенда. Здесь же находятся измерительные приборы PA1, PA2, PV, регулировочный реостат генератора R1, нагрузочный реостат R6.

Подключение стенда осуществляется автоматом на распределительном пункте.

Включение и выключение электродвигателя осуществляется кнопками «Пуск» и «Стоп», расположенными на рабочей панели стенда.

Подключения необходимого вида возбуждения осуществляются путём переключения SA2 в положение «параллельное» (позиция 1) или «смешанное» (позиция 2); в случае смешанного возбуждения переключателем SA3 устанавливается «согласное» (позиция 1) или «встречное» (позиция 2) включение.

Цепи возбуждения включаются выключателем SA1.

Нагрузка осуществляется последовательным включением выключателей SA4, SA5, SA6, SA7, SA8.

Из схемы (рис. 1.8) видно, что при отключении нагрузки цепь обмотки возбуждения L2 (серийная) разомкнута, поэтому опыт холостого хода проводится только для генератора с параллельным возбуждением.

Реостат R6 позволяет плавно выводить нагрузку до нуля и закоротить цепь обмотки возбуждения.

Ток в обмотке возбуждения L1 (шунтовая) измеряется амперметром PA1, ток нагрузки – амперметром PA2, напряжение – вольтметром PV.

Ток якоря $I_{\text{я}} = I_{\text{в}} + I_{\text{н}}$.

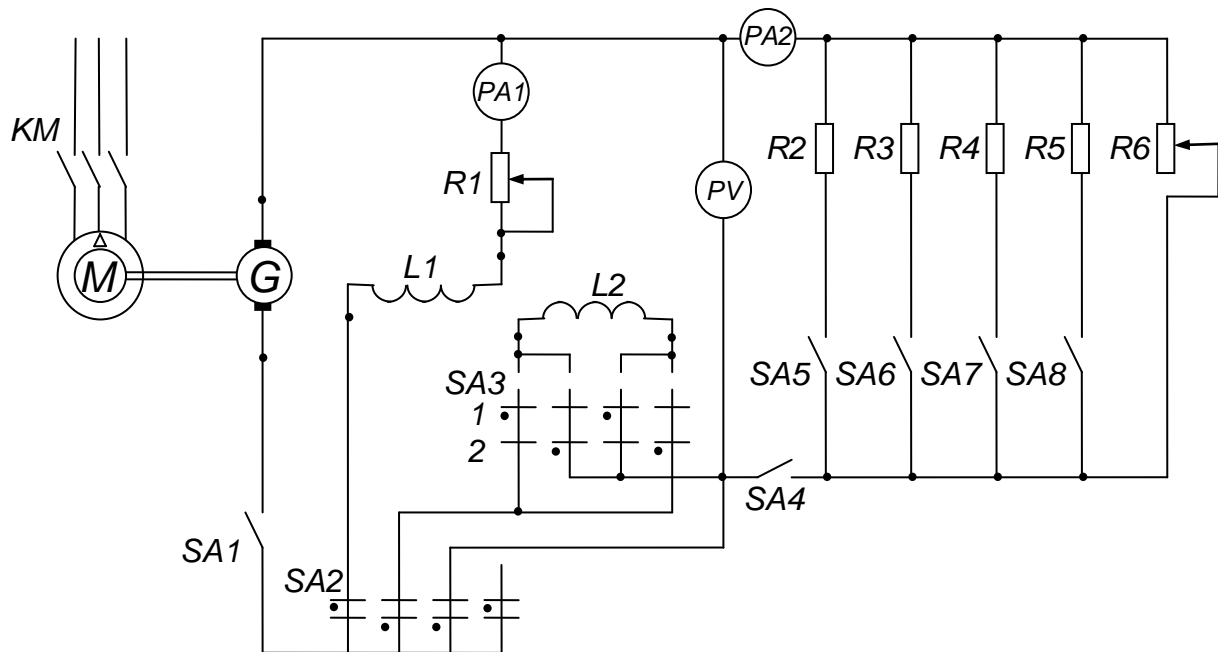


Рис. 1.8. Схема лабораторного стенда для исследования генератора постоянного тока

Методика выполнения лабораторной работы

1. Запишите паспортные данные генератора.
2. Объясните назначение элементов схемы (см. рис. 1.8).
3. Снимите характеристику холостого хода генератора.

При этом ток возбуждения I_B при помощи регулировочного реостата R1 увеличивайте ступенями от нуля (цепь возбуждения разомкнута) до $I_B = I_{B \max}$, а затем уменьшайте ток возбуждения ступенями до нуля.

При токе возбуждения $I_B = 0$ ЭДС $E \neq 0$, так как машина обладает остаточным магнетизмом. Восходящая и нисходящая кривые не совпадут друг с другом из-за явления гистерезиса (см. рис. 1.3).

Полученные данные запишите в табл. 1.6

Таблица 1.6

№ измерения	I_B, A	E, B (увеличение)	E, B (уменьшение)
1			
2			
3			
⋮			
⋮			

4. Снимите внешние характеристики генератора при различных видах возбуждения (параллельное, смешанное согласное, смешанное встречное).

Для этого в режиме холостого хода установите номинальное напряжение $U=U_n$. Выбрать и подключить нужный вид возбуждения (переключатели SA2, SA3, выключатель SA1). Ток нагрузки увеличивать ступенями, подключая нагрузочные реостаты R2...R6. выключателями SA4...SA8. Последний замер произведите при закороченной внешней цепи (вывести реостат R6), т.е. $I_a = I_{к.з.}$, при этом $U=0$.

Полученные данные генератора параллельного возбуждения запишите в табл. 1.7.

Таблица 1.7

I_n, A	0								
U, B									

Полученные данные генератора смешанного согласного возбуждения запишите в табл. 1.8.

Таблица 1.8

I_n, A	0								
U, B									

Полученные данные генератора смешанного встречного возбуждения запишите в табл. 1.9.

Таблица 1.9

I_n, A	0								
U, B									

5. Снимите регулировочные характеристики генератора при различных видах возбуждения.

Напряжение во время опыта поддерживайте постоянным при помощи регулировочного реостата R1. (В связи с особенностями лабораторных стендов

при выполнении п. 5 рекомендуется установить напряжение ниже номинального на 20 – 25%.)

Полученные данные генератора параллельного возбуждения запишите в табл. 1.10.

Таблица 1.10

I_H, A									
I_B, A									

Полученные данные генератора смешанного согласного возбуждения запишите в табл. 1.11.

Таблица 1.11

I_H, A									
I_B, A									

Полученные данные генератора смешанного встречного возбуждения запишите в табл. 1.12.

Таблица 1.12

I_H, A									
I_B, A									

6. По данным табл. 1.6...1.12 постройте характеристику холостого хода, внешние и регулировочные характеристики. Внешние и регулировочные характеристики для разных видов возбуждений строить в одной системе координат.

7. Проанализируйте полученные кривые, и объясните их ход.

8. Рассчитайте:

а) ток якоря генератора параллельного возбуждения при номинальной нагрузке: $I_{\text{я}} = I_H + I_{\text{вн}}$;

б) номинальную мощность генератора: $P_H = U_H I_H$;

в) изменение напряжения генераторов параллельного и смешанного возбуждений при номинальной нагрузке, воспользовавшись внешними характеристиками:

$$U\% = \frac{U_{xx} - U_n}{U_{xx}} \cdot 100\%;$$

- г) мощность на валу первичного двигателя генераторов параллельного и смешанного возбуждений:

$$P_{\text{мех.н}} = P_n + \Delta UI_{\text{я}} + I_{\text{в}}^2 R_{\text{в}} + 0,04P_n$$

(механические и магнитные потери составляют 4% от P_n);

- д) коэффициент полезного действия генератора: $\eta = \frac{P_n}{P_{\text{мех.н}}}$.

9. Сделайте и запишите выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Объясните принцип действия генератора постоянного тока и назначение его основных частей.
2. Объясните назначение щеточно-коллекторного узла.
3. Назовите условия самовозбуждения генератора.
4. От каких величин зависит напряжение на зажимах генератора?
5. Какие системы возбуждения применяются в генераторах постоянного тока?
6. Реакция якоря и её влияние на работу генератора?
7. От каких величин зависит ЭДС, наводимая в якоре, величина противодействующего и электромагнитного моментов?
8. Напишите уравнение электрического состояния для генератора.

Литература

[1, с. 386-464 с. 2, с. 332 – 359].

Лабораторная работа № 2

ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы: практическое ознакомление с двигателем постоянного тока, аппаратурой измерения и управления, способом пуска и регулирования частоты вращения, характеристиками и методами испытания.

Основные формулы и понятия

Двигатели постоянного тока параллельного возбуждения нашли широкое применение в электроприводах различных типов благодаря простоте, плавности и экономичности регулирования частоты вращения, а также широкому диапазону этого регулирования.

Для двигателя справедливо уравнение:

$$U = E_{\text{я}} + R_{\text{я}} I_{\text{я}},$$

где U – напряжение, приложенное к двигателю; $E_{\text{я}}$ – противоэлектродвижущая сила якоря; $I_{\text{я}}$ – ток в якоре двигателя; $R_{\text{я}}$ – сопротивление обмотки якоря.

Согласно закону электромагнитной индукции:

$$E_{\text{я}} = \frac{p}{a} \cdot N \cdot \frac{n}{60} \cdot \Phi,$$

где p – число пар полюсов; a – число пар параллельных ветвей обмоток якоря; N – число проводников обмотки якоря; n – частота вращения, об/мин; Φ – магнитный поток возбуждения.

Учитывая, что число пар полюсов (p), число пар параллельных ветвей (a) и число проводников обмотки (N) для конкретной машины величины постоянные и, обозначив $\frac{pN}{60a} = C_E$, можно написать $E_{\text{я}} = C_E n \Phi$. Откуда частота вращения:

$$n = \frac{E_{\text{я}}}{C_E \Phi} = \frac{U - R_{\text{я}} I_{\text{я}}}{C_E \Phi}. \quad (2.1)$$

Потеря напряжения в якоре $R_{\text{я}} I_{\text{я}}$ обычно величина небольшая (2...7%) при номинальной нагрузке, поэтому можно считать $n \cong U/\Phi$.

Напряжение сети U , как правило, является величиной постоянной, следовательно, $n \cong 1/\Phi$.

Изменением магнитного потока, т.е. изменением тока возбуждения $I_{\text{в}}$, который и создаёт магнитный поток, можно регулировать частоту вращения двигателя.

Вращающий момент машины прямо пропорционален магнитному потоку и току якоря:

$$M = C_M \Phi I_{\text{я}}. \quad (2.2)$$

Для увеличения пускового момента необходимо иметь большой магнитный поток Φ , для чего двигатель пускают с выведенным сопротивлением реостата в цепи возбуждения (регулирующего реостата – $R_{\text{в}}$, рис. 2.5).

Пусковой ток якоря $I_{\text{яп}}$ может оказаться недопустимо большим: $I_{\text{яп}} = U/R_{\text{я}}$, поскольку при пуске $E=0$, так как $n=0$. Для ограничения пускового тока в цепи якоря при пуске вводят пусковой реостат $R_{\text{п}}$, при этом: $I_{\text{яп}} = U/(R_{\text{я}}+R_{\text{п}})$.

По мере увеличения частоты вращения и нарастания противоэлектродвижущей силы $E_{\text{я}}$, сопротивление пускового реостата выводят и к концу пуска реостат закорачивают ($R_{\text{п}}=0$).

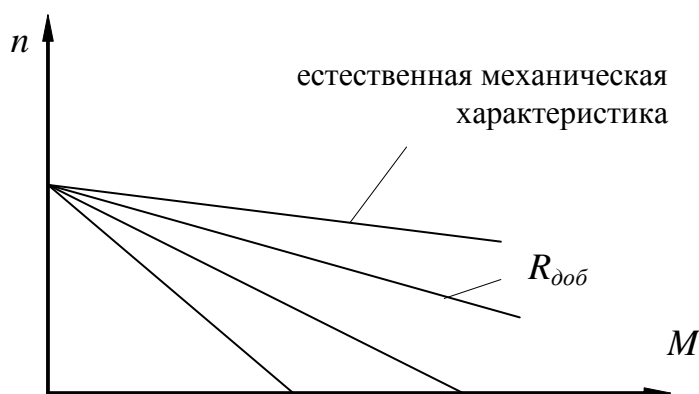


Рис. 2.1. Механические характеристики двигателя

Основной характеристикой двигателя постоянного тока является механическая характеристика (рис. 2.1).

Механическая характеристика двигателя $n=f(M)$ представляет собой зависимость частоты вращения n от вращающего момента двигателя при постоянном напряжении U и токе возбуждения $I_{\text{в}}$. При неизменном токе возбуждения $I_{\text{в}}$ магнитный поток двигателя можно считать постоянным, тогда согласно (2.2) $M \cong I_{\text{я}}$, т.е. вращающий момент пропорционален току якоря. Отсюда видно, что зависимость $n=f(I_{\text{я}})$ (внешняя характеристика) представляет собой кривую (рис. 2.2), подобную механической характеристике двигателя.

Согласно (2.1) частота при увеличении нагрузки несколько уменьшается.

Однако поскольку вычитаемое $R_{\text{я}}I_{\text{я}}$ по отношению к уменьшаемому напряжению сети U невелико, то и уменьшение частоты вращения незначительно.

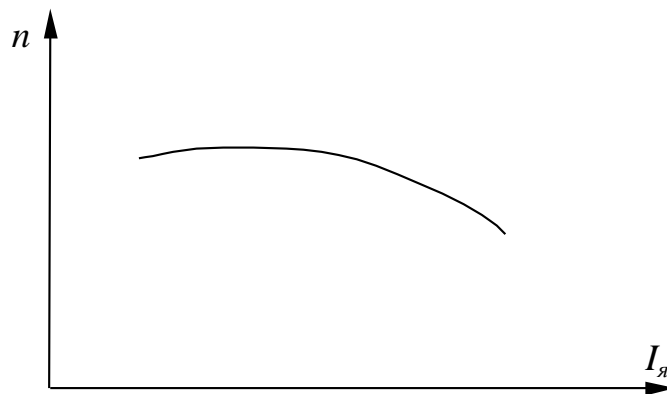


Рис. 2.2. Внешняя характеристика двигателя

Регулирование частоты вращения и реверсирование двигателя

Регулировать частоту вращения можно тремя основными способами:

- 1) включением $R_{доб}$ в цепь обмотки якоря (реостатное регулирование);
- 2) изменением магнитного потока Φ (полюсное регулирование);
- 3) изменением питающего напряжения U (якорное регулирование).

Рассмотрим эти способы регулирования частоты вращения на примере двигателей параллельного возбуждения при постоянной нагрузке на валу ($M_c = \text{const}$). Из (2.1) видно, что зависимость частоты вращения двигателя от нагрузки выражается прямой линией, которая при $R_{доб} = 0$, $\Phi = \Phi_{ном}$ и $U = U_{ном}$ называется естественной механической характеристикой (см. рис.2.1). Такая естественная механическая характеристика называется жёсткой.

При реостатном регулировании частота вращения двигателя изменяется с помощью реостата $R_{доб}$, включаемого последовательно с якорем.

Изменяя $R_{доб}$, можно получить семейство искусственных механических характеристик, более мягких, чем естественная механическая характеристика двигателя (см. рис. 2.1). Реостатный способ регулирования находит широкое применение.

Однако он имеет следующие недостатки:

- мягкие механические характеристики;
- значительные потери в реостате $R_{доб}$, так как в нем протекает ток якоря $I_я$ ($R_{доб} I_я^2$).

По этой причине регулирование частоты вращения двигателя включением реостата в цепь якоря применяют лишь для двигателей небольших мощностей.

При полюсном регулировании частоты вращения двигателя для изменения магнитного потока необходимо регулировать ток возбуждения двигателя, что достигается с помощью $R_в$, включенного в цепь шунтовой обмотки (см. рис. 2.5). Кривая зависимости $n = f(I_в)$ при $M = \text{const}$ и $U = \text{const}$ приведена на рис. 2.3.

Этот способ регулирования скорости особенно эффективен при небольших моментах нагрузки, так как позволяет изменять поток возбуждения в широких пределах.

Одним из преимуществ полюсного регулирования является его экономичность, так как из-за относительно малой мощности обмотки возбуждения небольшими оказываются и дополнительные потери мощности в регулировочном реостате.

Недостатком полюсного регулирования является то, что регулирование частоты вращения путём изменения магнитного потока можно производить лишь в области, расположенной выше естественной механической характеристики, в то время, как во многих случаях требуется понижение частоты вращения.

В последнее время в двигателях постоянного тока широко используется ещё и якорное регулирование частоты вращения (изменение напряжения в якоре безреостатным способом). Это осуществляется в системе генератор – двигатель (Г–Д), в которой источником регулируемого напряжения может быть генератор постоянного тока независимого возбуждения или полупроводниковый преобразователь на тиристорах.

Регулирование изменения напряжения на зажимах двигателя применяется на транспорте.

При этом можно достичь большого диапазона регулирования с относительно небольшими потерями энергии. Реверсирование двигателя осуществляется изменением направления тока в якоре или в обмотке возбуждения. Для этого необходимо остановить двигатель, произвести переключение и, вновь пустив его, убедиться в изменении направления вращения.

Коэффициент полезного действия двигателя

КПД двигателя равен отношению полезной (механической) мощности P_2 к затраченной (электрической) P_1 :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}; \quad P_2 = \frac{M \cdot n}{9550}.$$

Здесь P_2 в кВт; M – вращающий момент двигателя, Н.м; n – частота вращения, об/мин.

$$P_1 = UI; \quad \eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{M \cdot n}{9550 \cdot UI}.$$

Зависимости $\eta = f(P_2)$, $I_{\text{я}} = f(P_2)$, $M = f(P_2)$ называются рабочими характеристиками двигателя. Графически они представлены на рис. 2.4.

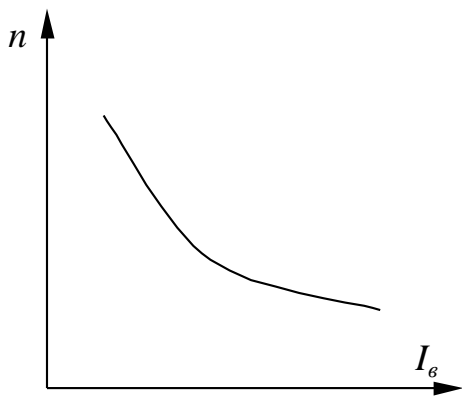


Рис. 2.3. Кривая зависимости $n=f(I_{\text{я}})$ при $M=\text{const}$, $U=\text{const}$

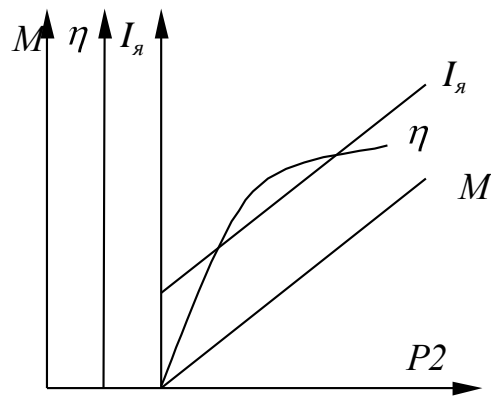


Рис. 2.4. Рабочие характеристики двигателя

Методика проведения лабораторной работы (лаборатория № 221)

1. Ознакомиться на демонстрационном стенде «Машины постоянного тока» с устройством электродвигателя, а на лабораторном стенде – с приборами, аппаратами и подлежащим испытанию электродвигателем. Записать в отчёт о лабораторной работе технические паспортные данные двигателя.
2. На рабочей панели стенда «Двигатели постоянного тока» в соответствии с принципиальной схемой (см. рис. 2.5) собрать электрическую цепь для снятия характеристик электродвигателя постоянного тока параллельного возбуждения. Монтаж электрической цепи производить согласно монтажной схеме, указанной на рис. 2.6. В качестве нагрузки на валу испытуемого электродвигателя используется электромагнитный тормоз, тормозной момент которого изменяется при изменении тока в его обмотках возбуждения с помощью регулируемого источника постоянного напряжения. Управление тормозом производится рукояткой «Момент нагрузки электродвигателей», расположенной на панели «Нагрузочные устройства».

Изменение момента на валу и частоты вращения якоря электродвигателя производить измерительными приборами (агрегат 2), расположенными на приборной панели.

Перед пуском исследуемого электродвигателя необходимо убедиться в том, что:

- а) сопротивление пускового реостата полностью введено (ручка пускового реостата находится в крайнем левом положении – цепь якоря двигателя разомкнута;
- б) сопротивление реостата в цепи обмотки возбуждения электродвигателя полностью выведено (ручка реостата «Регулировка возбуждения» находится в крайнем правом положении);
- в) напряжение, подводимое к цепи обмотки возбуждения электромагнитного тормоза, равно нулю (ручка «Момент нагрузки электродвигателя» находится в крайнем левом положении);

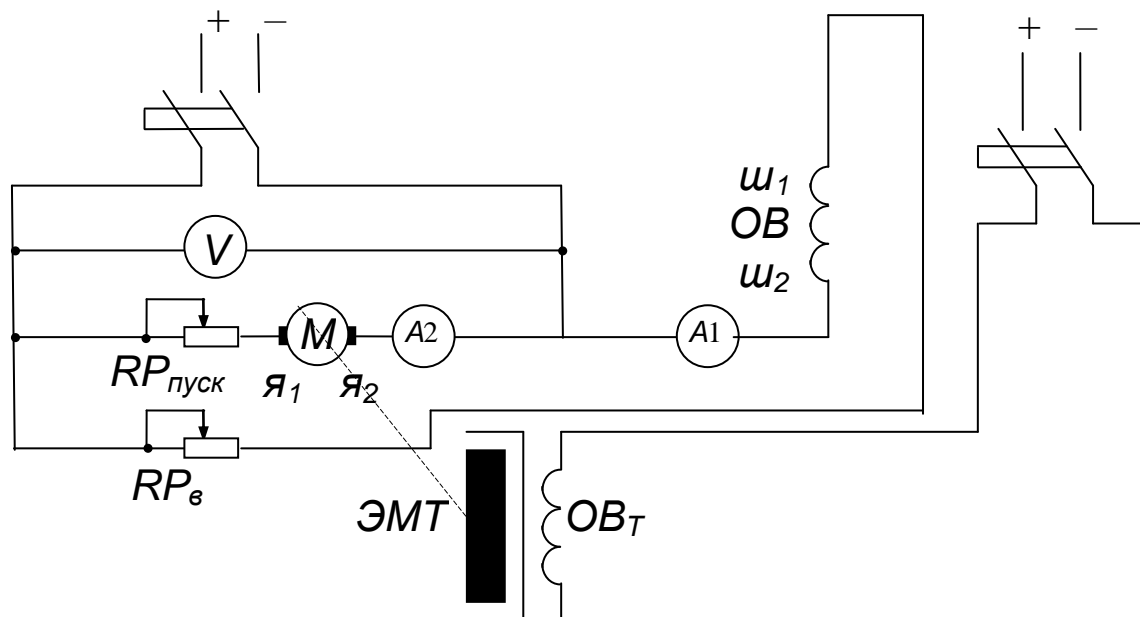


Рис. 2.5. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки

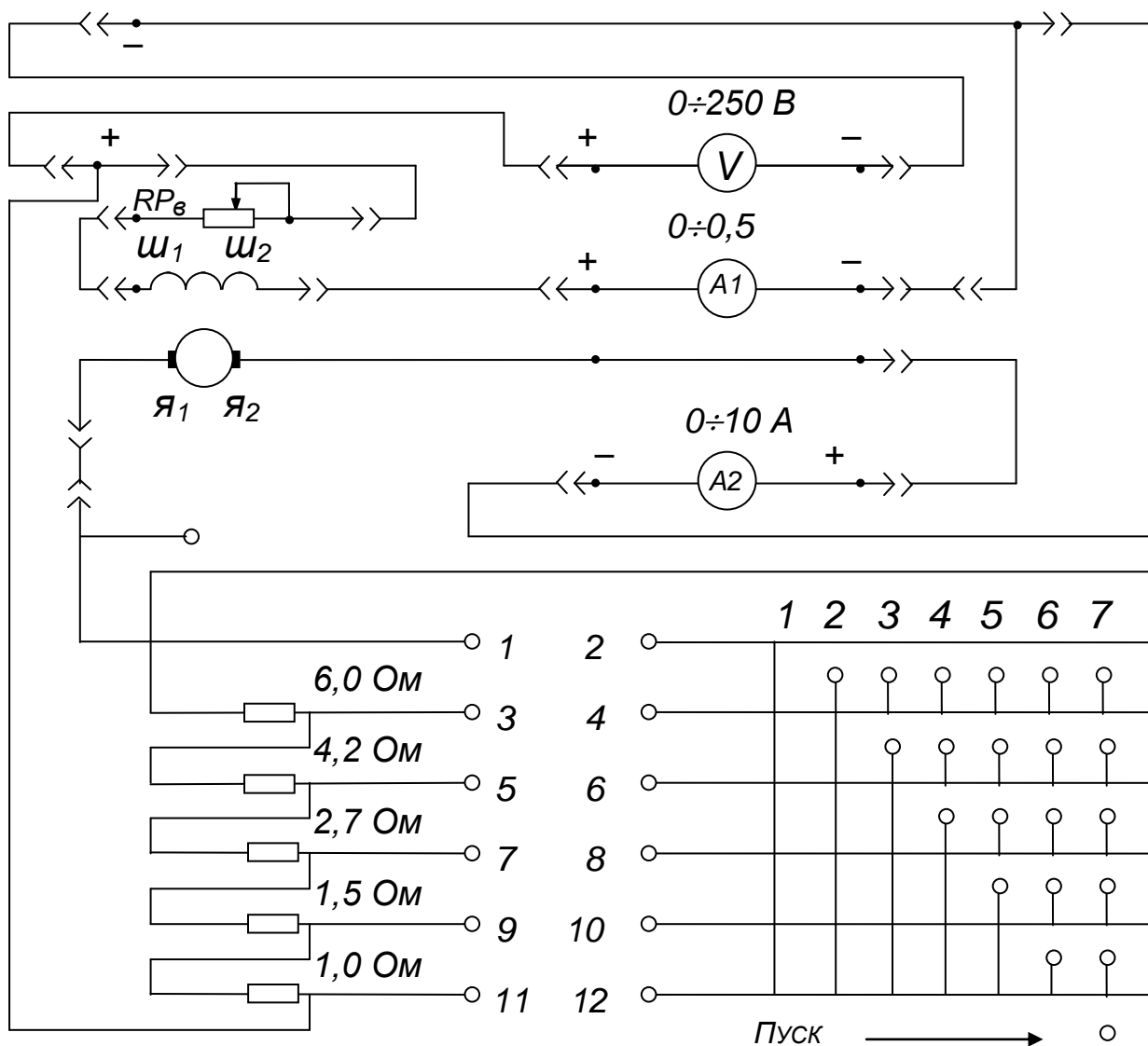


Рис. 2.6. Монтажная электрическая схема лабораторной установки

г) значение питающего напряжения электродвигателя установлено равным номинальному его значению $U_{\text{ном}}=220$ В. Установка питающего напряжения производится кнопками «↑» и «↓» панели «Нагрузочные устройства» при предварительно нажатой кнопки «Вкл» на панели «Машины постоянного тока»;

д) нажатием кнопки «Агрегат № 2» на панели «Нагрузочные устройства» включено напряжение питания электрической цепи измерения момента и частоты вращения якоря электродвигателя.

3. Произвести пуск электродвигателя плавным переключением пускового реостата из положения «1» в положение «7» с выдержкой времени в каждом промежуточном положении в течение 1 – 1,5 с. После окончания процесса пуска, когда частота вращения якоря двигателя принимает установившееся значение, пусковой реостат полностью должен быть выведен (рукоятка пускового реостата должна быть в крайнем правом положении – положение «7»).

4. Снять механическую $n=f_1(M)$, частотную $n=f_2(I_{\text{я}})$ и рабочие характеристики электродвигателя: $M=f_3(P_2)$, $n=f_4(P_2)$, $I_{\text{я}}=f_5(P_2)$ и $\eta=f_5(P_2)$ при $U=U_{\text{ном}}=\text{const}$ и $I_{\text{в}}=I_{\text{в.ном}}=\text{const}$:

а) осуществить нагрузку электродвигателя с помощью электромагнитного тормоза; изменение момента электромагнитного тормоза должно производиться плавно; в начале опыта устанавливается ток возбуждения, при котором при номинальном питающем напряжении и токе, потребляемом двигателем, частота вращения якоря равна номинальной; это значение тока возбуждения двигателя принимается равным номинальному; в процессе проведения опыта этот ток необходимо поддерживать неизменным;

б) первые точки характеристик снимаются при холостом ходе электродвигателя, т.е. при уменьшенном до нуля моменте электромагнитного тормоза;

в) постепенно нагружая электродвигатель до значения тока, равного $I=1,2I_{\text{ном}}$, произвести регистрацию показаний всех измерительных приборов для 6–7 точек (включая точку номинального режима). Данные наблюдений записать в табл. 2.1.

5. Обработка результатов измерений:

а) по результатам измерений п. 4 построить механическую $n=f_1(M)$ и частотную $n=f_2(I_{\text{я}})$ характеристики электродвигателя;

б) по результатам измерений и вычислений п.4 построить в одной координатной системе рабочие характеристики двигателя, т.е. зависимости момента M , частоты вращения якоря n , тока якоря $I_{\text{я}}$ и КПД от полезной мощности P_2 на валу электродвигателя при постоянном номинальном значении напряжения $U=U_{\text{н}}=\text{const}$ и постоянном токе возбуждения, равном номинальному его значению.

Таблица 2.1

№ измерений	Измерения					Вычисления			
	U, В	I _я , А	I _в , А	M, Н м	n, об/мин	I, А	P ₁ , Вт	P ₂ , Вт	η, %
1									
2									
3									
·									
..									

Вычислить расчётное значение следующих величин:

- 1) тока, потребляемого электродвигателем:

$$I = I_{я} + I_{в};$$

- 2) мощности, потребляемой электродвигателем:

$$P_1 = U I;$$

- 3) полезной мощности на валу электродвигателя:

$$P_2 = 0,105 M n,$$

где P_2 – мощность, Вт; M – момент, Н м (1 кГм = 9,81 Н м); n – частота вращения якоря, об/мин;

- 4) коэффициента полезного действия электродвигателя:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

6. Сделать и записать выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Объясните принцип действия двигателя постоянного тока.
2. Почему в момент пуска ток якоря двигателя в несколько раз больше номинального значения и уменьшается в процессе пуска?
3. Как осуществляют пуск двигателя?
4. Какова зависимость вращающего момента двигателя от тока якоря?
5. Каким путём регулируют частоту вращения двигателя?
6. Каким путём осуществляется реверсирование двигателя?
7. Начертите рабочие характеристики двигателя.
8. Определите по данным паспорта двигателя его номинальный вращающий момент.
9. Объясните понятие противо-ЭДС?

Литература

[1, с. 465-488; 2, с.332–376; 3, с. 172–188].

Список используемой литературы

1. *Гольдберг О. Д. , Хелемская С. П.* Электромеханика. – М.: Академия, 2007. – 512 с.
2. *Касаткин А.С., Немцов М.В.* Курс электротехники. – М.: Высшая школа, 2009. – 542 с.
3. *Рекус Г.Г., Чесноков В.Н.* Лабораторный практикум по электротехнике и основам электроники. – М.: Высшая школа, 2001. – 256 с.

Учебное пособие

Электрические машины постоянного тока

Методические указания к выполнению лабораторных работ
для студентов всех специальностей

Составители: Духанин Сергей Александрович
Рудаков Юрий Иванович

Редактор В.И. Пустовая
Корректор П.В. Купченко

Подписано в печать 2.10.00. Формат 60384 / 16. Усл. печ. л. 1,8. Уч.-изд. л. 1,5.

Тираж экз. Заказ Цена

Отпечатано в Белгородском государственном технологическом университете
им. В.Г. Шухова

308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46