

ФГБОУ ВО «Ставропольский государственный аграрный университет»
Электроэнергетический факультет
Кафедра электроснабжения и эксплуатации электрооборудования

В.А. Кобозев, А.И. Адошев, М.А. Мельников

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Часть 3. Электрические машины постоянного тока

Учебное пособие

Ставрополь, 2019

УДК 621.3
ББК 31,2
К55

Рецензент:

к.т.н., доцент кафедры АЭС СКФУ *А. В. Петров*

Кобозев, Владимир Анатольевич

К55 Электрические машины. Часть 3. Электрические машины постоянного тока: учебное пособие / В. А. Кобозев, А. И. Адошев, М. А. Мельников – Ставрополь : Сервисшкола, 2019. - 32 с.

В учебном пособии приведены методические указания к лабораторно-практическим занятиям по курсу «Электрические машины», ч. 3. «Электрические машины постоянного тока», основные теоретические сведения по соответствующим темам, указания по проведению исследований и необходимые для выполнения работ справочные материалы.

Для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 13.03.02 – «Электроэнергетика и электротехника» (профиль подготовки «Электроснабжение») и 35.03.06 – «Агроинженерия» (профиль подготовки «Электрооборудование и электротехнологии в сельском хозяйстве»).

УДК 621.3
ББК 31.2

© Авторы, 2019

ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие предназначено для изучения общепрофессиональной дисциплины «Электрические машины», часть 3. «Электрические машины постоянного тока», которая согласно государственному образовательному стандарту входит в систему подготовки специалистов по направлениям подготовки 13.03.02 – «Электроэнергетика и электротехника» (профиль «Электроснабжение») и 35.03.06 – «Агроинженерия» (профиль «Электрооборудование и электротехнологии в сельском хозяйстве»).

В результате выполнения лабораторного практикума студенты должны освоить:

- конструкцию и назначение основных элементов электрических машин постоянного тока;
- принцип действия и характеристики генераторов постоянного тока с самовозбуждением при различных способах включения обмоток возбуждения;
- методы расчета и экспериментальных исследований характеристик двигателей постоянного тока с независимым и параллельным возбуждением;
- методы расчета и экспериментальных исследований характеристик электрических машин постоянного тока с независимым возбуждением в различных режимах работы.

Пособие построено таким образом, чтобы максимально облегчить студентам самостоятельную подготовку. С этой целью в начале методических указаний к каждому из занятий приводятся краткие теоретические сведения по соответствующей теме, и указания по проведению экспериментальных исследований

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Лабораторно-практические занятия проводятся в учебной лаборатории кафедры электроснабжения и эксплуатации электрооборудования на специальных унифицированных стендах, обеспечивающих возможность фронтального выполнения работ.

До начала занятий студентам необходимо ознакомиться с конструкцией стендов, обращая особое внимание на расположение коммутационных аппаратов, обеспечивающих включение и отключение самих стендов и отдельных модулей.

Лицевая панель стенда, на которой расположены коммутационные аппараты, выводы измерительных приборов, исследуемых электрических машин, и нагрузки, показана на рис. В. 1.

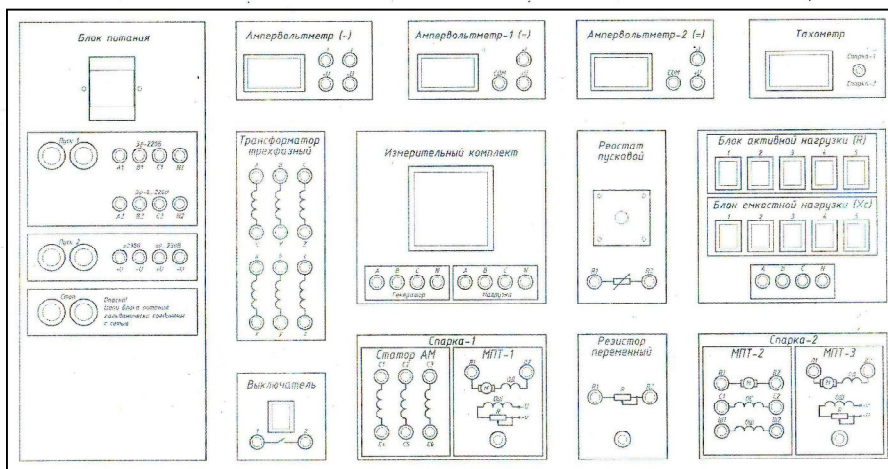


Рисунок В. 1 – Лицевая панель стенда

Включение и защита стенда осуществляются с помощью расположенного в верхней части блока питания трехфазного автоматического выключателя.

Кнопка «Пуск 1» служит для подключения трехфазного напряжения сети (3ф ~ 220 В), и регулируемого трехфазного напряжения (3ф ~ 0 ... 220 В), изменение которого осуществляется с помощью расположенного непосредственно перед стендом фазорегулятора. О под-

ключении переменного напряжения сигнализирует расположенная справа от кнопки «Пуск 1» сигнальная лампочка.

На блоке питания также расположена кнопка «Пуск 2» и сигнальная лампочка включения источника постоянного нерегулируемого ($=230$ В), и регулируемого ($=0 \dots 230$ В) напряжения, получаемых от однофазного (нерегулируемое напряжение) и трехфазного (регулируемое напряжение) выпрямителей.

Отключение переменного и постоянного напряжения осуществляется с помощью красной кнопки «Стоп», расположенной в нижней части блока питания.

Для проведения цикла работ по исследованию электрических машин постоянного тока используется «Спарка-2», которая состоит из связанных общим валом исследуемой машины МПТ-2 и вспомогательной нагрузочной машины МПТ-3. Нагрузочная машина имеет независимое возбуждение, и в зависимости от вида исследований может работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя.

В нижнее левой части лицевой панели расположены: выводы обмотки якоря (Я1, Д2), серийной (С1, С2) и шунтовой (Ш1, Ш2) обмоток возбуждения исследуемой машины МПТ-2, и переменного резистора R_B для регулирования тока возбуждения, а также выводы обмотки якоря (Я1, Д2) и рукоятка регулятора тока возбуждения вспомогательной машины МПТ-3.

В правой части лицевой панели находится блок нагрузки с выводами А, В, С и переключателями.

Для ограничения тока якоря при пуске и в тормозных режимах используется пусковой реостат R_n , который в зависимости от вида исследований может включаться как в цепь якоря исследуемой машины, так и в цепь якоря вспомогательной машины.

В верхней части лицевой панели расположены два ампервольтметра постоянного тока, а также тахометр для измерения частоты вращения электрических машин. При подключении ампервольтметров необходимо строго соблюдать полярность всех выводов в соответствии с приведенными схемами.

Помимо приборов, расположенных на стенде, при проведении некоторых работ используются и другие переносные приборы. При проведении с их помощью измерений необходимо внимательно выбирать измеряемый параметр и пределы измерений.

Важно! Студенты обязаны неукоснительно соблюдать правила поведения в лаборатории. Нарушители от занятий отстраняются.

Сборка и любые изменения схем производятся только при полностью выключенных стендах.

Категорически запрещается включать стенд без предварительной проверки ведущим занятия преподавателем!

В случае возникновения внештатной ситуации (искрение, запах горения и др.) необходимо немедленно выключить общий автоматический выключатель, и обратиться к преподавателю, не пытаясь самостоятельно устранить неисправность.

При подготовке к работе студент должен.

1. Изучить соответствующий раздел лекционного материала, и теоретические сведения, приведенные в настоящем пособии.
2. Хорошо представлять себе возможный конечный результат в виде характеристик, значений измеряемых и рассчитываемых параметров и т.д.
3. Знать принцип действия экспериментальной установки и точный порядок выполнения всех операций.
4. Подготовить отчет, в который далее будут вноситься полученные в ходе выполнения работы данные.

Готовность студента к занятиям работы проверяется преподавателем в ходе опроса до выполнения работы. После завершения исследований и расчетов оформляется окончательный отчет, который предъявляется для проверки преподавателю. Защита отчета производится путем индивидуального собеседования.

Конструкция электрических машин постоянного тока

Основными элементами любой электрической машины постоянного тока (МПТ) являются разделенные между собой воздушным зазором статор и ротор.

Отличительной особенностью МПТ является то, что ЭДС в них индуцируется во вращающейся части, поэтому ротор МПТ называют якорем, а расположенную на нем обмотку – обмоткой якоря.

Магнитная система (сердечник) якоря представляет собой набор изолированных между собой листов электротехнической стали. В пазах цилиндрической поверхности сердечника расположена обмотка якоря, выводы которой присоединяются к изолированным друг от друга медным пластинам коллектора. На статоре МПТ располагаются главные полюсы, которые представляют собой полюсные наконечни-

ки с обмоткой возбуждения. Устройство МПТ с указанием основных конструктивных элементов дано на рис. В.2.

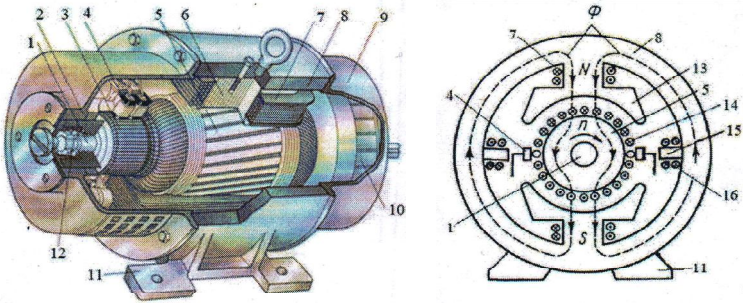


Рисунок В.2 – Конструкция электрической машины постоянного тока:

1 – вал МПТ; 2 – передний подшипниковый шит; 3 – коллектор; 4 – щеточный узел; 5 – сердечник якоря; 6 – главные полюсы; 7 – обмотка возбуждения; 8 – корпус; 9 – задний подшипниковый шит; 10 - вентилятор; 11 – лапы; 12 – подшипники; 13 – полюсные наконечники главных полюсов; 14 – обмотка якоря; 15 – дополнительные полюсы; 16 – обмотка дополнительных полюсов.

Связь обмотки якоря с внешними цепями осуществляется посредством скользящих по коллектору графитных или металлографитных щеток, которые помещаются в щеткодержателях и прижимаются к коллектору пружинами. Выводы обмотки якоря маркируются буквами $Я_1$ и $Я_2$. Обмотки возбуждения бывают двух типов: параллельного ($Ш_1 - Ш_2$) и последовательного ($С_1 - С_2$). Их также называют шунтовыми и серийными обмотками. Как правило, МПТ имеют также дополнительные полюса с обмоткой $Д_1 - Д_2$, которая включается последовательно с обмоткой якоря и служит для компенсации действия реакции якоря.

Выводы этих элементов находятся в клеммной коробке МПТ, и выведены на лицевую панель стенда. Их условные обозначения приведены на рис. В.3.

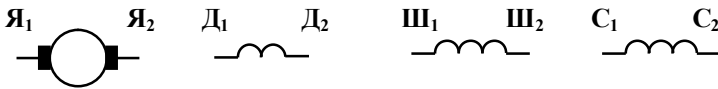


Рисунок В.3 – Условные обозначения основных элементов машины постоянного тока

Работа № 1

Исследование генераторов постоянного тока с самовозбуждением

Цель работы: изучить принцип действия генераторов постоянного тока с самовозбуждением и исследовать их характеристики при различных способах включения обмоток возбуждения.

1. Основные теоретические сведения

Принцип действия генераторов постоянного тока с самовозбуждением (рис. 1.1 – а) основан на явлении остаточного магнетизма. В сердечниках полюсов электрических МПТ всегда существует небольшой остаточный магнитный поток (1 ...3% от номинального), поэтому при вращении якоря даже при отсутствии питания обмотки возбуждения возникает остаточная ЭДС (рис. 1.1 – б).

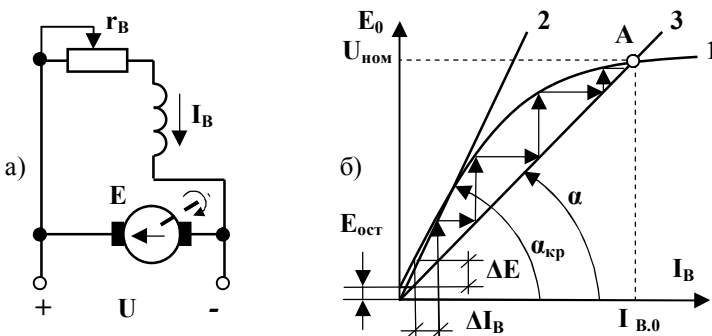


Рисунок 1.1 – Схема (а) и вольт-амперные характеристики (б) ГПТ самовозбуждением

Для нормального развития процесса самовозбуждения необходимо выполнить ряд условий.

Первое условие самовозбуждения заключается в наличии остаточного магнитного потока, обеспечивающего появление ЭДС $E_{ост}$.

Второе условие самовозбуждения заключается в согласном направлении остаточного магнитного потока и потока возбуждения, создаваемого ЭДС обмотки якоря при его вращении, результатом чего является возрастание результирующего магнитного потока. Это

достигается путем строгого соблюдения полярности обмотки возбуждения по отношению к выводам обмотки якоря.

Третье условие самовозбуждения состоит в использовании нелинейной части характеристики холостого хода ГПТ.

Четвертое условие самовозбуждения является следствием третьего условия, и заключается в том, что полное сопротивление цепи возбуждения должно быть меньше критического значения, которому соответствует линейная часть характеристики холостого хода:

$$r_b = \operatorname{tg} \alpha < r_{\text{кр}} = \operatorname{tg} \alpha_{\text{кр}} . \quad (1.1)$$

Это условие означает, что вольт-амперная характеристика цепи возбуждения должна пересекаться с нелинейной частью характеристики холостого хода МПТ.

При соблюдении всех условий самовозбуждения процесс идёт следующим образом (рис. 1.1 – б). Под действием ЭДС $E_{\text{ост}}$ в обмотке возбуждения появляется ток ΔI_b , который в свою очередь приводит к приращению магнитного потока, который суммируется с остаточным магнитным потоком. В результате появляется приращение ЭДС ΔE , и полная ЭДС возрастает:

$$E \uparrow = C_E \omega (\Phi \uparrow) .$$

Далее за счет увеличения ЭДС вновь возрастает ток возбуждения, и процесс повторяется до тех пор, пока ВАХ цепи возбуждения 1 и кривая намагничивания ГПТ 3 не пересекутся. При этом имеет место равенство: $E_0 = I_b r_b$. Точка пересечения должна выбираться таким образом, чтобы при случайных отклонениях тока возбуждения обеспечивалась устойчивость процесса. Так, при пересечении характеристик в точке А случайное уменьшение тока возбуждения приводит к появлению положительной разности между ЭДС генератора и падением напряжения на обмотке возбуждения, что вызывает в свою очередь положительное приращение тока возбуждения:

$$\Delta E = E - I_b r_b > 0; \quad \Delta I_b = \frac{\Delta E}{r_b} > 0$$

При случайном возрастании тока возбуждения, напротив:

$$\Delta E = E - I_b r_b < 0; \quad \Delta I_b = \frac{\Delta E}{r_b} < 0 ,$$

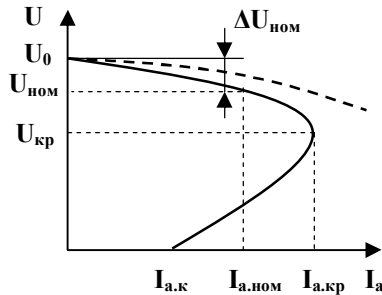
и ток возбуждения уменьшается, обеспечивая устойчивость процесса. Это имеет место только при выполнении третьего условия самовозбуждения. Если ВАХ цепи возбуждения (характеристика 2) совпадает с линейной частью характеристики холостого хода, случайные изменения тока возбуждения не компенсируются соответствующими изменениями ЭДС:

$$\Delta E = E - I_B r_B \approx 0,$$

и процесс становится неустойчивым, поскольку полная ЭДС якоря может принимать любые значения.

Типичная внешняя характеристика генератора с самовозбуждением показана на рис. 1.2.

Рисунок 1.2 – Внешняя характеристика ГПТ с самовозбуждением



При значении тока, которое называется критическим, и составляет $I_{a,кр} = (1,4 - 2,2)I_{a,ном}$, напряжение достигает критического значения $U_{кр} = (0,7 - 0,8)U_{ном}$, и далее уменьшается настолько быстро, что ток якоря падает. Точка с координатами $I_{a,кр}$, $U_{кр}$ характеризует максимальную мощность, которую генератор с самовозбуждением может сообщить нагрузке. Это объясняется тем, что помимо реакции якоря и падения напряжения на его сопротивлении уменьшается и ЭДС холостого хода $E_0 = f(I_B)$, поскольку ток в обмотке возбуждения зависит от напряжения: $I_B = \frac{U_a}{r_B}$, и уменьшается при увеличении нагрузки. Установившийся ток короткого замыкания ГПТ с самовозбуждением $I_{a,к}$ вызывается только остаточной ЭДС, и потому не превышает номинального тока. Обычно: $I_{a,к} = (0,4 - 0,8)I_{a,ном}$. Однако, при внезапном коротком замыкании его значения многократно больше, поскольку магнитный поток и ЭДС не могут уменьшиться мгновенно. Такие режимы представляют большую опасность.

Устойчивая работа на лежащей далее части характеристики невозможна, поскольку мощность генератора падает, и процесс становится неустойчивым. Отклонение напряжения при переходе генератора с самовозбуждением от режима холостого хода к режиму номинальной нагрузки могут достигать до 30%.

Для уменьшения падения напряжения при возрастании нагрузки и формирования крутопадающих внешних характеристик, которые необходимы в некоторых технологических процессах, применяют генераторы со смешанным возбуждением.

Генераторы со смешанным возбуждением помимо шунтовой (параллельной) обмотки возбуждения имеют и сериесную обмотку, которая включается в цепь якоря последовательно (рис. 1.3 – а).

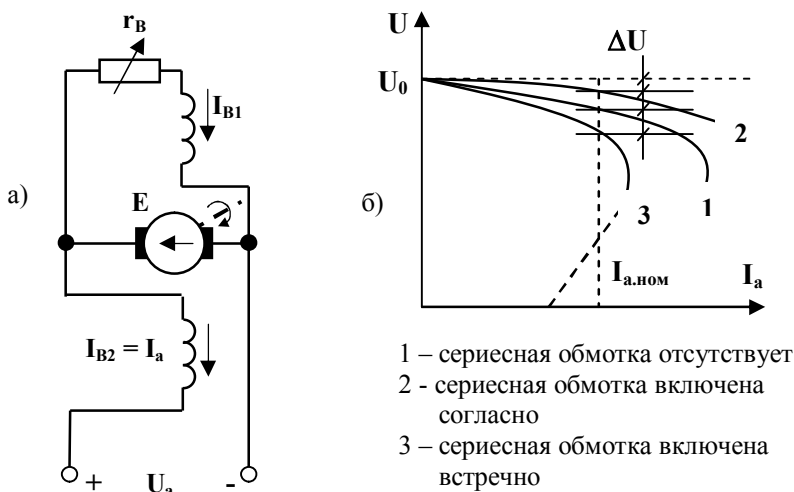


Рисунок 1.3 – Схема (а) и внешние характеристики (б) ГПТ со смешанным возбуждением

Характеристики ГПТ со смешанным возбуждением (рис. 1.3 – б) зависят от того, каким образом включается сериесная обмотка.

Характеристика **1** соответствует включению только одной – шунтовой обмотки возбуждения.

При согласном включении в цепь якоря сериесной обмотки, поток возбуждения которой обычно составляет 20 – 30% потока, создаваемого шунтовой обмоткой, обеспечивается стабилизация напряжения на выводах якоря (характеристика **2**). Это достигается за счет то-

го, что увеличение тока якоря при возрастании нагрузки приводит к увеличению результирующего потока возбуждения, компенсирующего ЭДС от реакции якоря и падение напряжения на нем.

При встречном включении серийной обмотки возрастание нагрузки приводит к уменьшению результирующего магнитного потока, в результате чего получают крутопадающую внешнюю характеристику 3, у которой большим изменениям напряжения соответствуют относительно малые изменения тока, что свойственно источникам тока. Такие характеристики применяются при ручной дуговой сварке, и в некоторых других технологических процессах.

Регулировочные характеристики $I_B = f(I_a)$ показывают, каким образом необходимо изменять ток возбуждения при изменениях тока якоря для того, чтобы при неизменной частоте вращения ($n = \text{const}$) поддерживать неизменным напряжение на выводах обмотки якоря ($U_a = \text{const}$). По мере возрастания нагрузки ток возбуждения в ГПТ необходимо увеличивать. Его относительное значение при переходе от режима холостого хода к номинальной нагрузке составляет:

$$\Delta i_{B, \text{ном}}, \% = \frac{I_{B, \text{ном}} - I_{B0}}{I_{B0}} 100\% . \quad (1.2)$$

Регулировочные характеристики имеют смысл только при отсутствии серийной обмотки или согласном её включении.

Характеристика 1, соответствующая ГПТ без серийной обмотки проходит выше характеристики 2, соответствующей генератору со смешанным возбуждением (рис. 1.4).

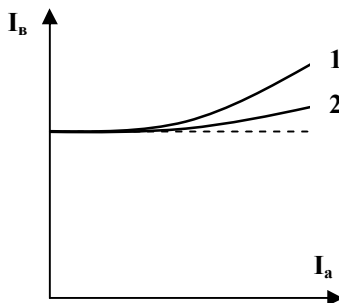


Рисунок 1.4 - Регулировочные характеристики генераторов постоянного тока

2. Указания по выполнению работы

- 2.1. Записать паспортные данные исследуемой и вспомогательной машин постоянного тока.
- 3.2. Установить переключатель пускового реостата ($R_{п}$) в крайнее левое положение (максимальное сопротивление), а рукоятку регулятора тока возбуждения ($R_{в}$) в крайнее правое положение (максимальный ток возбуждения).
- 3.2. Подключить согласно схеме рис. 2.1 якорь вспомогательной машины постоянного тока МН к источнику питания (обмотка возбуждения подключается при включении источника питания). Произвести пробный пуск. Проверить работу схемы.

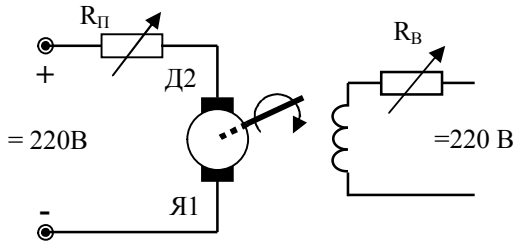


Рисунок 2.1 – Подключение вспомогательной машины постоянного тока

- 2.4. Собрать приведенную на рис 2.2 схему исследуемой машины постоянного тока

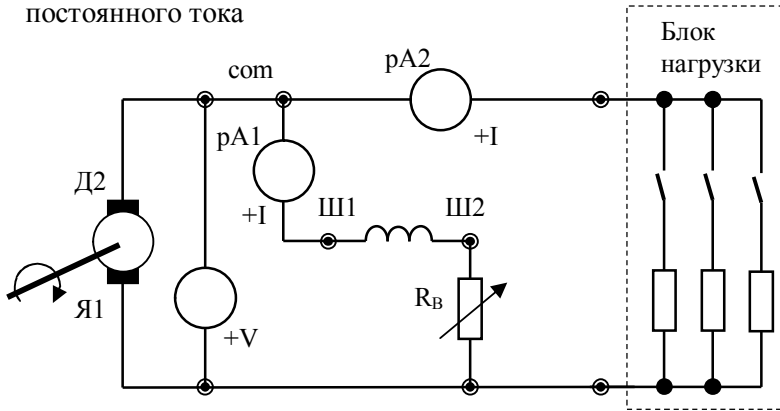


Рисунок 2.2 – Схема подключения исследуемой МПТ в режиме генератора с параллельным возбуждением

- 2.5. Включить вспомогательную машину и убедиться в нормальном ходе процесса самовозбуждения исследуемой МПТ по показаниям вольтметра и амперметра рА1. При необходимости изменить полярность подключения обмотки возбуждения.
- 2.6. Не подключая нагрузку и изменяя величину регулировочного сопротивления R_B исследуемой машины снять точки для построения характеристики холостого хода (рис. 1.1).

I_B, mA						
E_0, V						

- 2.7. Последовательно подключая нагрузку, и не изменяя сопротивление R_B , снять данные для построения внешней характеристики при параллельном возбуждении генератора (рис. 1.3).

I_a, A						
U, V						

- 2.8. Установить по указанию преподавателя определенное значение напряжения в режиме холостого хода, и последовательно подключая нагрузку, добываясь с помощью регулятора R_B неизменности напряжения ($U = \text{const}$) снять данные для построения регулировочной характеристики (рис. 1.4).

I_B, A						
I_a, V						

- 2.9. Подключить согласно рис. 2.3 сериесную обмотку.

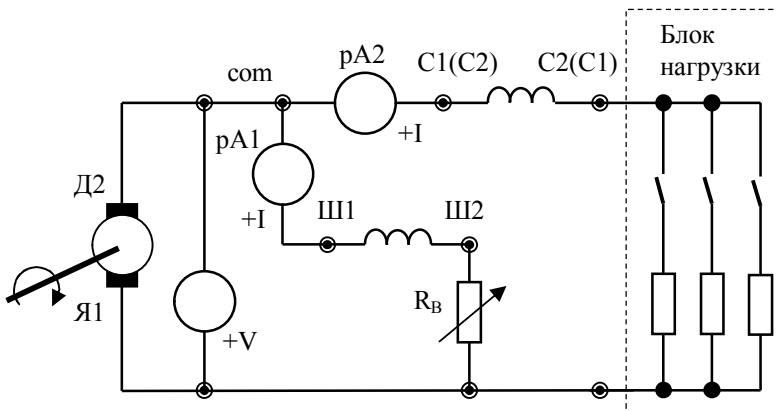


Рисунок 2.3 – Схема подключения исследуемой МПТ в режиме генератора со смешанным возбуждением

- 2.10. Повторить выполнение п. 2.7 и п.2.8 при согласном и встречном включении серийной обмотки (регулирующую характеристику снимать только при согласном включении).
- 2.11. По полученным данным построить характеристики, примерный вид которых показан на рис. 1.1 – б, 1.3 – б и 1.4.
- 2.12. Определить и сравнить относительные падения напряжения при различных способах возбуждения при заданном преподавателем значении тока якоря:

$$\Delta U, \% = \frac{U_0 - U}{U} 100\% .$$

- 2.13. Сделать выводы. Оформить отчет о работе. Ответить на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Перечислите условия самовозбуждения генераторов постоянного тока.
2. В чем заключается и как происходит процесс самовозбуждения?
3. Чем отличаются характеристики генераторов при различных способах возбуждения?
4. Почему ток короткого замыкания генераторов с самовозбуждением меньше номинального тока якоря?
5. Какие существуют способы возбуждения генераторов постоянного тока и в чём заключаются их особенности?
6. Почему различаются внешние характеристики генераторов с различными системами возбуждения?
7. Что такое регулировочные характеристики и почему они не имеют смысла при встречном включении серийной обмотки?
8. Поясните методику экспериментальных исследований внешних характеристик генераторов постоянного тока.
9. Поясните методику экспериментальных исследований регулировочных характеристик генераторов постоянного тока.

Работа № 2

Исследование двигателей постоянного тока с независимым и параллельным возбуждением

Цель работы: освоить методы расчета и экспериментальных исследований характеристик двигателей постоянного тока с независимым и параллельным возбуждением.

1. Основные теоретические сведения

В двигателях постоянного тока (ДПТ) с независимым и параллельным возбуждением основной магнитный поток создается шунтовой обмоткой (Ш1 – Ш2), которая подключается к независимому источнику питания или параллельно обмотке якоря (рис. 1.1).

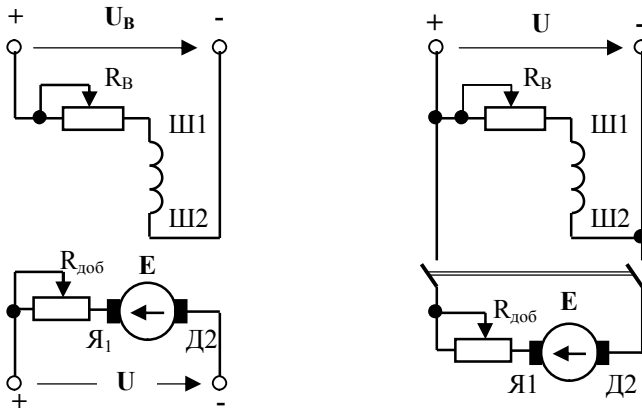


Рисунок 1.1 – Схемы включения двигателей постоянного тока с независимым (а) и параллельным (б) возбуждением

По своим характеристикам эти двигатели очень близки, но ДПТ с НВ позволяет осуществлять некоторые регулировочные и тормозные режимы работы, связанных с отдельным регулированием параметров цепи якоря и цепи возбуждения.

Основные свойства двигателей постоянного тока описываются электромеханическими (скоростными) и механическими характеристиками, которые представляют собой зависимости частоты вращения от тока якоря I_a и электромагнитного момента M :

$$n = \frac{U}{k_e \Phi} - \frac{R_a + R_{доб}}{k_e \Phi} I_a; \quad (1.1)$$

$$n = \frac{U}{k_e \Phi} - \frac{R_a + R_{доб}}{k_e k_m \Phi^2} M, \quad (1.2)$$

где Φ – поток возбуждения; R_a и $R_{доб}$ – собственное сопротивление якоря и добавочное сопротивление в его цепи; k_e и k_m – постоянные коэффициенты, зависящие от конструкции МПТ (если частота вращения выражается в радианах: $k_e = k_m$).

При неизменных значениях напряжения и потока возбуждения $n = f(I_a)$ и $n = f(M)$ являются линейными функциями, т.е. характеристики представляют собой прямые линии, что является существенной положительной особенностью ДПТ с независимым и параллельным возбуждением. При определенном значении магнитного потока развиваемый двигателем момент прямо пропорционален току якоря

$$M = k_m \Phi I_a = C_M I_a. \quad (1.3)$$

В пределах номинальных значений тока возбуждения это уравнение можно записать в более удобном виде

$$M = C_M \left(\frac{I_B}{I_{B.ном}} \right) I_a, \quad (1.4)$$

где коэффициент пропорциональности C_M определяется по паспортным данным машины:

$$C_M = \frac{U_{ном} - I_{a.ном} R_a}{0,105 n_{ном}}. \quad (1.5)$$

При отсутствии иных данных сопротивление якоря допускается вычислять по формуле:

$$R_a \approx 0,5(1 - \eta_{ном}) \frac{U_{ном}}{I_{a.ном}}. \quad (1.6)$$

Характеристики двигателей при номинальном напряжении, номинальном магнитном потоке (токе возбуждения), и $R_{доб} = 0$ называются *естественными*, а характеристики, полученные при изменении этих параметров – *искусственными*.

Естественные характеристики строятся по двум точкам, первая из которых соответствует режиму идеального холостого хода, при котором ток якоря и момент равны нулю: $I_a = 0$; $M = 0$, а частота вращения определяется по формуле:

$$n = n_0 = n_{ном} \frac{U_{ном}}{U_{ном} - I_{a.ном} R_a} . \quad (1.7)$$

Вторая точка соответствует номинальному режиму работы и имеет координаты:

- для электромеханической характеристики:

$$n = n_{ном}; \quad I_a = I_{a.ном}; \quad (1.8)$$

- для механической характеристики:

$$n = n_{ном}; \quad M = M_{ном} = \frac{P_{ном}}{\omega_{ном}} = \frac{P_{ном}}{0,105n_{ном}} . \quad (1.9)$$

При пуске частота вращения равна нулю: $n = 0$, и при отсутствии добавочного сопротивления пусковой ток:

$$I_{a.пуск} = \frac{U_{ном}}{R_a} . \quad (1.10)$$

Сопротивление цепи якоря ДПТ весьма мало, и при прямом пуске ток может многократно превышать номинальное значение. Для его ограничения применяется реостатный пуск, при котором в цепь якоря на время пуска вводятся добавочные сопротивления (рис. 1.2).

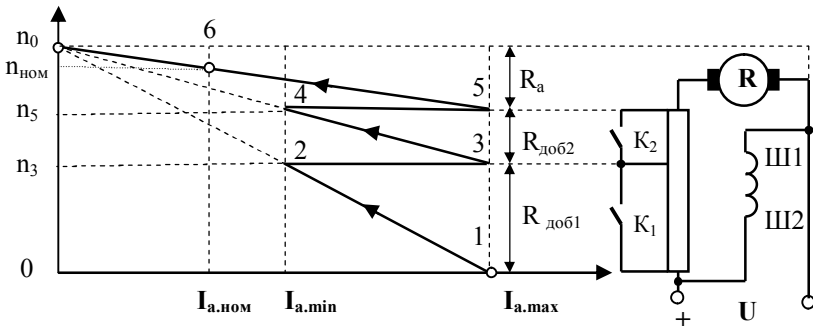


Рисунок 1.2 – Пусковая диаграмма двигателя постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения

Сопротивление пускового реостата определяется по максимально допустимому току якоря, который составляет:

$$I_{a, \max} = \frac{U_{\text{ном}}}{R_a + \sum R_{\text{доб.}i}} = (2-3)I_{a, \text{ном}}; \quad \sum R_{\text{доб.}i} = \frac{U_{\text{ном}}}{I_{a, \max}} - R_a. \quad (1.11)$$

Для ускорения пуска применяют несколько ступеней пускового реостата, сопротивления которых находят по пусковой диаграмме. Ток при этом изменяется в пределах: $I_{a, \min} \leq I_a \leq I_{a, \max}$.

В начале пуска (точка 1) устанавливается наибольшее сопротивление пускового реостата, рассчитанное по формуле (1.11). По мере разгона ЭДС якоря возрастает, а ток уменьшается: до значения $I_{a, \min}$. В точке 2 одна ступень пускового реостата ($R_{\text{доб.}1}$) замыкается коротко, и ток возрастает до $I_{a, \max}$ (точка 3). Далее процесс идет по участку новой характеристики $3 \rightarrow 4$. В точке 4 замыкается вторая ступень пускового реостата, и в точке 5 двигатель выходит на естественную характеристику. Точка 6 соответствует номинальному режиму работы. Количество ступеней пускового реостата зависит от требований к плавности и скорости пуска. Значения сопротивлений определяются исходя из показанных на пусковой диаграмме пропорций.

Искусственные характеристики получают: 1 - введением в цепь якоря добавочных сопротивлений; 2 - изменением величины приложенного к якорю напряжения; 3 - изменением потока возбуждения (тока в обмотке возбуждения).

Введение в цепь якоря добавочных сопротивлений не влияет на частоту вращения идеального холостого хода, и координаты первой точки электромеханических и механических характеристик остаются неизменными:

$$n = n_0; \quad I_a = 0; \quad M = 0.$$

Вторую точку удобно определять при частоте вращения $n = 0$, и пусковом токе при данном значении добавочного сопротивления:

$$I_{a, \text{п}} = \frac{U_{\text{ном}}}{R_a + R_{\text{доб.}}} ; \quad M_{\text{п}} = C_m I_{a, \text{п}}. \quad (1.12)$$

Эти характеристики аналогичны характеристикам, показанным на пусковой диаграмме.

Изменение приложенного к обмотке якоря напряжения осуществляется только в двигателях с независимым возбуждением, и приводит к изменению частоты вращения идеального холостого хода при неизменном наклоне характеристик (рис. 1.3).

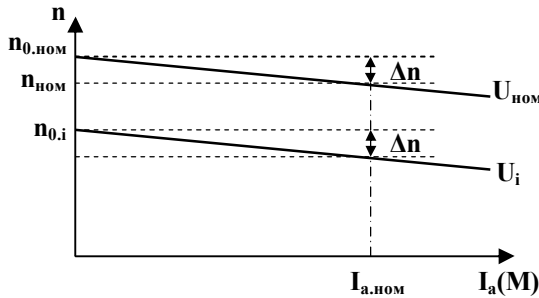


Рисунок 1.3 – Характеристики ДПТ независимого возбуждения при изменении напряжения на обмотке якоря

Частота вращения идеального холостого хода (при неизменном магнитном потоке), в этом случае:

$$n_{0,i} = n_{0,ном} \frac{U_i}{U_{ном}}, \quad (1.13)$$

При любом значении i тока и момента перепад частот при переходе от режима идеального холостого хода к нагрузочному режиму остается неизменным, и характеристики идут параллельно друг другу. Координаты второй точки находят по формулам:

$$n = n_{0,i} - \Delta n = n_{0,ном} - n_{ном}; \quad I_a = I_{a,ном}; \quad M = M_{ном} \quad (1.14)$$

В этом случае, как и при введении добавочного сопротивления в цепь якоря, зависимости $n = f(I_a)$ и $n = f(M)$ имеют одинаковый вид.

Изменение напряжения применяется для ограничения пусковых токов (уравнение 1.12) и регулирования частоты вращения ДПТ, которое может осуществляться только вниз, поскольку напряжение не может быть больше номинального. Для регулирования необходим источник питания, рассчитанный на полную мощность двигателя.

Иные закономерности имеют место при *изменении магнитного потока*. Увеличение тока возбуждения сверх номинального значения ведет к насыщению магнитной системы, поэтому практическое значение имеет только его уменьшение, при котором между током возбуждения и магнитным потоком имеет место линейная зависимость.

Из уравнений скоростных и механических характеристик (1.1) и (1.2) следует, что уменьшение потока (тока возбуждения) приводит к обратно пропорциональному увеличению частоты вращения идеального холостого хода:

$$n_{0,i} = \frac{U_{\text{ном}}}{C_E \Phi_{B,i}} = \frac{U_{\text{ном}}}{C_E \Phi_{B,\text{ном}} \left(\frac{I_{B,i}}{I_{B,\text{ном}}} \right)}. \quad (1.15)$$

Ток якоря и момент при этом изменяются по различным законам. Пусковой ток не зависит от потока и остается неизменным, а момент в соответствии с уравнением 1.4 уменьшается пропорционально потоку (току возбуждения). В результате характеристики $n = f(I_a)$ и $n = f(M)$ имеют вид, показанный на рис. 1.4.

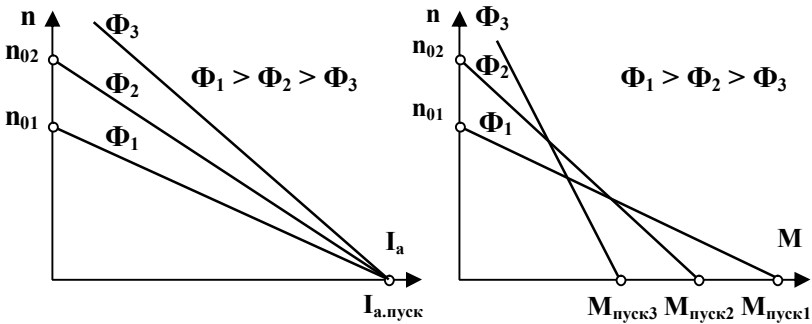


Рисунок 1 4 – Электромеханические (а) и механические (б) характеристики ДПТ параллельного возбуждения при изменении магнитного потока

Из приведенных характеристик видно, что пусковой ток не зависит от величины магнитного потока, и эта точка на характеристиках $n = f(I_a)$ определяется первым уравнением (1.12).

Пусковой момент уменьшается пропорционально току возбуждения (уравнение 1.4).

Важно! Из уравнения 1.15 и приведенных на рис. 1.4 характеристик видно, что уменьшение тока возбуждения при малых нагрузках, и особенно в режиме холостого хода приводит к резкому возрастанию частоты вращения, и двигатель идет «вразнос». Такой режим недопустим, а при обрыве цепи возбуждения является аварийным.

2. Указания по выполнению работы

- 2.1. Записать паспортные данные исследуемой электрической машины. Определить сопротивления обмотки якоря и ступеней пускового реостата.
- 2.2. Определить частоту вращения идеального холостого хода (формула 1.4) и пусковой ток при полностью введенном пусковом реостате (формулы 1.11, 1.12). Построить пусковую диаграмму.
- 2.3. Рассчитать и построить в одних координатах следующие электромеханические характеристики:
 - 1 – естественную характеристику при номинальных значениях напряжения и тока возбуждения;
 - 2 – искусственные характеристики при добавочных сопротивлениях, равных сопротивлениям ступеней пускового реостата;
 - 3 – искусственную характеристику при заданном преподавателем напряжении, $R_{доб} = 0$ и номинальном токе возбуждения;
 - 4 – искусственную характеристику при $U = U_{ном}$; $R_{доб} = 0$ и заданном преподавателем токе возбуждения.
- 2.4. Собрать приведенную на рис 2.1 схему ДПТ с параллельным возбуждением. Установить переключатель пускового реостата $R_{п}$ в крайнее левое положение (максимальное сопротивление), а регулятор тока возбуждения $R_{в}$ в крайнее правое положение (максимальный ток возбуждения).

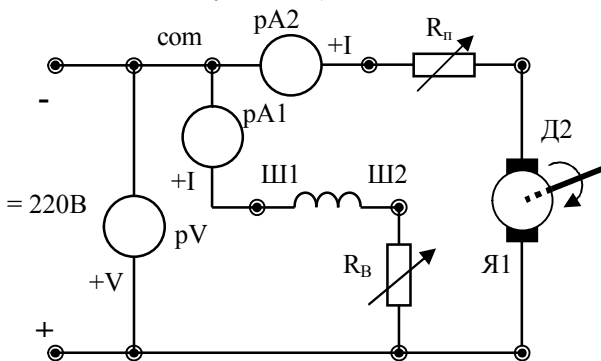


Рисунок 2.1 – Схема подключения исследуемой МПТ в режиме двигателя с параллельным возбуждением

2.5. Произвести пробный пуск, убедиться в нормальной работе всех элементов схемы. Подключить нагрузочную МПТ для работы в режиме генератора (рис. 2.2). Обмотка возбуждения подключается при включении источника питания.

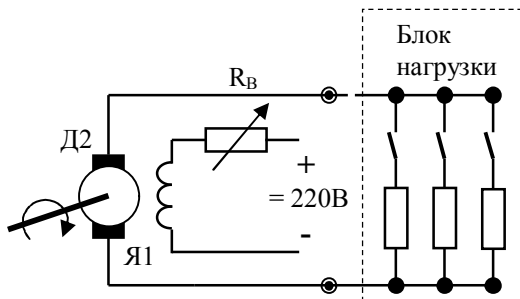


Рисунок 2.2 – Схема подключения нагрузочной машины

2.6. Включить установку. Изменяя нагрузку, снять и занести в таблицу данные для построения естественной и искусственных характеристик электромеханических характеристик $n = f(I_a)$ при введении в цепь якоря добавочных сопротивлений.

	$R_{п.1} + R_{п.2}$			$R_{п.2}$			$R_{п.1} = 0$		
n , об/мин									
I_a , А									

2.7. Не изменяя схемы уменьшить по указанию преподавателя ток возбуждения. Снять и занести в таблицу данные для построения электромеханических $n = f(I_a)$ и механических $n = f(M)$ характеристик.

	$I_{в.ном}$			$I_B / I_{в.ном}$		
$C_M(I_B / I_{в.ном})$						
n , об/мин						
I_a , А						
M , нм						

2.7. Изменить согласно рис. 2.3 схему подключения исследуемой МПТ. Установить с помощью фазорегулятора напряжение по указанию преподавателя.

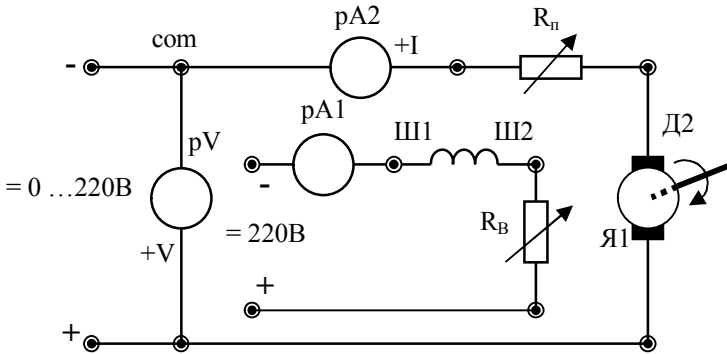


Рисунок 2.3 – Схема подключения исследуемой МПТ в режиме двигателя с независимым возбуждением

- 2.8. Изменяя нагрузку, снять и занести в таблицу, аналогично п.2.6 данные для построения электромеханической характеристики $n = f(I_a)$ при заданном напряжении.
- 2.9. Построить характеристики, полученные опытным путём. Сравнить их с расчётными. Сделать выводы. Оформить отчет. Ответить на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение электромеханических и механические характеристик двигателей постоянного тока.
2. Почему практически невозможен прямой пуск ДПТ? Каким образом можно запустить двигатель параллельного возбуждения? Как рассчитываются сопротивления пускового реостата?
3. Как влияет на характеристики ДПТ введение в цепь якоря добавочных сопротивлений?
4. Как влияет на характеристики ДПТ изменение приложенного к обмотке якоря напряжения?
5. Как влияет на характеристики ДПТ изменение магнитного потока (тока возбуждения)?
6. Что происходит при обрыве цепи возбуждения ДПТ и почему такой режим является аварийным?
7. Поясните ход проведения экспериментальных исследований.

Работа № 3

Исследование машины постоянного тока с независимым возбуждением

Цель работы: исследовать характеристики машины постоянного тока с независимым возбуждением в различных режимах работы

1. Основные теоретические сведения

В электрических машинах постоянного тока с независимым возбуждением (МПТ НВ) осуществляется раздельное питание обмотки якоря и обмотки возбуждения, что позволяет реализовать особые режимы их работы, к которым относятся:

- регулирование частоты вращения в двигательном режиме путем изменения приложенного к якорю напряжения;
- режим генераторного (рекуперативного) торможения;
- режим динамического торможения;
- режим торможения противовключением.

В любых режимах работы МПТ НВ их электромеханические $n = f(I_a)$ и механические $n = f(M)$ характеристики описываются линейными уравнениями:

$$n = \frac{U}{k_e \Phi} - \frac{R_a + R_{доб}}{k_e \Phi} I_a; \quad (1.1)$$

$$n = \frac{U}{k_e \Phi} - \frac{R_a + R_{доб}}{k_e k_m \Phi^2} M, \quad (1.2)$$

где Φ – поток возбуждения; R_a и $R_{доб}$ – собственное сопротивление якоря и добавочное сопротивление в его цепи; k_e и k_m – постоянные коэффициенты, зависящие от конструкции МПТ (если частота вращения выражается в радианах: $k_e = k_m$).

При $\Phi = \text{const}$ между током и моментом существует линейная зависимость, и законы изменения $n = f(I_a)$ и $n = f(M)$ одинаковы.

В двигательном режиме направление электромагнитного момента и направление вращения якоря совпадают. Общим признаком тормозных режимов является их противоположное направление.

Характеристики МПТ НВ в этих режимах располагаются в четырех квадрантах (рис. 1.1).

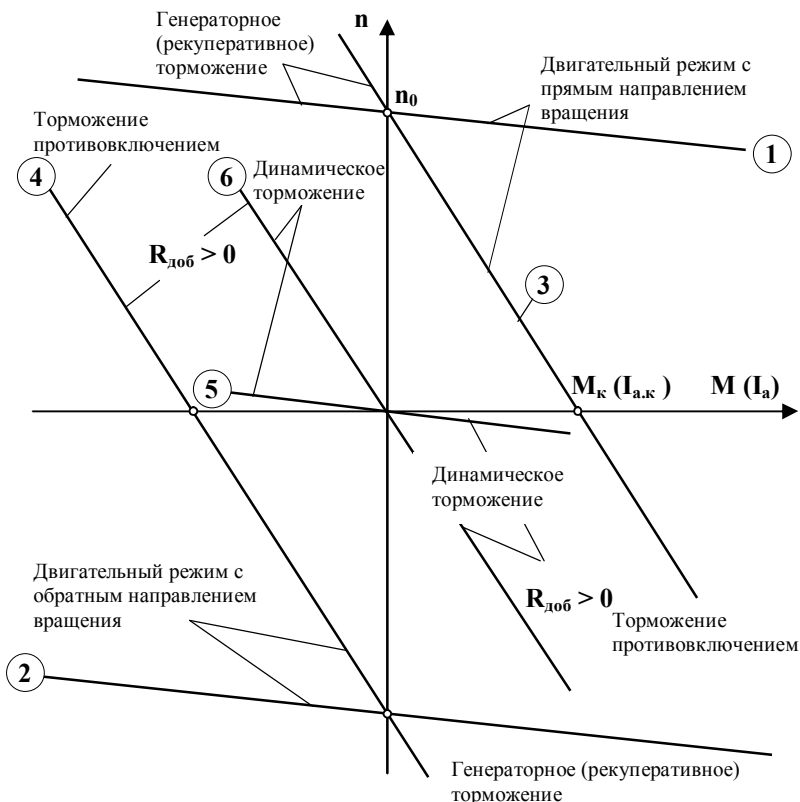


Рисунок 1.1 – Характеристики МПТ НВ в различных режимах работы

Естественная характеристика 1. Часть характеристики в 1-м квадранте соответствует двигательному режиму работы с прямым направлением вращения, а ее продолжение во 2-м квадранте – режиму рекуперативного торможения. Продолжение характеристики в 4-й квадрант сопряжено с большими токами и потому нецелесообразно.

Характеристика 2 является зеркальным отображением характеристики 1, и соответствует обратному направлению вращения якоря.

Искусственная характеристика 3, получаемая путем введения в цепь якоря добавочного сопротивления, располагается в 1-квадранте (двигательный режим) и в 4-м квадранте (торможение противовключением). Продолжение ее во 2-й квадрант (рекуперативное торможение) нецелесообразно ввиду больших потерь энергии в добавочном сопротивлении и резкого возрастания частоты вращения.

Характеристика 4 является зеркальным отображением характеристики 3, и соответствует обратному направлению вращения якоря.

Характеристики 5 и 6 соответствуют режиму динамического торможения при отсутствии (характеристика 5) и введении в цепь якоря добавочного сопротивления (характеристика 6) при торможении из двигательного режима с прямым (2-й квадрант) и обратным (4-й квадрант) направлением вращения.

Режим рекуперативного торможения возникает, если частота вращения якоря МПТ превышает частоту вращения идеального холостого хода. При этом ток якоря и электромагнитный момент изменяют знак на противоположный, а ЭДС превышает приложенное к обмотке якоря напряжение:

$$n > n_0; \quad I_a < 0; \quad M < 0, \quad E = C_E \Phi n > U.$$

Поскольку характеристика в режиме рекуперативного торможения является продолжением характеристики в двигательном режиме, ее удобно строить по точкам:

$$n = n_0 = n_{\text{ном}} \frac{U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}} - I_{a.\text{ном}} R_a}; \quad I_a = 0; \quad (1.3)$$

$$n = n_{\text{ном}}; \quad I_a = I_{a.\text{ном}}.$$

В режиме рекуперативного торможения МПТ возвращает (рекуперировать) в сеть энергию, сообщаемую ее валу за вычетом потерь. Такой режим возникает в грузоподъемных механизмах (скоростной спуск), электротяге (движение под уклон больших инерционных масс), и других подобных случаях.

Торможение противовключением обеспечивает полную остановку якоря МПТ, а при необходимости и его реверс.

Торможение противовключением может осуществляться путем тормозного спуска или изменением полярности напряжения на якоре.

При тормозном спуске (рис. 1.2 - а) якорь МПТ изменяет направление вращения под действием внешнего момента. При этом МПТ потребляет ток из сети и развивает вращающий момент:

$$E = C_E \Phi_B n < 0; \quad n < 0; \quad I_a > 0; \quad M > 0.$$

Изменение полярности напряжения на якоре приводит к переходу МПТ с характеристики 1 на характеристику 2 (рис. 1.2). Если при остановке МПТ напряжение не отключить, она перейдет в двигательный режим работы с обратным направлением вращения.

В обоих случаях необходимо ограничивать ток путем введения в цепь якоря добавочного сопротивления. Режим торможения противовключением характеризуется большими потерями мощности.

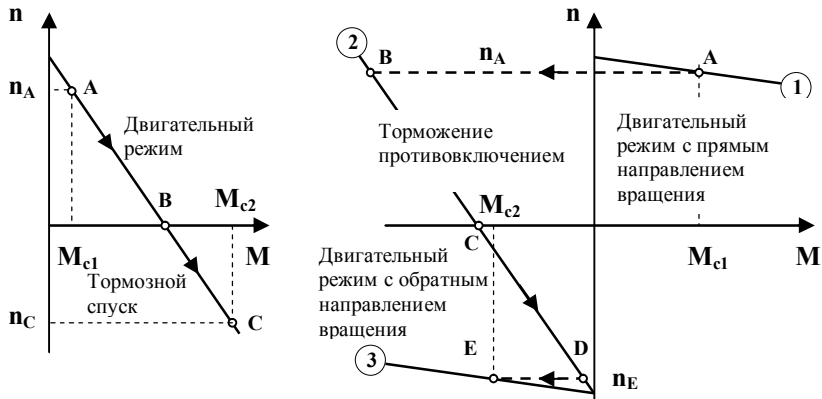


Рисунок 1.2 – Характеристики МПТ НВ в режиме торможения противовключением: а – тормозной спуск; б – изменение полярности напряжения с последующим реверсом

Допустимый ток и величина добавочного сопротивления при торможении противовключением определяются по формулам:

$$I_{тпв} = \frac{E + U}{R_a + R_{тпв}} = \frac{C_E \Phi_B n + U}{R_a + R_{тпв}}; \quad R_{тпв} = \frac{E + U}{I_{тпв}} - R_a, \quad (1.5)$$

а характеристика строится по точкам: $n = n_0$; $I_a = 0$ и:

$$n = 0; \quad I_a = I_{a.к} = \frac{U}{(R_{тпв} + R_a)} \quad (1.6)$$

Если торможение осуществляется от $n_{ном}$:

$$I_{тпв} \approx \frac{2U}{(R_a + R_{тпв})}; \quad R_{тпв} \approx \frac{2U}{I_{тпв}} - R_a$$

Динамическое торможение осуществляется путем отключения обмотки якоря от источника питания и замыкания её на тормозное сопротивление при неизменном токе возбуждения (рис. 1.3 - а). Якорь МПТ продолжает вращаться по инерции, и в его обмотке наводится ЭДС, под действием которой через тормозное сопротивление протекает ток. При $U = 0$ уравнения 1.1,1.2 принимают вид:

$$n = -\frac{R_a + R_{\text{доб}}}{k_e \Phi} I_a; \quad (1.7)$$

$$n = -\frac{R_a + R_{\text{доб}}}{k_e k_M \Phi^2} M. \quad (1.8)$$

Характеристики динамического торможения отличаются от остальных характеристик тем, что частота вращения идеального холостого хода для них тождественно равна нулю: $n_0 = 0$. Наклон, как и в других режимах, зависит от величины добавочного сопротивления.

Переход к динамическому торможению из двигательного режима осуществляется следующим образом. После отключения якоря от источника питания и замыкания его на тормозное сопротивление частота вращения остается практически неизменной, но ток и развиваемый МПТ момент изменяют направление. Далее по характеристике $B \rightarrow 0$ ток, момент и частота вращения уменьшаются до нуля.

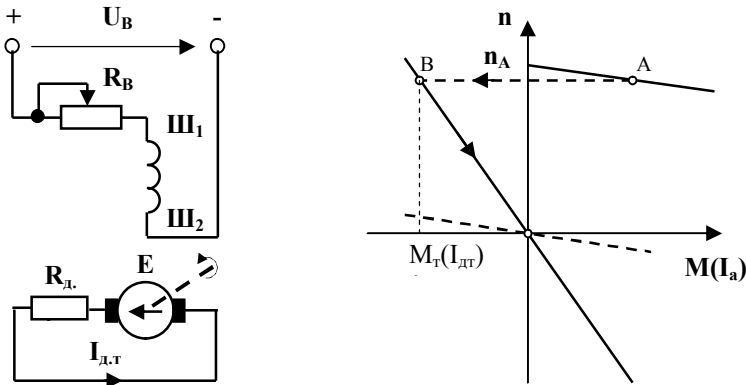


Рисунок 1.3 – Схема включения (а) и характеристики (б) ДПТ НВ в режиме динамического торможения

Сопротивление, обеспечивающие ограничение тока при динамическом торможении до допустимого значения, равно:

$$I_{\text{доп}} = \frac{E_A}{r_a + r_{\text{дт}}} = \frac{C_E \Phi_B n_A}{r_a + r_{\text{дт}}}; \quad r_{\text{дт}} = \frac{E_A}{I_{\text{доп}}} - r_a. \quad (1.9)$$

Вторая точка для построения характеристики ДТ:

$$n = n_{\text{ном}}; \quad I_{\text{дт}} = -\frac{U}{R_{\text{дт}} + R_a} \quad (1.10)$$

2. Указания по выполнению работы

- 2.1. Записать паспортные данные исследуемой МПТ. Определить сопротивления обмотки якоря и ступеней пускового реостата.
- 2.2. Определить частоту вращения идеального холостого хода (формула 1.4) и ток короткого замыкания при полностью введенном пусковом реостате (формулы 1.3, 1.6, 1.10)..
- 2.3. Рассчитать и построить в одних координатах следующие электромеханические характеристики:
 - 1 – естественную характеристику в режимах двигателя и рекуперативного торможения при $R_{доб} = 0$;
 - 2 – реостатную характеристику в режимах двигателя и торможения противовключением при максимальном значении $R_{доб}$;
 - 3 – характеристику в режиме динамического торможения при максимальном значении $R_{доб}$.
- 2.5. Установить с помощью фазорегулятора минимальное напряжение. Подключить вспомогательную МПТ (рис..2.1). Произвести пробный пуск и определить направление вращения якоря.

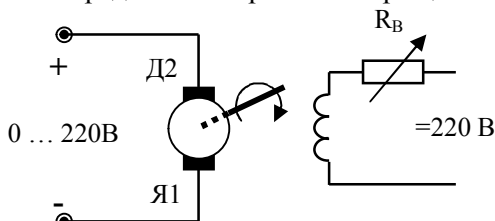


Рисунок 2.1 – Подключение вспомогательной машины постоянного тока

- 2.6. Отключить питание вспомогательной машины и собрать схему подключения исследуемой МПТ (рис.2.2). Установить переключатель пускового реостата $R_{п}$ в крайнее левое положение (максимальное сопротивление), а регулятор тока возбуждения $R_{в}$ в крайнее правое положение (максимальный ток возбуждения).
- 2.7. Произвести пробный пуск исследуемой МПТ и определить направление вращения якоря. которое должно совпадать с направлением вращения вспомогательной МПТ. В противном случае изменить полярность подключения вспомогательной МПТ.

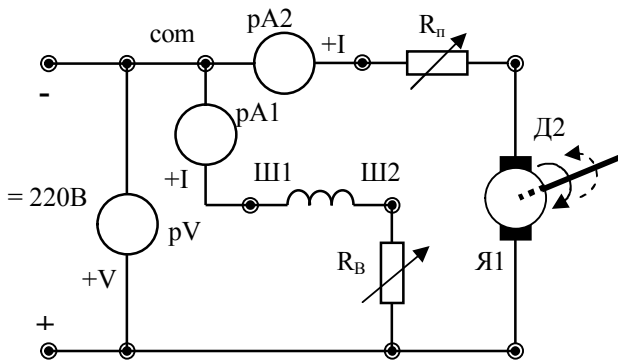


Рисунок 2.2 – Схема подключения исследуемой МПТ

- 2.7. Постепенно повышая напряжение на зажимах вспомогательной МПТ и увеличивая обороты измерять ток и частоту вращения:
 - в двигательном режиме (ток положителен, частота вращения меньше частоты вращения идеального х.х.);
 - в режиме идеального холостого хода (частота вращения равна частоте идеального х.х., ток равен нулю);
 - в режиме рекуперативного торможения (частота вращения превышает частоту идеального х.х., ток изменяет знак).
- 2.8. Ввести в цепь якоря исследуемой машины максимальное добавочное сопротивление и изменить направление её вращения.
- 2.9. Уменьшить подводимое к якорю вспомогательной МПТ напряжение до минимума и произвести пуск. Постепенно повышая напряжение, добиться снижения частоты вращения до нуля и затем перевести исследуемую машину в режим торможения противовключением. Произвести необходимые измерения.
- 2.10. Якорь исследуемой машины отключить от источника питания и замкнуть на тормозное сопротивление, оставив при этом включенной обмотку возбуждения (рис. 1.3). Постепенно увеличивая напряжение, подводимое к нагрузочной машине, произвести измерения тока и частоты вращения в режиме динамического торможения.
- 2.11. Характеристики, полученные опытным путем, построить на том же графике, что и расчетные. Оформить отчет. Сделать выводы.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Общие методические указания	4
Работа №1. Исследование генераторов постоянного тока с самовозбуждением	8
Работа № 2. Исследование двигателей постоянного тока с независимым и параллельным возбуждением	16
Работа № 3. Исследование машины постоянного тока с независимым возбуждением	25

Издательская лицензия ЛР №065840 от 23.04.1889 г.
Издательство "Ставрополь-Сервис-Школа"
355011, г. Ставрополь, ул. 45-я Параллель, 36
Тел.: (8652) 57-47-27. E-mail: s-school@mail.ru, книга-ставрополь.рф

*Налоговая льгота - Общероссийский классификатор продукции
ОК 005-93-953000*

Публикуется в авторской редакции

Подписано в печать 24.05.2019 г. Гарнитура «Times».
Формат 60 x 84 1/16. Усл. печ. л. 4,0. Тираж 500. Заказ 52

Отпечатано в типографии «ССШ», 355011, г. Ставрополь, ул. 45-я Параллель, 36.