

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПС ЭТ



УДК 629.243.053.3

Данное методическое указание к выполнению курсового проекта по дисциплине «Автоматизация ПС ЭТ» для подготовки магистров по специальности 5А.521.310 «Электрический транспорт» и бакалавров направления 5521300 – «Электр техникаси, электр механикаси ва электр технологияси», составлено с учетом требований Государственного образовательного стандарта «Общие требования к необходимому содержанию и уровню подготовленности магистров и бакалавров».

Рекомендовано к изданию решением Учебно-методической комиссии Ташкентского института инженеров железнодорожного транспорта

Авторы:

Г. А. Хромова – т.ф.д., профессор
Б. К. Уринбаев – магистрант
Ш. С. Расулов – магистрант

Рецензенты:

А. А. Ризаев – Директор АН и ИМ СС,
д.т.н., профессор
Ш. С. Файзибаев – д.т.н., профессор

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта, 2009

ВВЕДЕНИЕ

Системы управления электроподвижного состава являются одной из важнейших составных частей подвижного состава, предназначенной для регулирования тяговых и тормозных режимов работы в соответствии с заданной программой графика движения транспорта. Поэтому изучение структуры, принципа действия, условий эксплуатации систем управления электроподвижного состава должна являться неотъемлемой частью комплекса знаний, получаемых в процессе обучения магистром, специализирующимся в области электрического подвижного состава электрического транспорта.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Практические занятия направлены на приобретение навыков составления и решения уравнений, описывающих работу основных элементов электрооборудования электрического транспорта, пусковых устройств и элементов электродвигателя, перегруппировку электродвигателей при пуске, виды электрических схем управления электрическим транспортом, электродинамическое торможение тяговых двигателей; реостатное торможение, рекуперативное торможение, рекуперативно-реостатное торможение, выпрямительные устройства, преобразователи частоты для тяговых электрических двигателей, релейно-контакторное управление, тиристорное управление и регулирование тяговых электрических двигателей, электрические схемы управления вспомогательных механизмов. Все расчеты выполняются с использованием виртуальных технологий на ЭВМ.

Темы виртуальных практических занятий:

1. Исследование полупроводникового стабилизатора.
2. Исследование транзисторов.
3. Электрическое торможение с тяговыми двигателями независимого и последовательного возбуждения.
4. Исследование характеристик тягового электродвигателя электропоезда двойного питания.

Виртуальная практическая работа № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО СТАБИЛИТРОНА

Цель работы – изучение основных свойств стабилитрона, оценка работы параметрического стабилизатора напряжения.

Общие сведения

Стабилитрон – это разновидность полупроводникового диода, рабочей областью которого, в отличие от обычного выпрямительного диода, является обратная ветвь вольтамперной характеристики (ВАХ). Эта ветвь имеет область контролируемого лавинного пробоя, который является обратимым (в отличие от теплового пробоя, при котором $p-n$ переход разрушается). Под действием обратного напряжения при высокой напряженности внутреннего электрического поля $p-n$ перехода, смещенного в обратном направлении, происходит ударная ионизация нейтральных атомов кристаллической решетки неосновными носителями зарядов, развивается процесс лавинообразного увеличения числа носителей зарядов, в результате чего резко возрастает обратный ток. При лавинном характере пробоя $p-n$ перехода незначительное изменение напряжения вызывает резкое изменение тока, причем в диапазоне от I_{\min} до I_{\max} напряжение на нем практически не меняется (рисунок 1.1). При токах больших I_{\max} происходит тепловой пробой, что приводит к выходу стабилитрона из строя.

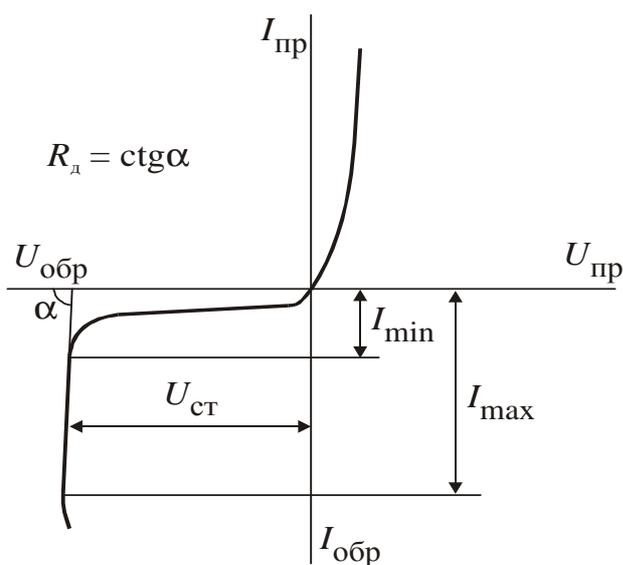


Рисунок 1.1

Напряжение, при котором происходит пробой, может быть различным, так как зависит от химического состава и технологии изготовления полупроводника. Это даёт возможность выпускать стабилитроны на различное напряжение.

Стабилитроны применяются в различных устройствах: стабилизаторах, ограничителях перенапряжений, в качестве опорных элементов в системах автоматического управления.

К основным нормируемым параметрам стабилитрона относятся:

- мощность рассеяния $P_{ст.маx}$ – мощность потерь энергии в структуре стабилитрона, превышение которой приводит к тепловому пробую стабилитрона;
- напряжение стабилизации $U_{ст}$ – падение напряжения на стабилитроне при номинальном токе стабилизации;
- минимальный ток стабилизации $I_{ст.мин}$ – величина обратного тока стабилитрона, при котором наступает устойчивый лавинный пробой;
- максимальный ток стабилизации $I_{ст.маx}$ – величина обратного тока стабилитрона, превышение которого приводит к тепловому пробую стабилитрона;
- динамическое сопротивление R_d – сопротивление стабилитрона в открытом состоянии. Величина динамического сопротивления определяется углом наклона рабочей части ВАХ к оси напряжений (см. рисунок 1.1):

$$R_d = \frac{\Delta U_{обр}}{\Delta I_{обр}} = \text{ctg}\alpha \text{ при } I_{ст.мин} \leq I_{ст} \leq I_{ст.маx} \quad (1.1);$$

- температурный коэффициент напряжения стабилизации (ТКН) – изменение напряжения стабилизации в зависимости от изменения температуры структуры стабилитрона:

$$\text{ТКН} = -\frac{\Delta U_{ст}}{U_{ст} \cdot \Delta T} \quad (1.2).$$

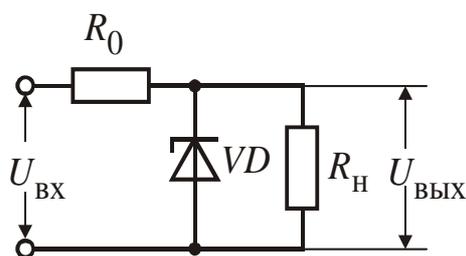


Рисунок 1.2

Для стабилизации напряжения стабилитрон включают параллельно нагрузке (рисунок 1.2). Такую схему называют параметрическим стабилизатором напряжения. Во входную цепь стабилизатора включают балластный резистор R_0 , который ограничивает ток, протекающий через стабилитрон.

Маркировка стабилитронов производится в зависимости от мощности и напряжения стабилизации и состоит из 4 элементов:

1-й – материал, из которого изготовлен стабилитрон: буква Г или цифра 1 (германий); буква К или цифра 2 (кремний);

2-й – функциональное назначение полупроводникового прибора: для стабилитрона – буква С;

3-й – номер разработки в зависимости от мощности рассеяния и напряжения стабилизации (см. таблицу 1.1);

4-й – буква, обозначающая разновидность прибора.

Пример условного обозначения стабилитрона: КС235А (2С235А) – кремниевый стабилитрон с мощностью рассеяния до 0,3 Вт и напряжением стабилизации 35 В.

Для стабилизации напряжения в цепи переменного тока применяются встречно включенные стабилитроны или двухсторонние стабилитроны, ВАХ которых представляет собой сочетание двух обратных ветвей.

Программа работы

1. С помощью виртуального осциллографа снять ВАХ характеристики стабилитрона. Для этого:

1.1. Собрать схему в соответствии с рисунком 1.3.

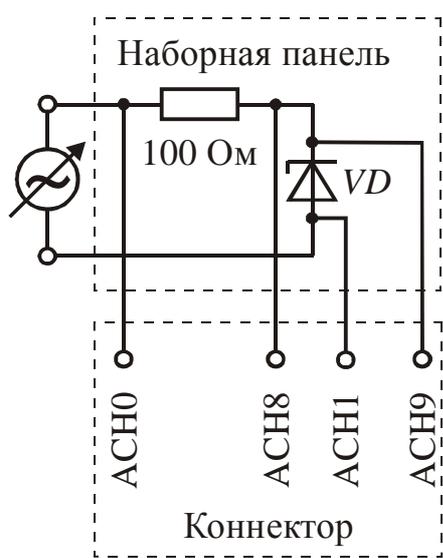


Рисунок 1.3

В качестве источника переменного напряжения используется генератор стандартных сигналов. Переключатель формы сигнала необходимо установить в положение "синусоидальное", регулятор амплитуды – в положение "0", регулятор частоты – в минимально возможное положение. Сигнал о токе стабилитрона снимается с сопротивления 100 Ом, а сигнал о напряжении на стабилитроне – непосредственно со стабилитрона.

1.2. После сборки схемы необходимо запустить программу виртуального осциллографа в среде Labview. Для этого выбрать на рабочем столе ярлык "Программное обеспечение – РСІ 6024Е" или соответствующую команду в главном меню и открыть папку "Программное обеспечение". Затем выбрать папку "Осциллографы" и в ней – X-Y осциллограф. Для запуска программы дважды щелкнуть мышью на выбранном значке.

Т а б л и ц а 1.1

Напряжение стабилизации, В	Номер разработки		
	Малая мощность (до 0,3 Вт)	Средняя мощность (0,3...0,5 Вт)	Большая мощность (5...10 Вт)
0,1...9,9	101...199	401...499	701...799
10...99	210...299	510...599	810...899
100...199	300...399	600...699	900...999

Рекомендуется установить скорость сканирования $100000 \cdot 10^3/\text{с}$, после чего надо запустить осциллограф, щелкнув мышью на экране виртуального осциллографа по кнопке с символом "↻" (RUN CONTINUOUSLY). После этого включить установку и увеличивая амплитуду напряжения, добиться устойчивого изображения на экране виртуального осциллографа. Изображение ВАХ необходимо сохранить в виде графического файла, используя кнопку "Print screen" клавиатуры компьютера и графический редактор Paint.

По вольтамперной характеристике необходимо определить:

- напряжение стабилизации. При оформлении отчета необходимо установить по справочнику паспортное напряжение стабилизации для данного типа стабилизатора;
- динамическое (дифференциальное) сопротивление стабилизатора, чтобы впоследствии скорректировать расчет параметрического стабилизатора. Динамическое сопротивление стабилизатора определяется по наклону прямолинейного участка обратной ветви вольтамперной характеристики к оси $U_{\text{обр}}$ (см. рисунок 1.1).

2. Исследовать работу параметрического стабилизатора напряжения с полупроводниковым стабилизатором.

2.1. Рассчитать параметры схемы стабилизатора по методике, приведенной в приложении 1.2.

2.2. Определить величину минимального сопротивления нагрузки, при котором на выходе стабилизатора имеет место максимальный ток. Для этого из таблицы 1.2 по номеру бригады определить максимальный ток нагрузки $I_{\text{н.мах}}$. Минимальное сопротивление нагрузки рассчитать по формуле:

$$R_{H \min} = \frac{U_{\text{стн}} \cdot (1 + 0,5 \cdot \delta)}{I_{H.\max}} \quad (1.3).$$

Т а б л и ц а 1.2

Номер бригады по журналу	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_{H.\max}$, mA	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

После этого установить на наборную панель переменный резистор и выставить с помощью регулировочной рукоятки этого резистора требуемое значение сопротивления (замер сопротивления производить мультиметром переключенным в режим "Измерение сопротивления"). *После этого регулировочную рукоятку резистора не трогать!*

Добавочный балластный резистор R_0 выбрать из имеющихся в наличии, имеющий наиболее близкое к расчетному сопротивление.

2.3. Собрать схему стабилизатора в соответствии с рисунком 1.4.

В качестве вольтметров использовать цифровые мультиметры, а в качестве амперметров – стрелочные приборы:

- А1 – 0...50 mA;
- А3 – 0...20 mA.

Миллиамперметр А2 можно не устанавливать, так как $I_2 = I_1 - I_3$.

2.4. Снять характеристику стабилизатора. Для этого:

2.4.1. Установить регулятор источника постоянного напряжения в положение "0".

2.4.2. Включить питание источника постоянного напряжения.

2.4.3. Плавно увеличивая напряжение от 0 до $U_{\text{вх.мак}}$, записать в таблицу 1.3 показания приборов.

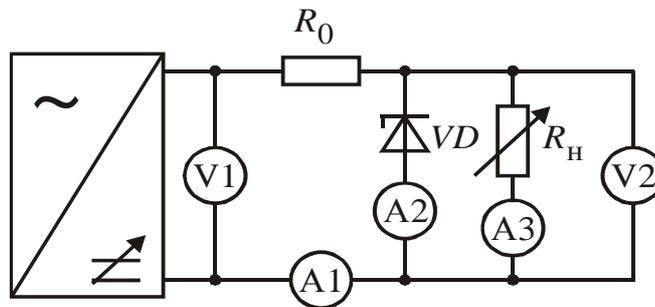


Рисунок 1.4

При этом не допускается превышать предельные значения токов и напряжений.

Таблица 1.3

$U_{вх}, В$	V1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...	$U_{вх.max}$
$U_{вых}, В$	V1												
$I_{вх}, mA$	A1												
$I_{ст}, mA$	A2												
$I_{н}, mA$	A3												

Содержание отчета.

Отчет по практической работе должен содержать:

1. Принципиальные схемы опытов и таблицы измерений.
2. Результаты расчета дифференциального сопротивления стабилитрона.
3. Расчет параметрического стабилизатора.
4. ВАХ стабилитрона.
5. Характеристику стабилизатора $U_{вых} = f(U_{вх})$, построенную по опытными данным на миллиметровой бумаге.
6. Выводы по работе.

Контрольные вопросы:

1. Особенности работы и назначение стабилитрона.
2. Отличие лавинного пробоя $p-n$ перехода от теплового.
3. Основные параметры стабилитрона.
4. Маркировка стабилитронов и их обозначение на схемах.
5. Вольтамперная характеристика стабилитрона.
6. Принципиальная схема параметрического стабилизатора напряжения для цепи постоянного и переменного тока.
7. Порядок расчета параметрического стабилизатора напряжения.

Виртуальная практическая работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНЗИСТОРОВ

Цель работы: изучение статических характеристик биполярного транзистора, работающего по схеме с общим эмиттером.

1.1. Принцип действия биполярного транзистора

Термин "транзистор" происходит от сочетания английских слов *transfer resistor*, что означает "управляемое сопротивление". Различают две большие группы транзисторов: биполярные и полевые.

Биполярный транзистор представляет собой полупроводниковый прибор с трехслойной структурой. Крайние слои структуры называются *эмиттером* и *коллектором*, а средний слой – *базой*. Тип проводимости эмиттера и коллектора всегда отличен от типа проводимости базы. Если эмиттер и коллектор имеют проводимость *p*-типа, то база имеет проводимость *n*-типа, и наоборот. Транзистор, имеющий проводимость *p-n-p* типа называется транзистором прямой проводимости, а транзистор, имеющий проводимость *n-p-n* типа – обратной проводимости.

Условное обозначение биполярных транзисторов показано на рисунке 2.1. Окружность вокруг электродов означает, что кристалл транзистора помещен в корпус. В случае бескорпусного исполнения транзистора, например в составе микросхемы, окружность на условном обозначении отсутствует.

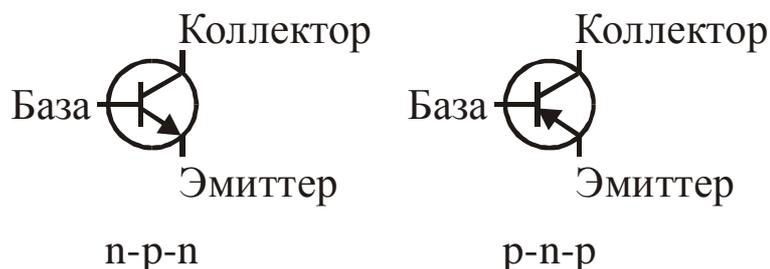


Рисунок 2.1

p-n-переходам биполярного транзистора присущи некоторые особенности:

во-первых, обычно эмиттерную и коллекторную области легируют примесями значительно больше, чем базовую. Вследствие этого

концентрация основных носителей зарядов в эмиттере и коллекторе превышает концентрацию основных носителей в базе. Неодинаковая концентрация основных носителей зарядов приводит к тому, что эмиттерный и коллекторный $p-n$ переходы несимметричны и имеют большую толщину в области базы;

во-вторых, ширина базовой области делается меньше длины диффузионного пробега носителей зарядов. Поэтому носители, инжектированные одним $p-n$ -переходом, могут достигнуть второго перехода и войти в него. Соответственно изменение тока одного перехода приводит к изменению тока другого перехода. Таким образом, имеет место единая система двух взаимодействующих $p-n$ -переходов.

Каждый $p-n$ -переход транзистора может быть включен как в прямом, так и обратном направлении. Соответственно различают четыре режима включения транзистора:

- нормальный активный – переход эмиттер-база включен в прямом направлении, коллектор-база – в обратном;
- инверсный активный – переход эмиттер-база включен в обратном направлении, коллектор-база – в прямом;
- отсечки – оба перехода включены в обратном направлении;
- насыщения – оба перехода включены в прямом направлении

Нормальное включение транзистора используют в схемах усилительных устройств; инверсное включение используется сравнительно редко. Режимы отсечки и насыщения характерны для устройств, в которых транзистор используется в качестве электронного ключа.

В схемах электронных устройств различают две основные цепи: входную (управляющую) и выходную (управляемую). Транзистор обычно включают таким образом, что один из его электродов является общим для входных и выходных цепей. Различают три схемы включения транзистора (рисунок 2.2):

- с общей базой (ОБ);
- с общим коллектором (ОК);
- с общим эмиттером (ОЭ).

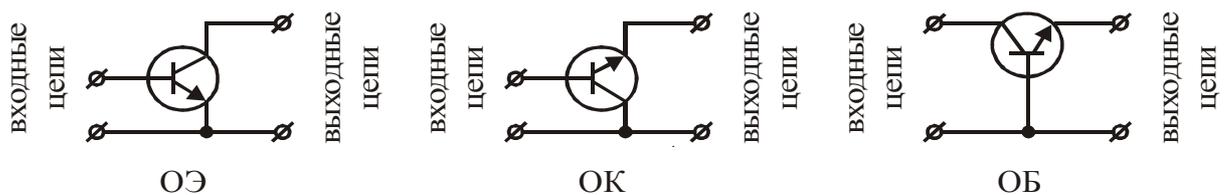


Рисунок 2.2

Рассмотрим принцип работы транзистора $n-p-n$ типа, включенного по схеме с общим эмиттером. В случае нормального активного включения транзистора $p-n$ -переход эмиттер-база смещен в прямом направлении, а коллектор-база – в обратном. Вследствие того, что концентрация основных носителей зарядов в области базы значительно ниже, чем в области эмиттера, происходит инжекция из эмиттера в базу неосновных для нее носителей – электронов.

Меньшая часть инжектированных в базу электронов рекомбинирует с дыркам, так как область базы легирована примесями меньше, чем эмиттер. Вследствие того, что ширина базовой области меньше диффузионного пробега электронов, часть электронов, инжектированных из эмиттера, достигают $p-n$ -перехода коллектор-база. Он смещен в обратном направлении и его поле ускоряет неосновные носители зарядов: электроны базы и дырки коллектора. Поэтому электроны переходят из базы в коллектор, а дырки – из коллектора в базу.

При увеличении напряжения между эмиттером и базой ширина $p-n$ -перехода уменьшается, а количество электронов, инжектированных в базу, увеличивается.

Поскольку переход коллектор-база смещен в обратном направлении, его сопротивление на несколько порядков больше, чем сопротивление перехода эмиттер-база, смещенного в прямом направлении. Поэтому в цепь коллектора может быть включен источник напряжения порядка 10...100 В. За счет мощности источника в цепи коллектора мощность сигнала, выделяемая на сопротивлении нагрузки, гораздо больше мощности сигнала, подаваемого в цепь базы. Причем малое изменение напряжения в цепи базы вызывает большое изменение напряжения на сопротивлении нагрузки. В результате имеет место усиление напряжения и мощности.

Параметры транзистора можно подразделить на "первичные" и "вторичные". К первичным относятся сопротивления эмиттера, коллектора, базы и коэффициент передачи тока эмиттера α . Вторичные, называемые h -параметрами, определяются схемой включения транзистора и характеризуют связь между токами и напряжениями на входе и выходе транзистора.

Для системы h -параметров, имеющей наибольшее распространение в пределах линейной части характеристик справедлива следующая система уравнений:

$$\begin{cases} \Delta U_{эб} = h_{11}\Delta I_{б} + h_{12}\Delta U_{эк} \\ \Delta I_{к} = h_{21}\Delta I_{б} + h_{22}\Delta U_{эк} \end{cases} \quad (2.1).$$

Физический смысл h -параметров становится понятен при поочередном приравнении нулю элементов, находящихся в правой части уравнений:

$$- \Delta U_{\text{эк}} = 0 (U_{\text{эк}} = \text{const})$$

$$h_{11} = \frac{\Delta U_{\text{эб}}}{\Delta I_{\text{б}}} - \text{входное сопротивление};$$

$$h_{21} = \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta I_{\text{б}}} - \text{коэффициент усиления по току.}$$

$$- \Delta I_{\text{б}} = 0 (I_{\text{б}} = \text{const})$$

$$h_{12} = \frac{\Delta U_{\text{эб}}}{\Delta U_{\text{эк}}} - \text{коэффициент усиления по напряжению};$$

$$h_{22} = \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta U_{\text{эк}}} - \text{выходная проводимость.}$$

2.2. Характеристики биполярных транзисторов

Параметры транзисторов определяются статическими и динамическими характеристиками. Статические характеристики представляют собой зависимости токов через электроды транзисторов от напряжений между электродами, т.е. семейство вольтамперных характеристик. Статические входные характеристики определяют зависимость тока базы от напряжения база-эмиттер ($I_{\text{б}} = f(U_{\text{эб}})$) при постоянном напряжении коллектор-эмиттер, а статические выходные характеристики – зависимость тока коллектора от напряжения между коллектором и эмиттером ($I_{\text{к}} = f(U_{\text{эк}})$), при постоянном токе базы. Статические входные и выходные характеристики транзистора для схемы с общим эмиттером приведены на рисунок 2.3.

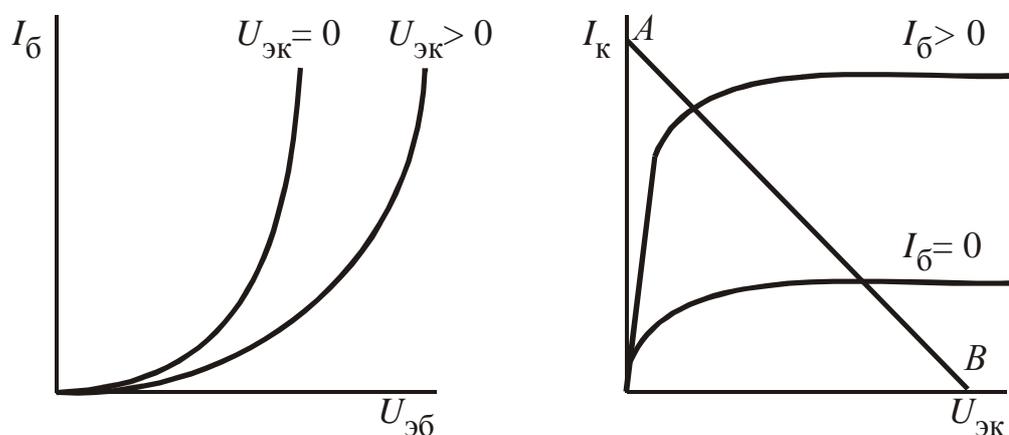


Рисунок 2.3

Статические выходные характеристики транзистора показывают, как изменяется проводимость транзистора при различных значениях тока базы. Так как зависимость между напряжением $U_{кэ}$ и током $I_{к}$ нелинейная, то нельзя сказать, что транзистор имеет какое-либо определенное сопротивление при каждом значении тока базы, так как оно меняется и в зависимости от самих выходных параметров, т.е. само является нелинейным. Однако по своей сути транзистор все-таки является сопротивлением, хоть и нелинейным, величину которого можно регулировать сравнительно небольшим, по сравнению с током коллектора, током базы.

Статические входные и выходные характеристики снимаются без резистора нагрузки в цепи коллектора. Режим работы транзистора с нагрузкой $R_{н}$ в цепи коллектора называется динамическим. За динамическую входную характеристику обычно принимают одну из статических входных характеристик при незначительной величине $U_{кэ}$.

Динамическая выходная характеристика представляет собой прямую линию, описываемую уравнением

$$U_{кэ} = E_{к} - I_{к} \cdot R_{н} \quad (2.2),$$

где $E_{к}$ – напряжение источника питания, включенного в коллекторную цепь.

Построение динамической характеристики производится на основании двух режимов: холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ):

$$\text{ХХ} - I_{к} = 0 \Rightarrow U_{кэ} = E_{к} \quad (2.3);$$

$$\text{КЗ} - U_{кэ} = 0 \Rightarrow I_{к} = \frac{E_{к}}{R_{н}} \quad (2.4).$$

На рисунке 2.3 динамической выходной характеристике соответствует прямая AB .

2.3. Программы работы

1. Виртуально собрать схему лабораторной установки согласно рисунку 1.4. Провода и приборы, которые необходимо смонтировать показаны на рисунке утолщенными линиями.

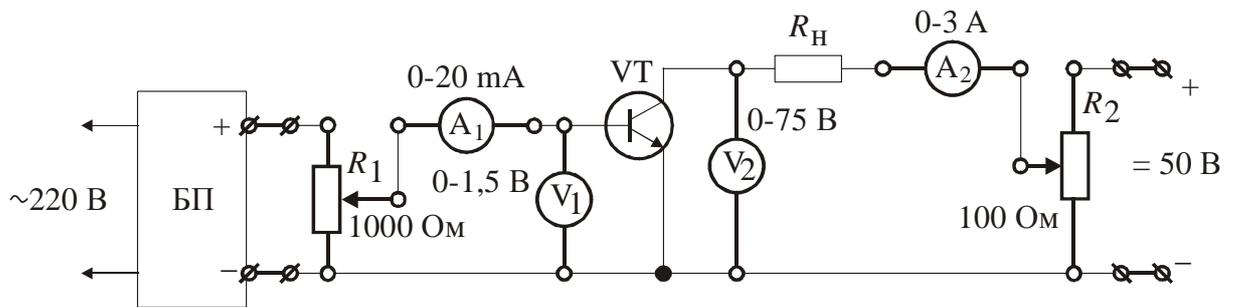


Рисунок 1.4

2. Исследовать статические входные характеристики транзистора.

Для этого:

2.1. По вольтметру V_2 установить $U_{кэ} = 10$ В с помощью реостата R_2 .

2.2. По амперметру A_1 установить $I_b = 2$ mA с помощью реостата R_1 .

2.3. С помощью реостата R_2 отрегулировать напряжение $U_{кэ}$ на заданном уровне (если оно изменилось).

2.4. Занести в таблицу 2.1 величину напряжения $U_{бэ}$, измеренную по вольтметру V_1 .

2.5. Повторить опыт по п.п. 2.2-2.4 для значений тока I_b , указанных в таблице 2.1:

Таблица 2.1

I_b , mA	A_1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
	V_2	$U_{кэ} = 10$ В									
$U_{бэ}$, В	V_1										
	V_2	$U_{кэ} = 30$ В									
$U_{бэ}$, В	V_1										

2.6. По вольтметру V_2 установить $U_{кэ} = 30$ В с помощью реостата R_2 . Повторить опыт по п.п.2.2-2.5.

3. Исследовать статические выходные характеристики. Для этого:

3.1. По амперметру A_1 установить $I_b = 10$ mA с помощью реостата R_1 .

3.2. По вольтметру V_2 установить $U_{кэ} = 1$ В с помощью реостата R_2 .

3.3. С помощью реостата R_1 отрегулировать ток I_b на заданном уровне (если он изменился).

3.4. Занести в таблицу 2.2 величину тока I_k , измеренную по амперметру A_2 .

3.5. Повторить опыт по п.п.3.2-3.4 для значений напряжения $U_{кэ}$, указанных в таблице 2.2:

3.6. По амперметру A_1 установить $I_б = 20$ мА с помощью реостата R_1 . Повторить опыт по п.п.3.2-3.5.

4. Исследовать динамическую выходную характеристику. Для этого:

4.1. По вольтметру V_2 установить максимально возможное напряжение с помощью реостата R_2 .

4.2. Изменяя ток базы с помощью реостата R_1 от 0 до 20 мА с интервалом 2 мА, заносить в таблицу 2.3 показания приборов A_2 и V_2 :

Таблица 2.2

$U_{кэ}, В$	V_2	1	2	3	4	5	6	8	10	15	20	25	30	35
	A_1	$I_б = 10$ мА												
$I_k, А$	A_2													
	A_1	$I_б = 20$ мА												
$I_k, А$	A_2													

Таблица 2.3

$I_б, мА$	A_1	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$U_{кэ}, В$	V_2											
$I_k, А$	A_2											

5. Ознакомиться с требованиями к оформлению отчета.

2.3. Содержание отчета

1. Тип транзистора и его предельные эксплуатационные параметры.
2. Схема виртуальной лабораторной установки.
3. Таблицы опытных величин.
4. Графики статических входных ($I_б = f(U_{бэ})$) характеристик транзистора, построенные на миллиметровой бумаге.
5. Графики статических выходных ($I_k = f(U_{кэ})$) характеристик транзистора, построенные на миллиметровой бумаге.

6. Графики опытной и расчетной динамических выходных ($I_K = f(U_{KЭ})$) характеристик транзистора, построенные на миллиметровой бумаге.

7. h -параметры транзистора, рассчитанные на основании опытных характеристик, полученных в п.2 и п.3, по формулам, приведенным в теоретической части методических указаний.

2.5. Программа работы:

1. Собрать виртуальную схему для исследования транзистора при его включении с общим эмиттером согласно рисунку 2.5.

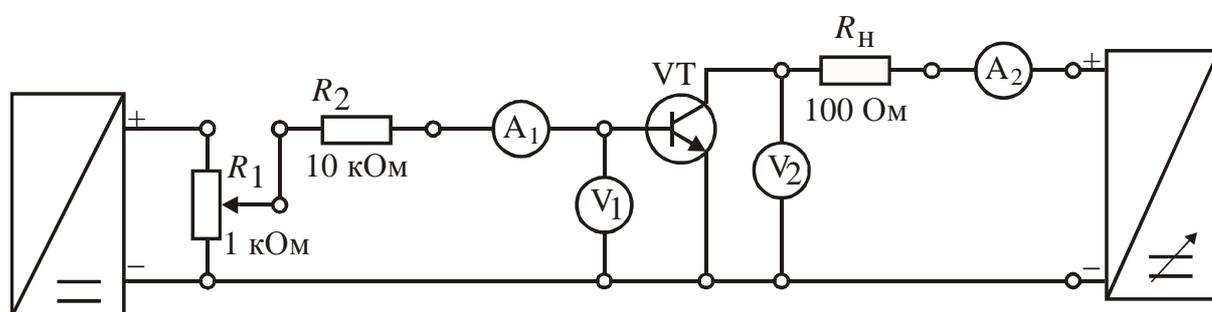


Рисунок 2.5

Для сборки схемы транзистор устанавливается на наборную панель. В качестве приборов A_1 и V_1 включаются мультиметры, а в качестве приборов A_2 и V_2 – стрелочные приборы. В качестве минусовой шины, к которой подключаются минусовые выводы источников питания и эмиттер транзистора, рекомендуется использовать нижние клеммы наборной панели, схемно соединенные между собой.

2. Снять статические входные характеристики транзистора. Статические входные характеристики снимаются для двух значений напряжения $U_{KЭ}$: 0 и по заданию преподавателя. Для проведения опыта необходимо установить требуемое напряжение и поддерживать его на всем протяжении измерений. Результаты измерений заносятся в таблицу 2.4. Должно быть снято не менее 10 точек.

Таблица 2.4

$U_{кэ} = 0$				
$U_{бэ}, В$				
$I_б, мА$	0,1	0,2	...	1,5
$U_{кэ} =$				
$U_{бэ}, В$				
$I_б, мА$	0,1	0,2	...	1,5

3. Снять статические выходные характеристики транзистора. Для этого, устанавливая перед каждым опытом требуемый ток базы, изменять (увеличивать от 0) напряжение $U_{кэ}$, записывая показания амперметра. Результаты заносить в таблицу 2.5. Так как входное сопротивление транзистора зависит от напряжения $U_{кэ}$, ток базы нужно поддерживать постоянным. Опыт снятия статической характеристики с постоянным током базы необходимо прекращать, когда рассеиваемая мощность транзистора $P_{расс}$ станет равной 140 мВт. Поэтому расчет $P_{расс}$ следует производить сразу, по ходу опыта (максимальная мощность транзистора является табличным параметром, если её превысить, то транзистор выйдет из строя).

Таблица 2.5

$I_б = 15 мкА$							
$U_{кэ}, В$							
$I_к, мА$							
$P_{расс}, мВт$							
$I_б = 30 мкА$							
$U_{кэ}, В$							
$I_к, мА$							
$P_{расс}, мВт$							
$I_б = 50 мкА (0,05 мА)$							
$U_{кэ}, В$							
$I_к, мА$							
$P_{расс}, мВт$							

4. Исследовать схему однокаскадного усиления гармонического сигнала. Для проведения этого опыта собрать схему в соответствии с рисунком 2.6. После включения схемы установить входную частоту 1 кГц.

Для того, чтобы использовать виртуальный осциллограф, необходимо после сборки схемы вызвать папку "Программное обеспечение" в главном меню, в ней – папку "Осциллографы", а после её раскрытия – программу "Двухканальный осциллограф". После запуска программы виртуального двухканального осциллографа его необходимо синхронизировать, также, вращая с помощью мыши виртуальную рукоятку синхронизации. Рекомендуется выбирать цифровой режим синхронизации. Необходимо по осциллографу оценить коэффициент усиления усилителя.

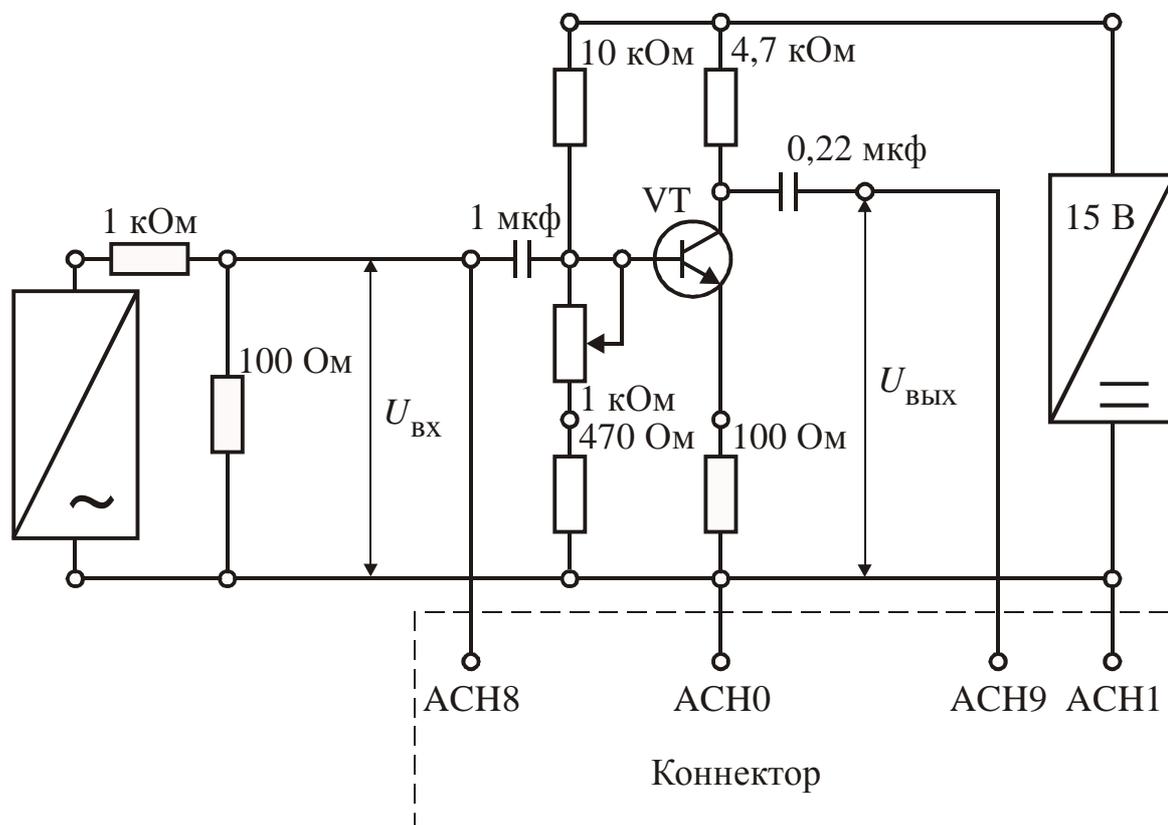


Рисунок 2.6

5. После проведения опыта необходимо построить статические выходные и входную характеристики на отдельных листах. На статические характеристики необходимо нанести ограничение по максимальной мощности. После этого необходимо рассчитать и построить

динамическую характеристику для значений E_k и R_n , заданных преподавателем.

2.6. Содержание отчета

1. Схемы опытов.
2. Таблицы измерений.
3. Пример расчета динамической характеристики и максимальной мощности.
4. Графики статических характеристик с нанесенными ограничениями.
5. Осциллограммы исследования усилителя гармонического сигнала.

Виртуальная практическая работа № 3

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ТОРМОЖЕНИЕ С ТЯГОВЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ НЕЗАВИСИМОГО И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Цель работы: изучение принципа действия и характеристик электрического торможения с электродвигателями последовательного и независимого возбуждения.

3.1. Принцип электрического торможения

Различают следующие виды электрического торможения, используемого на электроподвижном составе: реостатное (резисторное), рекуперативное и рекуперативно-реостатное.

При реостатном торможении энергия, выработанная тяговыми двигателями, преобразуется в тепловую в тормозных резисторах. При рекуперативном торможении энергия отдается в контактную сеть, где либо потребляется другим электроподвижным составом, либо через тяговую подстанцию передается во внешнюю энергосистему, либо гасится на балластных резисторах.

Электромагнитная мощность тягового электродвигателя определяется как

$$P_{\text{э}} = E \cdot I_{\text{я}}, \quad (3.1)$$

где E – ЭДС вращения;

$I_{\text{я}}$ – ток якоря.

ЭДС вращения зависит от параметров тягового электродвигателя:

$$E = \frac{p \cdot N \cdot \Phi \cdot n}{60a}, \quad (3.2)$$

где p – число пар полюсов;

N – число активных проводников обмотки якоря;

Φ – основной магнитный поток;

n – частота вращения;

a – число пар параллельных ветвей обмотки якоря.

В режиме электрического торможения электромагнитный тормозной момент тягового электродвигателя:

$$\dot{I}_{\text{я}} = \frac{60 \cdot \dot{D}_{\text{я}}}{2 \cdot \pi \cdot n} \quad (3.3)$$

Электромагнитный момент может быть выражен также через ток якоря и основной магнитный поток:

$$\dot{I}_{\text{я}} = \frac{N \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot a} \cdot \hat{O} \cdot I_{\text{я}} = \tilde{N} \hat{O} \cdot I_{\text{я}} \quad (3.4)$$

Тормозная сила на ободу колеса

$$B_{\hat{e}} = \frac{2 \cdot M_{\text{я}} \cdot \mu}{D_{\hat{e}} \cdot \eta_{\text{д.ä}} \cdot \eta_{\text{д.ї}}}, \quad (3.5)$$

где μ – передаточное число редуктора;

$D_{\text{к}}$ – диаметр колеса;

$\eta_{\text{т.д}}$ – КПД тягового двигателя;

$\eta_{\text{т.п}}$ – КПД тяговой передачи.

Из выражений (3.4) и (3.5) можно записать:

$$B_{\hat{e}} = \frac{N \cdot p \cdot \mu}{\pi \cdot D_{\hat{e}} \cdot a \cdot \eta_{\text{д.ä}} \cdot \eta_{\text{д.ї}}} \cdot \hat{O} \cdot I_{\text{я}}. \quad (3.6)$$

Следовательно, для заданного типа тягового электродвигателя и тягового привода тормозная сила зависит от тока якорной обмотки и магнитного потока. Соответственно закон регулирования тормозной силы определяется характером изменения указанных величин.

3.2. Принципиальные схемы электрического торможения

При реостатном торможении могут использоваться различные схемы соединения тяговых двигателей с независимым возбуждением и самовозбуждением.

На вагонах метрополитена применяется перекрестно-петлевая схема включения обмоток якорей и возбуждения (рисунок 3.1), которая позволяет производить выравнивание токов в параллельных ветвях.

На пригородных электропоездах типа ЭР2Т, ЭТ2 и их аналогах в зоне низких скоростей движения используется схема реостатного торможения с последовательным соединением тяговых двигателей и самовозбуждением (рисунок 3.2).

Достоинством данной схемы является то, что нет необходимости производить выравнивание тока по параллельным ветвям – по всем двигателям протекает одинаковый ток. Основной недостаток – низкая противоюзловая устойчивость.

Для того чтобы перевести тяговые двигатели последовательного возбуждения в режим независимого, необходимо их обмотки возбуждения подключить к отдельному источнику питания (рисунок 3.3).

Специфичность данной схемы по сравнению со схемой обычных генераторов независимого возбуждения состоит в том, что обмотка возбуждения тягового двигателя последовательного возбуждения имеет малое число витков и требует значительной величины тока, сравнимого по величине с током якоря. Поэтому для питания обмоток ТЭД в режиме независимого возбуждения используется специальный источник питания – возбудитель. Возбудитель может быть электромашинным преобразователем (мотор-генератором): ВЛ10, ВЛ11, ЭР22, ЭР2Т; полупроводниковым импульсным преобразователем: ЧС2Т, ЧС200, ЧС6, ЧС7.

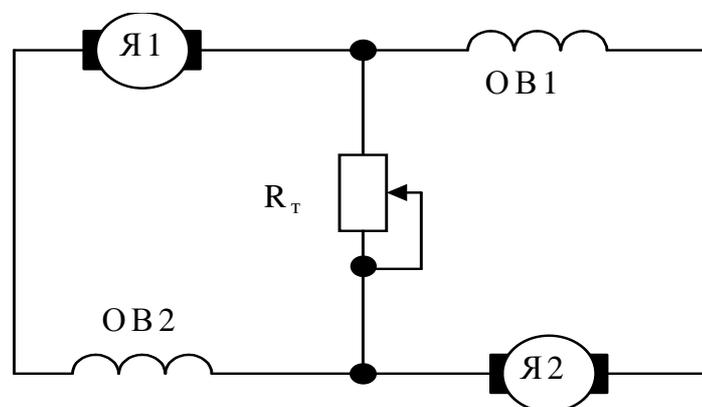


Рисунок 3.1

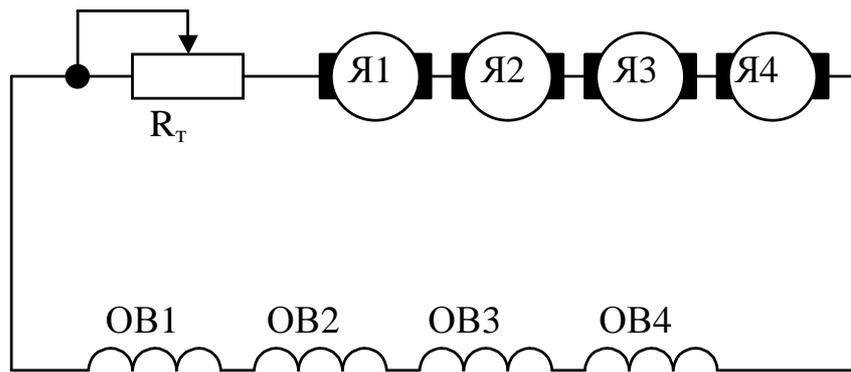


Рисунок 3.2

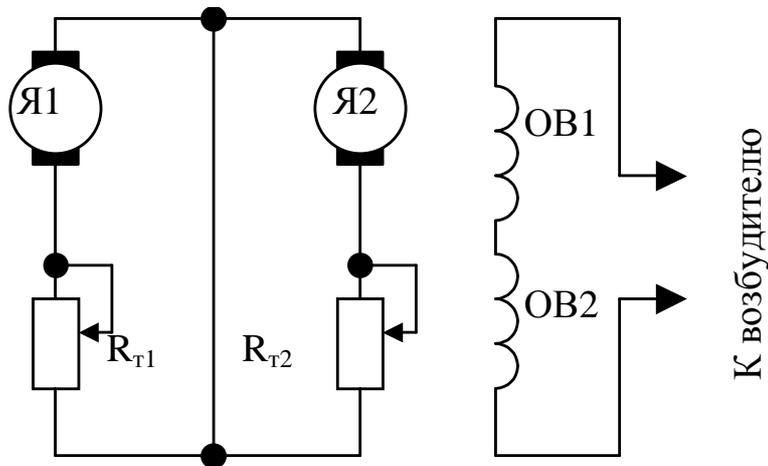


Рисунок 3.3

Преобразователь управляется выпрямителем: ВЛ80С, ВЛ80Р, ВЛ85, ВЛ65. ТЭД городского наземного электротранспорта (троллейбусов и трамваев) имеют дополнительную высокоомную обмотку главных полюсов, подключаемую непосредственно к контактной сети.

Достоинством схемы электрического торможения с независимым возбуждением является возможность её работы в режиме как реостатного, так и рекуперативного торможения (рисунок 3.4). При независимом возбуждении в режиме электрического торможения легче обеспечить устойчивость работы схемы и регулирование тормозной силы за счет изменения тока возбуждения. Недостатком схем с независимым возбуждением являются более жесткие характеристики по сравнению с последовательным возбуждением, а следовательно, больший разброс токов по параллельным ветвям.

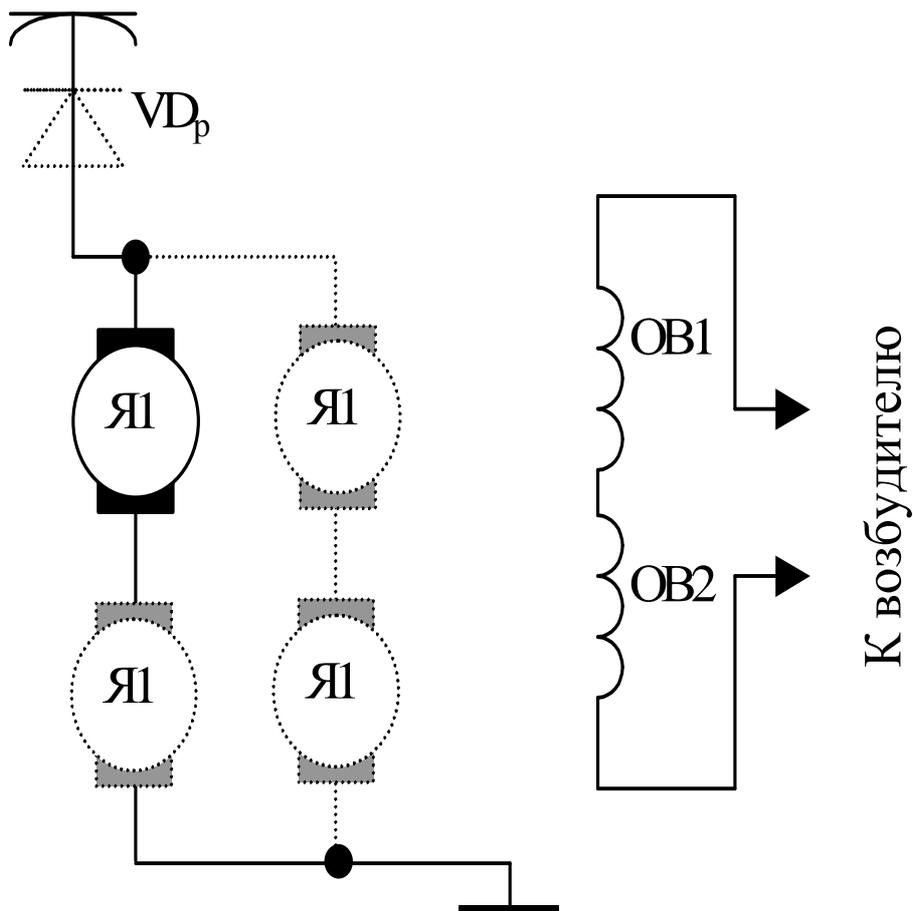


Рисунок 3.4

Следует отметить, что рекуперация возможна только в случае, когда ЭДС тяговых электродвигателей больше напряжения контактной сети. Если ЭДС ТЭД меньше напряжения контактной сети, то они перейдут в двигательный режим с независимым возбуждением, поэтому на ЭПС устанавливается диод рекуперации (VD_p на рисунок 3.4), либо реле обратного (моторного) тока.

Тормозные характеристики реостатного торможения тяговых двигателей с последовательным возбуждением приведены на рисунке 3.5,а, с независимым возбуждением – на рисунке 3.5,б.

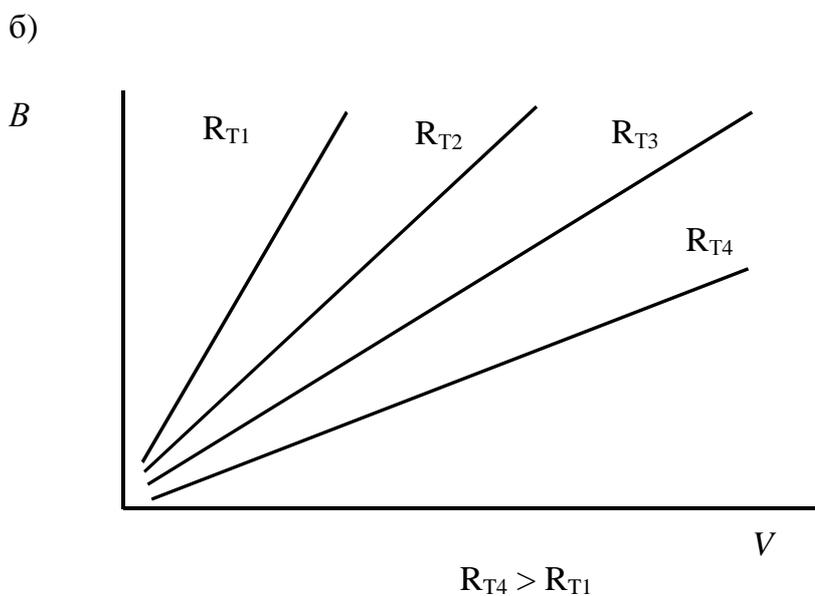
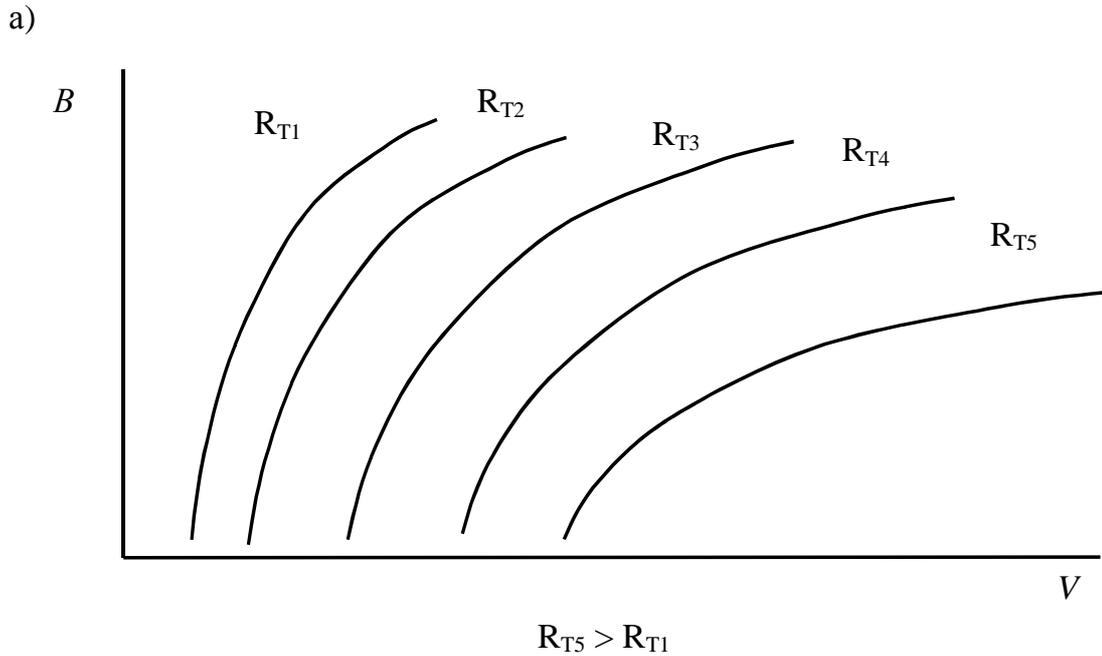


Рисунок 3.5.

3.3. Описание виртуальной лабораторной установки

Установка для исследования тормозных характеристик электродвигателей последовательного и независимого возбуждения состоит из четырех соединенных друг с другом с помощью механической передачи электродвигателей (рисунок 3.6), два из которых (1 и 2) имеют последовательное возбуждение, а два других (3 и 4) – независимое.

Для управления электродвигателями в лабораторной работе используется переконструированный контроллер машиниста электровоза ВЛ10.

Верхней рукояткой контроллера управляются двигатели последовательного возбуждения, нижней – независимого. При передвижении рукоятки на себя соответствующая пара двигателей переходит в режим тяги (позиции обозначены арабскими цифрами), а при передвижении от себя – в режим торможения (позиции обозначены римскими цифрами). Поэтому есть возможность исследовать тормозные характеристики, приводя во вращение валы якорей одной пары двигателей от другой (при этом одна из рукояток должна находиться в режиме тяги, вторая – в режиме торможения).

Каждой позиции контроллера соответствует определенное значение сопротивления в цепи якоря, причем с увеличением номера позиции величина сопротивления уменьшается. Позиции, обозначенные знаком "X", являются переходными и при исследовании тормозных характеристик не учитываются. Верхняя рукоятка контроллера имеет восемь позиций для регулирования частоты вращения двигателей последовательного возбуждения в тяговом режиме (1...5 – последовательное соединение, 6...8 – параллельное) и шесть позиций для регулирования величины тормозного резистора в режиме реостатного торможения. Нижняя рукоятка контроллера имеет четыре позиции для регулирования частоты вращения двигателей независимого возбуждения в тяговом режиме и четыре – для регулирования величины тормозного резистора.

Ток возбуждения двигателей 3–4 регулируется с помощью реостата R_b , расположенного на виртуальном лабораторном столе.

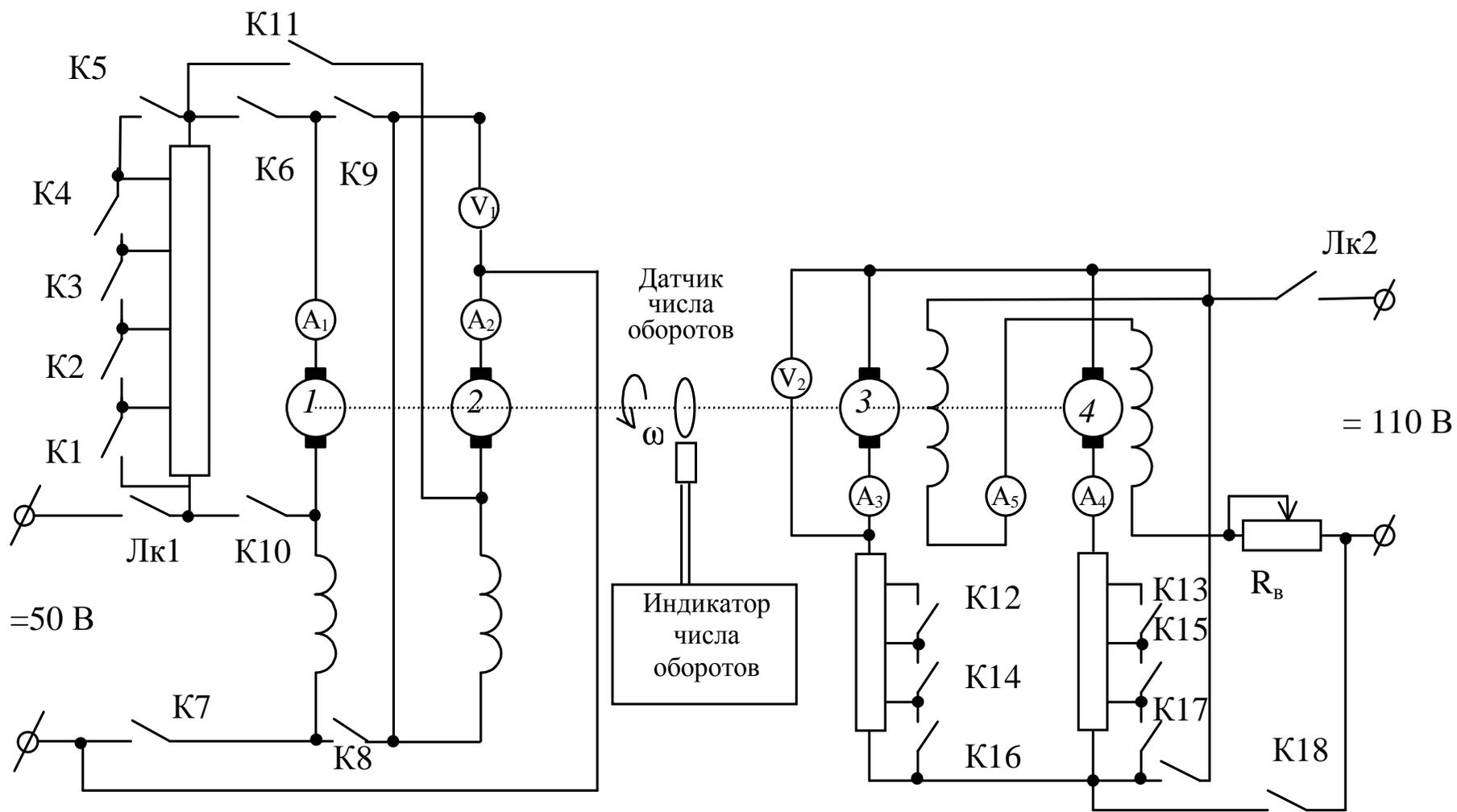


Рисунок 3.6.

3.4. Программа работы

1. Исследовать тормозные характеристики реостатного торможения с двигателями последовательного возбуждения.

1.1. Обе рукоятки контроллера установить в нулевое положение.

1.2. Включить пакетные выключатели ВУ1, ВУ2 и электронный тахометр. О наличии напряжения свидетельствует загорание контрольных ламп.

1.3. Установить верхнюю рукоятку контроллера во второе положение тормозного режима.

1.4. Установить нижнюю рукоятку контроллера в первое положение тягового режима, после чего установить ток независимых обмоток возбуждения $I_b = 2$ А. Записать в таблицу 3.1 частоту вращения и величины токов двигателей 1 и 2.

1.5. Устанавливая нижнюю рукоятку контроллера последовательно во все положения тягового режима, снять тормозную характеристику двигателей 1 и 2. На позиции 4 нижней рукоятки снять дополнительно две точки, добиваясь увеличения частоты вращения ослаблением возбуждения двигателей 3 и 4.

1.6. Повторить опыт для IV и VI (или по заданию преподавателя) положений верхней рукоятки контроллера. Результаты занести в таблицу 3.1.

2. Исследовать характеристики реостатного торможения двигателей с независимым возбуждением.

2.1. Установить обе рукоятки контроллера машиниста в нулевое положение.

2.2. Установить нижнюю рукоятку контроллера во второе положение тормозного режима. Установить ток независимых обмоток возбуждения $I_b = 2$ А.

2.3. Устанавливая верхнюю рукоятку контроллера последовательно во все ходовые положения тягового режима, снять тормозную характеристику двигателей 3 и 4. Результаты занести в таблицу 3.2.

2.4. Повторить опыт для III и IV позиций нижней рукоятки контроллера машиниста.

2.5. Оценить влияние тока возбуждения на тормозные характеристики. Для этого установить нижнюю рукоятку контроллера в положение IV и установить ток независимых обмоток возбуждения, равный 1,5 А (или заданный преподавателем). Результаты занести в таблицу 3.2.

Таблица 3.1

Тяговый режим (нижняя рукоятка)			Тормозной режим (верхняя рукоятка)						
			Опыт				Расчет		
№ п/п	Позиция РКМ	I I _в , А	Позиция РКМ	n, об/мин	П ₁ , А	П ₂ , А	П _{ср} , А	СФ, $\frac{В \cdot ми}{н}$ об	ММ э Н
1	1	2	II						
	2	2							
	3	2							
	4	2							
	4	1,5							
	4	1							
2	1	2	IV						
	2	2							
	3	2							
	4	2							
	4	1,5							
	4	1							
3	1	2	VI или по заданию препо- давате- ля						
	2	2							
	3	2							
	4	2							
	4	1,5							
	4	1							

Таблица 3.2

Тяговый режим (верхняя рукоятка)		Тормозной режим (нижняя рукоятка)							
		Опыт						Расчет	
№ п/п	Позиция РКМ	Позиция РКМ	п, об/мин	П ₃ , А	П ₄ , А	П _{ср} , А	П _в , А	СФ, $\frac{В \cdot \text{мин}}{\text{об}}$	ММ _э , Н
1	1	II					2		
	2								
	3								
	4								
	5								
	6								
	7								
	8								
2	1	III					2		
	2								
	3								
	4								
	5								
	6								
	7								
	8								
3	1	IV					2		
	2								
	3								
	4								
	5								
	6								
	7								
	8								
4	1	IV					1,5 или по заданию пре- подавателя		
	2								
	3								
	4								
	5								
	6								
	7								
	8								

3. Исследовать вход в рекуперацию двигателей с независимым возбуждением.

Для этого:

3.1. Установить обе рукоятки контроллера в нулевое положение.

3.2. Установить ток независимых обмоток возбуждения, равный 2 А. Пустить установку с помощью двигателей независимого возбуждения. Нижнюю рукоятку контроллера после окончания пуска установить в положение 4. Занести в таблицу 3.3 токи двигателей 3–4 и частоту вращения.

3.3. Оставив нижнюю рукоятку контроллера в положении 4, перевести в режим тяги двигателя последовательного возбуждения, поставив верхнюю рукоятку на первую позицию режима тяги.

3.4. Последовательно увеличивать позицию верхней рукоятки контроллера, фиксируя при этом токи двигателей 3–4. По мере роста частоты вращения двигателя независимого возбуждения сначала попадут в режим идеального холостого хода (ИХХ – ЭДС вращения и напряжение сети одинаковы, а токи якорей равны нулю). Занести эту позицию и соответствующее ей значение частоты вращения в таблицу 3.3.

При дальнейшем увеличении частоты вращения двигателя независимого возбуждения перейдут в режим рекуперации. При этом направление токов якорей изменится на противоположное. Вырабатываемая двигателями независимого возбуждения энергия будет потребляться двигателями последовательного возбуждения, работающими в тяговом режиме.

3.5. Занести таблицу 3.3 токи двигателей 3–4 и частоту вращения для всех позиций верхней рукоятки контроллера. При изменении направления тока значения заносить со знаком "минус".

Таблица 3.3

Последовательное возбуждение	Независимое возбуждение							
	Опыт						Расчет	
Позиция РКМ		n, об/мин	I _з , А	I ₄ , А	I _{ср} , А	I _в , А	СФ, $\frac{В \cdot \text{мин}}{\text{об}}$	ММ э Н
Верхняя рукоятка	Нижняя рукоятка							
0	4					2		
1								
...								
Позиция ИХХ			0	0	0			
...								
6								
7								
8								

3.5. Расчетная часть

Произвести расчет электромагнитного тормозного (в опыте с рекуперацией – и вращающего) момента электродвигателей по формуле:

$$M_3 = 0,974 \cdot \text{СФ} \cdot I_{\text{ср}} \quad (3.7),$$

где $I_{\text{ср}}$ – средний ток якорей двигателей, для которых производится расчет.

Величина СФ определяется по кривой $\text{СФ} = f(I_{\text{в}})$ (приложение). При расчетах необходимо помнить, что для двигателя последовательного возбуждения $I_{\text{я}} = I_{\text{в}}$.

3.6. Содержание отчета

1. Принципиальная схема виртуальной лабораторной установки.
2. Таблицы опытных и расчетных величин.

3. Зависимости $I_{я} = f(n)$ и $M_{э} = f(n)$ для реостатного торможения двигателей последовательного и независимого возбуждения, построенные на миллиметровой бумаге.

4. Зависимости $I_{я} = f(n)$ и $M_{э} = f(n)$ для режима входа в рекуперацию двигателей независимого возбуждения, построенные на миллиметровой бумаге.

3.7. Контрольные вопросы

1. На каких видах подвижного состава применяется реостатное и рекуперативное торможение?

2. Какой характер носит изменение тормозной силы в зависимости от частоты вращения двигателей последовательного и независимого возбуждения?

3. Напишите выражения для тормозного электромагнитного момента и тормозной силы.

4. При каком типе возбуждения двигателей возможна реализация рекуперативного торможения?

5. Какие схемы соединения двигателей используются на подвижном составе при электрическом торможении? Каковы их преимущества и недостатки?

Виртуальная практическая работа № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОВОЗА ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ

4.1. Особенности работы электровозов двойного питания

Электровозы двойного питания рассчитаны для питания электрической энергией двух различных систем тока. Электровозы ВЛ82 и ВЛ82^М предназначены для работы при напряжении контактной сети 3 кВ постоянного тока и 25 кВ однофазного переменного тока частотой 50 Гц, имеют тяговые электродвигатели постоянного тока.

Принципиальная схема силовой цепи электровоза при работе на участке постоянного тока показана на рисунке 4.1,а. Контактная сеть получает питание от выпрямительных агрегатов на тяговой подстанции. Тяговая подстанция рассчитана на одновременное питание не-

скольких электровозов. Установленная мощность преобразовательных агрегатов тяговых подстанций в несколько раз превышает мощность тяговых двигателей электровоза, поэтому напряжение в контактной сети можно принять постоянным, независящим от тока нагрузки двигателей электровоза. При работе электровоза на участке постоянного тока напряжение подается на цепи тяговых двигателей непосредственно от токоприемника (Т). В зависимости от напряжения в контактной сети двухпозиционный переключатель рода тока (ПРТ) устанавливается в одно из двух положений. На участке переменного тока от контактной сети через контакты ПРТ получает питание трансформатор. Трансформатор с выпрямительной установкой обеспечивает питание тяговых двигателей на участках переменного тока.

Принципиальная схема силовой цепи одной четырехосной секции электровоза, при работе на участке переменного тока, показана на рисунке 4.1,б.

Напряжение контактной сети подается на тяговый электродвигатель через однофазный трансформатор и выпрямитель. Напряжение на тяговом электродвигателе имеет форму выпрямленной синусоиды. Разложение этой кривой в ряд Фурье дает сумму постоянной составляющей U_d , равной среднему напряжению за полупериод, и высших гармоник напряжения. Поэтому ток двигателя будет также представлять собой сумму постоянной составляющей и высших гармоник тока.

Вращающий момент и скорость вращения тягового электродвигателя определяется средними значениями выпрямленного напряжения и тока. Высшие гармоники создают дополнительные потери и поэтому для их ограничения в цепи двигателя предусмотрен сглаживающий реактор. Индуктивность сглаживающего реактора выбирают так, чтобы амплитуда пульсации тока не превосходила 20-25% от его среднего значения. При этом влияние пульсаций тока на величину падения напряжения на активном сопротивлении якоря незначительно (3-4 %) и в условиях лабораторной работы им можно пренебречь.

Регулирование скорости в процессе пуска и разгона электровоза как на участках переменного, так и постоянного токов производится переключением ступеней реостатов и изменением группировки тяговых электродвигателей.

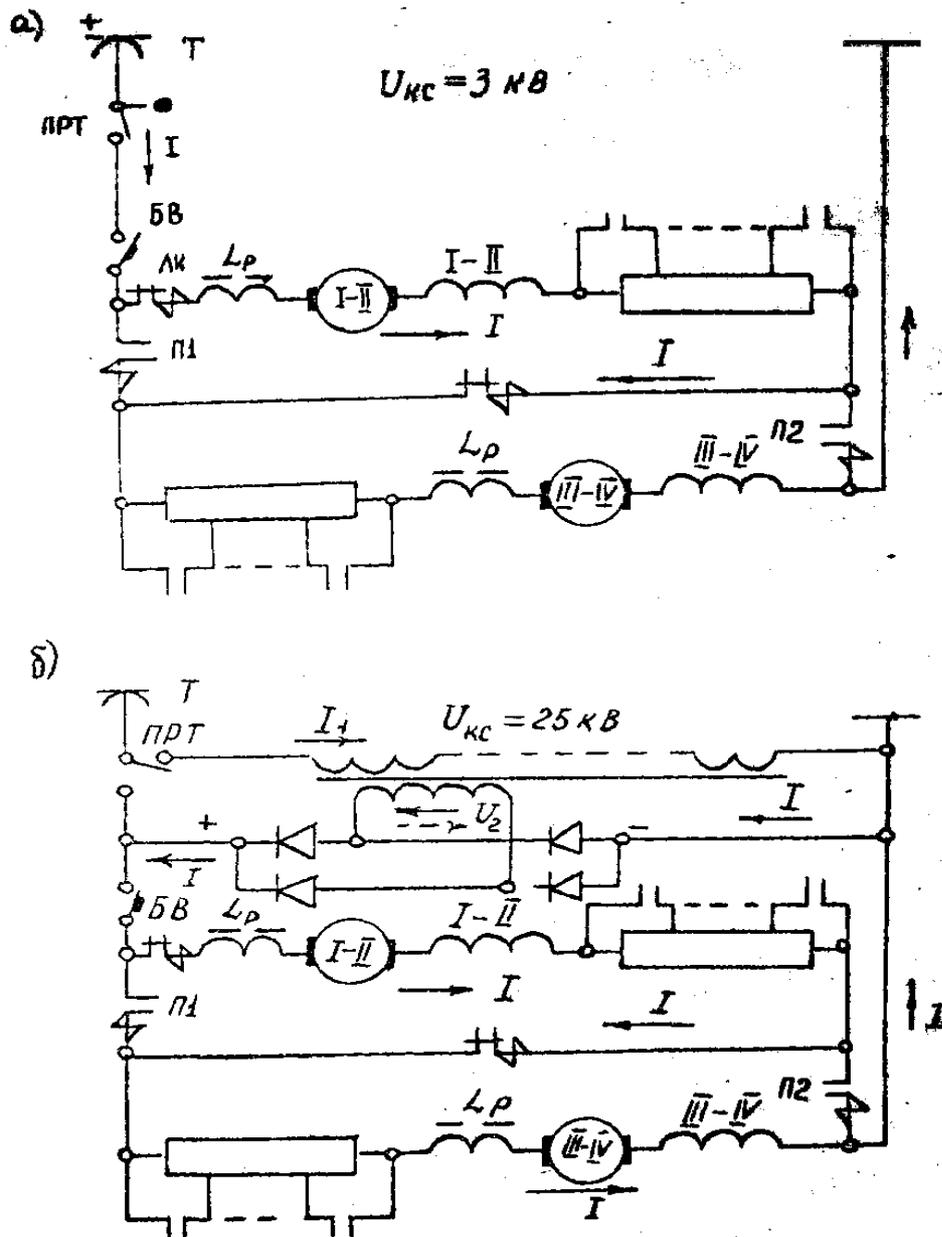


Рисунок 4.1

4.2. Особенности работы тяговых двигателей при питании от выпрямительной установки

На электровозе двойного питания, кроме пускорегулирующей аппаратуры, предназначенной для работы на участках постоянного тока, устанавливается тяговый трансформатор с полупроводниковыми диодами. На восьмиосном электровозе ВЛ82 установлено два тяговых трансформатора. К вторичной обмотке трансформатора подключена

мостовая схема выпрямления. На рисунке 4.2,а показана принципиальная схема питания от выпрямительной установки одного электродвигателя лабораторной модели.

Диоды 1-3 работают в первый полупериод, а 2-4 – во второй. Выпрямленное напряжение не остается величиной постоянной, а изменяется по синусоидальному закону, в пределах полуволн положительного знака. Среднее выпрямленное напряжение U_d , подводимое к электродвигателю, не остается постоянным и зависит от потребляемого тока двигателем I .

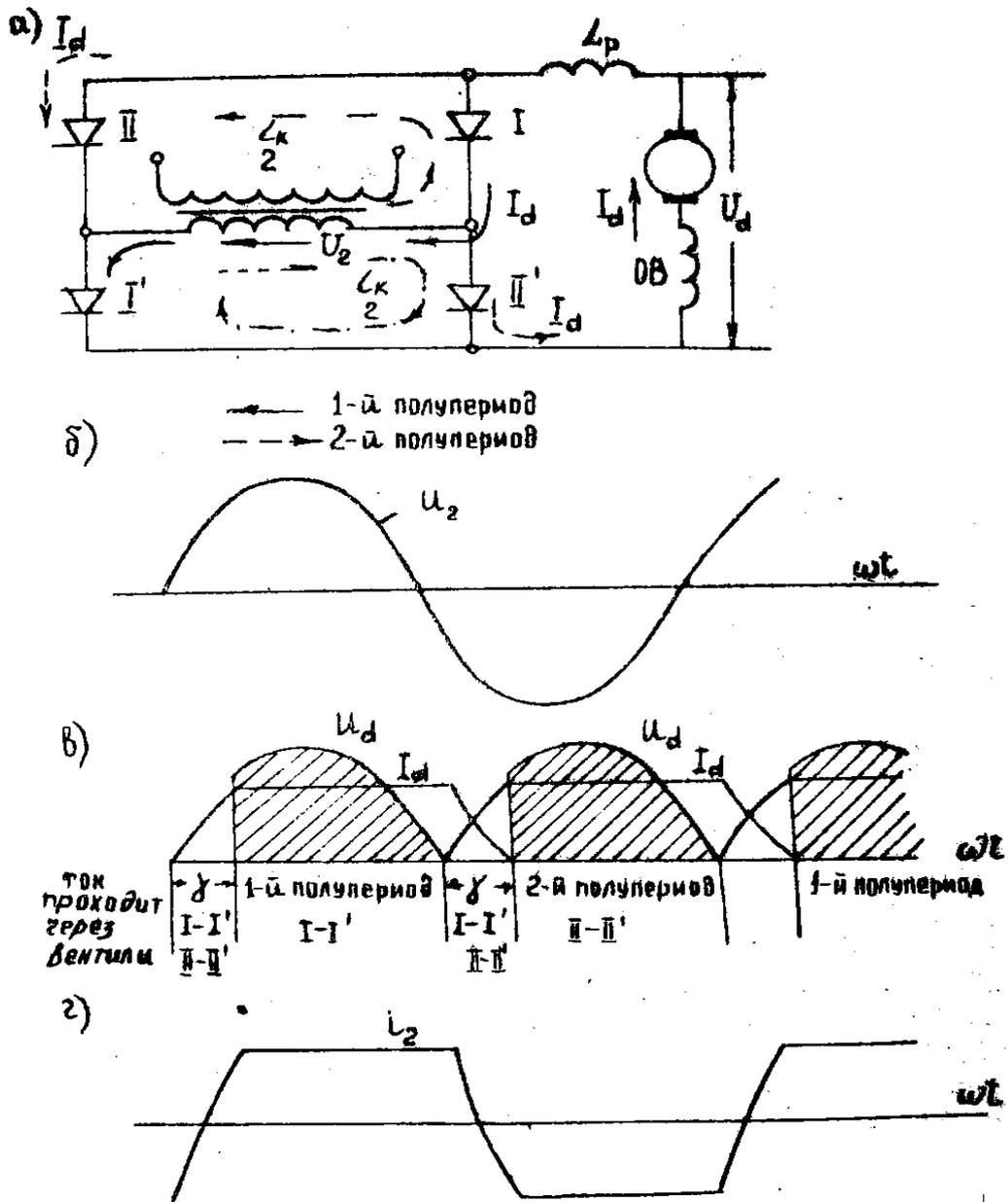


Рисунок 4.2

Скорость движения локомотива с двигателем постоянного тока вычисляется по формуле, км/ч,

$$v = \frac{U_d - IR}{C\Phi} \quad (4.1),$$

где U_d – напряжение на двигателе, В;

I – ток двигателя, А;

R – сопротивление обмоток двигателя, Ом;

Φ – магнитный поток, Вб;

C – постоянная двигателя и передачи.

Из уравнения (4.1) следует, что скорость зависит от тока I магнитного потока Φ и величины выпрямленного напряжения U_d . Поэтому при расчете скоростных характеристик двигателей, работающих от выпрямителя, необходимо учитывать изменение $U_d = f(I_d)$. Зависимость выпрямленного напряжения U_d от средней величины выпрямленного тока I_d называется внешней характеристикой выпрямителя. Для схемы выпрямления с одним подключенным электродвигателем ток $I_d = I$.

Обмотки трансформатора и реакторов имеют индуктивное и активное сопротивления, в которых возникают потери напряжения, пропорциональные выпрямленному току.

В обмотках трансформатора напряжение и ток изменяются по величине и направлению с частотой питающей сети ($f = 50$ Гц). Процесс изменения тока в обмотках трансформатора сопровождается коммутацией тока в плечах моста. В цепях с индуктивностью ток не может изменяться мгновенно, поэтому имеет место переходный процесс, который называется коммутационным, а длительность его – интервалом коммутации γ или углом коммутации. В период коммутации ток проходит через все диоды плеч моста, в результате чего вторичная обмотка трансформатора (рисунок 4.2) оказывается замкнутой накоротко. Выпрямленное напряжение в этот период равно нулю.

Таким образом, коммутация диодов приводит к уменьшению средневых выпрямленного напряжения на величину $\Delta U_{d\gamma}$, называемую коммутационными потерями напряжения. Суммарные потери напряжения в преобразователе ΔU_{np} складываются из потерь напряжения в период коммутации ΔU_d , потерь в активном сопротивлении цепей обмоток переменного ΔU_a и постоянного ΔU_d токов:

$$\Delta U_{np} = \Delta U_{d\gamma} + \Delta U_a + \Delta U_d \quad (4.2).$$

Указанные потери напряжения в преобразователе зависят от величины выпрямленного тока. В реальных условиях $\Delta U_a + \Delta U_d \ll \Delta U_{d\gamma}$, поэтому в дальнейших расчетах пренебрегаем величинами активных сопротивлений обмоток трансформатора, а также их потерями напряжений (ΔU_a и $\Delta U_d \approx 0$).

Выпрямленное напряжение

$$\Delta U_d = \Delta U_{d0} - \Delta U_{np} - \Delta U_b \quad (4.3),$$

где ΔU_{d0} – выпрямленное напряжение холостого хода, измеряется при $I_d = 0$;

ΔU_b – падение напряжения в диодах ($\Delta U_b \approx 1,5$ В).

При принятом допущении $\Delta U_{np} \approx \Delta U_{d\gamma}$ величина напряжения на двигателе U_d в основном зависит от выпрямленного напряжения холостого хода и потерь напряжения, связанных с коммутацией диодов.

4.3. Коммутация диодов и ее влияние на выпрямленное напряжение

При анализе процесса коммутации диодов принимается полностью сглаженный выпрямленный ток (без пульсаций), а диоды идеальны, т.е. в проводящем направлении сопротивление равно нулю, а в обратном – бесконечности.

До начала коммутации ток I_d проходил через диоды 1, 3 (рисунок 4.2,а). Условно отсчет времени ведем с момента начала коммутации. Под действием ЭДС второго полупериода откроются диоды 2 и 4, и возникнет ток короткого замыкания (коммутации) i_k , цепь которого указана на рисунке 4.2,а.

Коммутация закончится, когда $i_k = 2I_d$. Ток диодов 1, 3 в конце коммутации становится равным нулю, и они закрываются. Одновременно ток в диодах 2, 4 к моменту $\omega t = \gamma$ достигнет значения I_d .

В период коммутации ток во вторичной обмотке трансформатора

$$i_2 = -I_d + i_k \quad (4.4).$$

Осциллограмма $i_2 = f(\omega t)$ показана на рисунке 4.2,г.

Во время коммутационного процесса (при $r_a = 0$) ЭДС трансформатора уравнивается индуктированной ЭДС самоиндукции цепи трансформатора с индуктивностью L_a .

$$U_{2m} \sin \omega t = L_a \frac{di_k}{dt} \quad (4.5).$$

Откуда

$$di_k = \frac{1}{\omega L_a} U_{2m} \sin \omega t d(\omega t) \quad (4.6).$$

Проинтегрировав уравнение (4.5), находим закон изменения тока короткого замыкания

$$i_k = \frac{U_{2m}}{X_a} (1 - \cos \omega t) \quad (4.7),$$

где $X_a = \omega L$ – индуктивное сопротивление цепи переменного тока;
 U_{2m} – амплитудное значение напряжения вторичной обмотки трансформатора.

Подставляя в уравнение (4.4) i_k из (4.7), получим ток в обмотке трансформатора во время коммутации диодов

$$i_2 = -I_d + \frac{U_{2m}}{X_a} (1 - \cos \omega t) \quad (4.8).$$

Коммутация заканчивается, когда $i_2 = I_d$. Продолжительность коммутации γ определяется из уравнения (4.7) при $i_k = 2I_d$ и $\cos \omega t = \cos \gamma$:

$$i_k = 2I_d = \frac{U_{2m}}{X_a} (1 - \cos \gamma), \quad (4.9),$$

откуда

$$\cos \gamma = 1 - \frac{2X_a}{U_{2m}} I_d. \quad (4.10).$$

В период коммутации величина выпрямленного напряжения уменьшается на величину $\Delta U_{d\gamma}$:

$$\Delta U_{d\gamma} = \frac{1}{\pi} \int_0^\gamma U_{2m} \sin \omega t d(\omega t) = \frac{U_{2m}}{\pi} (1 - \cos \gamma). \quad (4.11).$$

Подставив в уравнение (4.11) значение $\cos \gamma$ из (4.10), получим

$$\Delta U_{d\gamma} = X_a I_d \quad (4.12).$$

Потери напряжения от коммутации диодов пропорциональны индуктивному сопротивлению трансформатора и величине выпрямленного тока. Выпрямленное напряжение холостого хода U_{d0} определяется при токе:

$$I_d = 0. \text{ (Цепь питания двигателя разомкнута).}$$

$$\Delta U_{do} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_{2m} \sin \omega t d(\omega t) = \frac{U_{2m}}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi} = 0,9U_2 \quad (4.13),$$

где U_2 – эффективное значение напряжения вторичной обмотки трансформатора.

С учетом ранее принятых допущений (r_a, r_d и $\Delta U_b = 0$) среднее выпрямленное напряжение

$$U_d = U_{do} - \Delta U_{dy} = 0,9U_2 - \frac{2}{\pi} X_a I_d \quad (4.14).$$

В реальных условиях выпрямленный ток не полностью сглажен, т.е. пульсирует. Пульсации тока оказывают влияние на коммутационные процессы и приводят к некоторому увеличению угла коммутации γ и, соответственно, ΔU_{dy} . Учет увеличения потерь напряжения от коммутации диодов достигается введением в уравнение (4.13) некоторого коэффициента λ , зависящего от величины пульсации тока. Принимается $\lambda = 1,1$. Тогда

$$\Delta U_{dy} = \lambda \frac{2}{\pi} X_a I_d = 0,7X_a I_d \quad (4.15).$$

В лабораторной работе величину потерь напряжения в диодах можно не учитывать из-за ее малости ($\sim 1,5$ В).

С учетом изложенного выше, внешняя характеристика выпрямителя рассчитывается по следующему выражению:

$$U_d = U_{do} - 0,7X_a I_d \quad (4.16).$$

Данные измерения и расчета сводятся в таблицу.

Величина X_a зависит от числа витков вторичной обмотки трансформатора. Кроме того, в X_a входит дополнительно включенное в цепь вторичной обмотки индуктивное сопротивление реактора.

На рисунке 4.3,а представлены внешние характеристики выпрямителя с различными индуктивными сопротивлениями трансформатора X_{a1} и X_{a2} . С увеличением индуктивного сопротивления ($X_{a1} > X_{a2}$) возрастают потери напряжения от коммутации.

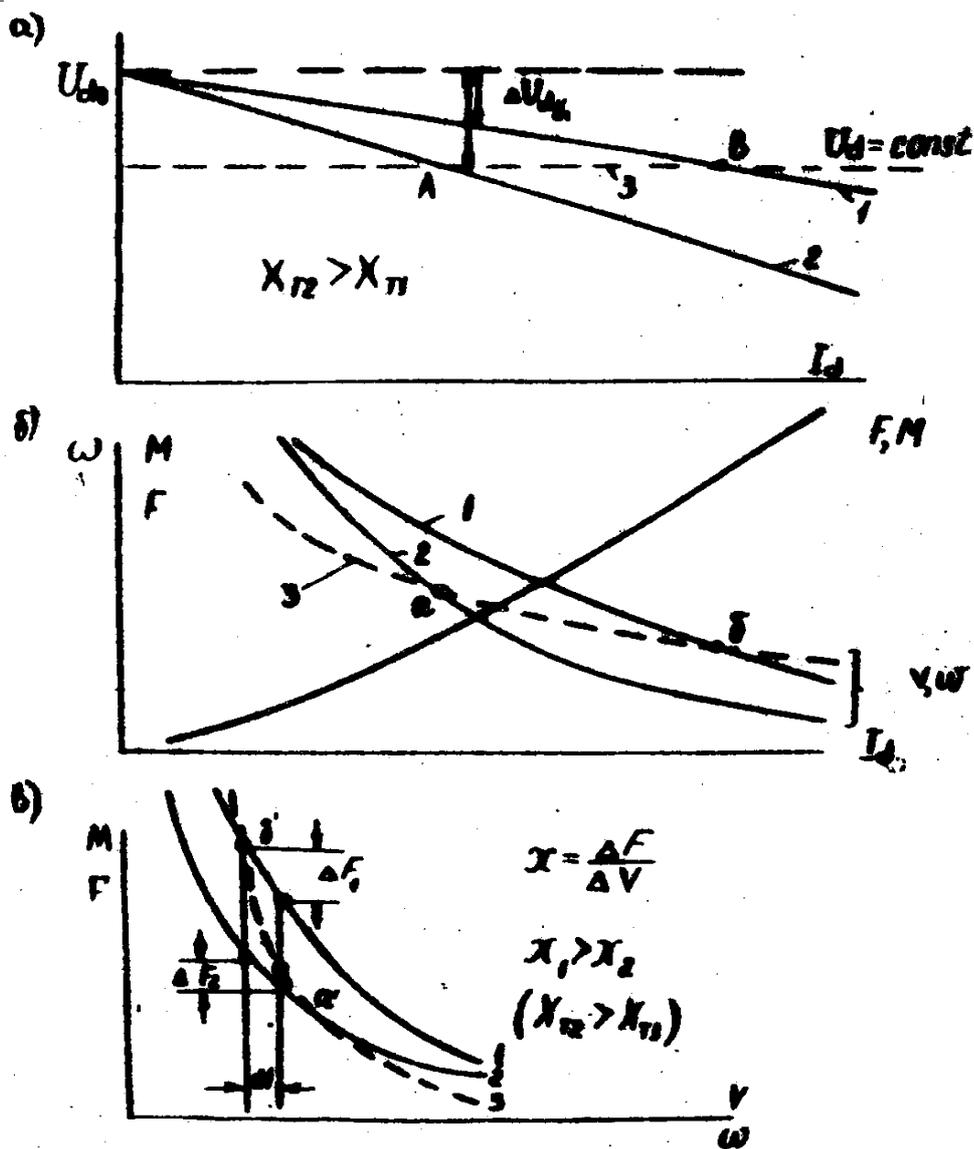


Рисунок 4.3.

Указанным внешним характеристикам выпрямителя на рисунке 4.3, б, в соответствии соответствуют характеристики скорости $V = f(I_d)$, силы тяги двигателя $F = f(I_d)$ и тяговые характеристики $F = f(V)$.

Для сравнения на этом же рисунке показаны соответствующие характеристики при условии работы электровоза на участке постоянного тока с неизменным напряжением на двигателе (кривая 3).

4.4. Определение жесткости тяговых характеристик двигателя

Использование силы сцепления колес с рельсами в значительной степени зависит от жесткости характеристики двигателя. Степень из-

менения силы тяги с изменением скорости количественно оценивается коэффициентом жесткости

$$\chi = -\frac{dF}{dV} \quad (4.17).$$

При одинаковом изменении скорости сила тяги двигателя с жесткой характеристикой изменяется значительно больше, чем у двигателя с мягкой характеристикой. Поэтому при срыве сцепления сила тяги двигателя с жесткой характеристикой снижается гораздо интенсивнее, чем двигателя с мягкой характеристикой, следовательно, скорее приходит в равновесие с силой сцепления. Благодаря этому у двигателей с жесткой характеристикой быстрее восстанавливается сцепление.

Коэффициент жесткости χ для каждой тяговой характеристики не остается постоянным во всем ее диапазоне, а в общем случае изменяет свою величину в зависимости от скорости V , а следовательно, и от силы тяги.

Для сравнительной оценки влияния параметров схемы выпрямления на жесткость тяговых характеристик пользуются коэффициентом относительной жесткости

$$\chi = \frac{\chi}{F/V} = -\frac{V}{F} \frac{dF}{dV} \quad (4.18).$$

Для определения коэффициента относительной жесткости могут пользоваться характеристики вращающего момента двигателя в зависимости от его угловой частоты вращения $M = f(\omega)$.

Можно показать, что коэффициент относительной жесткости

$$\chi = -\frac{\omega}{M} \frac{dM}{d\omega} \quad (4.19).$$

Для этого достаточно в уравнение (4.18) подставить значение силы тяги, выраженной через вращающий момент и скорость движения в зависимости от

$$F = \frac{2M}{D_k} \mu k_3, \quad (dF = \frac{2dM}{D_k} \mu k_3) \quad (4.20);$$

$$V = \frac{\omega D_k}{2\mu}, \quad (dV = \frac{d\omega D_k}{2\mu}) \quad (4.21),$$

где μ – передаточное число редуктора;

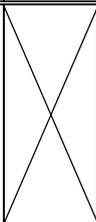
k_3 – КПД зубчатой передачи;

D_k – диаметр колеса.

4.5.2. Исследовать характеристики ТЭД при питании от сети переменного тока при нормальном напряжении

- переключатель "31/35" установить в положение "1";
- по вольтметру "V" измерить напряжение холостого хода U_{d0} ;
- результат занести в таблицу;
- включить выключатель "ПУСК";
- выждать 15-20 с;
- снять характеристику ТЭД, изменяя ток I_d по амперметру "I_я" в интервале 5...14 А с помощью реостата R_1 . Результаты занести в таблицу. Величину напряжения U_d измерять по вольтметру "V", число оборотов ТЭД – по прибору " ω ", вращающий момент ТЭД – по шкале на корпусе маховичной установки;
- снять осциллограммы напряжения U_d с контрольных клемм 4-5 для минимального и максимального тока I_d . С помощью осциллографа измерить угол коммутации γ и амплитуду напряжения U_{2m} для тех же токов. Результаты занести в таблицу;
- выключить выключатель "ПУСК";
- вернуть движок реостата " R_1 " в крайнее положение "ОТ СЕБЯ".

Таблица 4.1

Участок	Позиция	Измерения							Расчет			
		U_{d0} , В	I_d , А	U_d , В	М, Нм	ω , 1/с	γ , град	U_{2m} , В	$\Delta U_{d\gamma}$, В	U_d , В	γ , град	X_a , Ом
Переменного тока	1		5 ... 14									0,37
	2		5 ... 14									0,4
	2+L _a		4,5 ... 5,5									4,83
Постоянного тока	С		5 ... 15									

4.5.3. Исследовать характеристики ТЭД при питании от сети переменного тока при повышенном напряжении

- переключатель "31/35" установить в положение "2";
- по вольтметру "V" измерить напряжение холостого хода U_{d0} ;
- результат занести в таблицу;
- включить выключатель "ПУСК";
- выждать 15-20 с;
- снять характеристику ТЭД, аналогично п.2;
- снять осциллограммы напряжения U_d с контрольных клемм 4-5 для минимального и максимального тока I_d . С помощью осциллографа измерить угол коммутации γ и амплитуду напряжения U_{2m} для тех же токов. Результаты занести в таблицу;
- вернуть движок реостата "R₁" в крайнее положение "ОТ СЕБЯ".

4.5.4. Исследовать влияние индуктивности анодной цепи выпрямителя на характеристики ТЭД

- не выключая выключатель "ПУСК" установить переключатель "31/35" в положение "2+L_a";
- снять характеристику ТЭД, изменяя ток I_d по амперметру "I_я" в интервале 4,5...5,5 А с помощью реостата R₁. Результаты занести в таблицу 4.1;
- снять осциллограммы напряжения U_d с контрольных клемм 4-5 для минимального и максимального тока I_d . С помощью осциллографа измерить угол коммутации γ и амплитуду напряжения U_{2m} для тех же токов. Результаты занести в таблицу;
- выключить выключатель "ПУСК";
- вернуть движок реостата "R₁" в крайнее положение "ОТ СЕБЯ";
- по вольтметру "V" измерить напряжение холостого хода U_{d0} ;
- результат занести в таблицу.

4.5.5. Исследовать характеристики ТЭД при питании от сети постоянного тока

- переключатель "31/35" установить в положение "С";
- включить выключатель "ПУСК";
- выждать 15-20 с;

- снять характеристику изменяя ток I_d по амперметру " I_a " в интервале 5...15 А с помощью реостата R_1 . Результаты занести в таблицу;
- выключить выключатель "ПУСК";
- вернуть движок реостата " R_1 " в крайнее положение "ОТ СЕБЯ".
- переключатель "31/35" установить в положение "0".

4.5.6. Предъявить преподавателю результаты опытов

4.6. Содержание отчета

1. Принципиальная схема виртуальной лабораторной установки.
2. Таблица опытных и расчетных данных. Величины $\Delta U_{d\gamma}$ и U_d вычисляются по формулам (4.15) и (4.16) методических указаний; значения угла коммутации – по формуле (4.9).
3. Осциллограммы выпрямленного напряжения.
4. Кривые опытных и расчетных зависимостей $U_d = f(I_d)$, построенные на одном графике.
5. Кривые зависимостей $M = f(\omega)$ для участка постоянного и переменного тока, построенные на одном графике.
6. Результаты расчетов коэффициентов относительной жесткости χ зависимостей $M = f(\omega)$. Расчет производить по формуле (4.22) методических указаний.

4.7. Контрольные вопросы:

1. Какой вид имеет внешняя характеристика выпрямителя. Какие величины оказывают влияние на напряжение?
2. Как изменяется выпрямленное напряжение с увеличением тока нагрузки двигателя?
3. Какое влияние оказывает индуктивность трансформатора на выпрямленное напряжение U_d .
4. При каких условиях определяется выпрямленное напряжение холостого хода U_{d0} ?
5. Коммутация диодов. От каких величин зависят потери напряжения коммутации $\Delta U_{d\gamma}$?
6. Как изменяется угол коммутации γ с увеличением тока I_d ?
7. Как влияет индуктивное сопротивление трансформатора на длительность коммутационного процесса диодов?
8. Чему равен ток короткого замыкания трансформатора i_k в начале и конце коммутации диода?

9. Как отразится величина индуктивности трансформатора на внешней характеристике выпрямителя и скоростных характеристиках двигателя?

10. Как отразится изменение индуктивности трансформатора на жесткость тяговых характеристик?

11. В каком положении должны находиться выключатели лабораторной установки, чтобы обеспечить минимальный (максимальный) угол коммутации диодов?

12. В каком положении должны находиться выключатели лабораторной установки, чтобы измерить выпрямленное напряжение холостого хода выпрямителя на первой (второй) позиции?

13. Какие данные необходимо иметь, чтобы рассчитать коэффициенты относительной жесткости тяговых характеристик?

14. В каком случае коэффициент относительной жесткости будет выше: при работе двигателя от выпрямительной установки или от постоянного напряжения, не зависящего от тока нагрузки?

15. С помощью каких типов вольтметров можно измерить среднее и действующее значение выпрямленного напряжения?

Параметры стабилитрона 2С510А

№ п/п	Параметр	Обозначение	Единица измерения	Величина
1.	Номинальное напряжение стабилизации	$U_{ст.н}$	В	10
2.	Коэффициент температурной нестабильности	$\alpha_{ст}$	$\frac{\%}{^{\circ}\text{C}}$	0,1
3.	Коэффициент нестабильности	δ	%	1,5
4.	Динамическое (дифференциальное) сопротивление	$R_{д}$	Ом	< 25
5.	Максимальный ток стабилизации	$I_{ст.мин}$	mA	79
6.	Минимальный ток стабилизации	$I_{ст.мак}$	mA	1
7.	Максимальный прямой ток	$I_{пр}$	mA	2,5

Порядок расчета параметрического стабилизатора напряжения

1. Выбрать тип стабилитрона по $U_{\text{вых}}$. В практической работе тип стабилитрона задан в приложении 1.1.

2. Задаться величиной относительного изменения входного напряжения α_{min} и α_{max} относительно среднего значения. Эти параметры зависят от типа источника питания. В практической работе можно условно считать, что колебания входного напряжения составляют 10%. Тогда $\alpha_{\text{min}} = 0,9$; $\alpha_{\text{max}} = 1,1$.

3. Определить наибольшую величину (X_{max}) из разностей:

$$X_1 = \alpha_{\text{max}} - 1;$$

$$X_2 = 1 - \alpha_{\text{min}}.$$

4. Рассчитать допустимый коэффициент стабилизации:

$$K_{\text{ст}} = \frac{R_0}{R_{\text{д}}} \cdot \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}.$$

В предварительном расчете коэффициент стабилизации рассчитывается по параметрам неустойчивости и отклонению входного напряжения:

$$K_{\text{ст.д}} = \frac{X_{\text{max}} \cdot 100}{\delta},$$

где δ – коэффициент неустойчивости (принимается из паспортных данных стабилитрона).

5. Рассчитать максимальный коэффициент стабилизации:

$$K_{\text{ст.мах}} = \frac{U_{\text{вых}} \cdot \alpha_{\text{min}}}{(I_{\text{н.мах}} + I_{\text{ст.мин}}) \cdot R_{\text{д}}},$$

где $I_{\text{ст.мин}}$ – минимальный ток стабилизации. Принимается из паспортных данных стабилитрона;

$I_{\text{н.мах}}$ – максимальный ток нагрузки. Принимается по таблице 1.2;

$R_{\text{д}}$ – динамическое сопротивление стабилитрона. Определяется из опыта 1 или принимается из паспортных данных стабилитрона;

$U_{\text{вых}}$ – напряжение на выходе стабилизатора. В практической работе принимается $U_{\text{вых}} = U_{\text{ст.н}}$.

6. Проверить соотношение $K_{ст.д}$ и $K_{ст.мах}$. Должно выполняться условие:

$$K_{ст.д} \leq (0,5 \dots 0,7) \cdot K_{ст.мах}.$$

Если это условие не выполняется, то параметрический стабилизатор неработоспособен. Необходимо изменить схему – принять двухступенчатую стабилизацию, либо стабилизацию с биполярным транзистором.

7. Вычислить минимальное входное напряжение, при котором будет выполняться стабилизация выходного напряжения:

$$U_{вх.мин} \geq \frac{U_{вых.мах}}{\alpha_{мин} \cdot \left(1 - \frac{K_{ст.д}}{K_{ст.мах}}\right)},$$

где $U_{вых.мах}$ – максимальное напряжение на выходе стабилизатора.

$$U_{вых.мах} = U_{ст.н} + I_{ст.мах} \cdot R_д,$$

где $I_{ст.мах}$ – максимальный ток стабилитрона. Принимается из паспортных данных стабилитрона;

$U_{ст.н}$ – номинальное напряжение стабилизации. Принимается из паспортных данных стабилитрона.

8. Определить величину сопротивления балластного резистора:

$$R_0 = \frac{U_{вх.мин} - U_{вых.мах}}{I_{н.мах} + I_{ст.мин}},$$

9. Определить максимальный ток стабилитрона:

$$I_{ст.мах} = \frac{U_{вх.мах} - U_{вых.мин}}{R_0} - I_{н.мин},$$

где $I_{н.мин}$ – минимальный ток нагрузки. В практической работе принимается $I_{н.мин} = 0$;

$U_{вх.мах}$ – максимальная величина входного напряжения.

$$U_{вх.мах} = U_{вх.мин} \cdot \frac{\alpha_{мах}}{\alpha_{мин}}.$$

Если окажется, что максимальный ток стабилитрона превышает паспортное значение, необходимо выбрать другой стабилитрон, либо уменьшить величину $I_{н.мах}$.

10. Определить максимальный входной ток:

$$I_{вх.мах} = I_{ст.мах} + I_{н.мин}.$$

11. Определить мощность балластного резистора:

$$P = I_{\text{ВХ.мак}}^2 \cdot R_0.$$

12. Определить расчетный к.п.д. стабилизатора:

$$\eta = \frac{U_{\text{ВЫХ}} \cdot I_{\text{Н.мак}}}{U_{\text{ВХ}} \cdot \frac{U_{\text{ВХ}} - U_{\text{ВЫХ}}}{R_0}}.$$

Приложение 2.1

Параметры транзистора КТ-503 Г

$$I_{\text{кмакс}} = 150 \text{ мА};$$

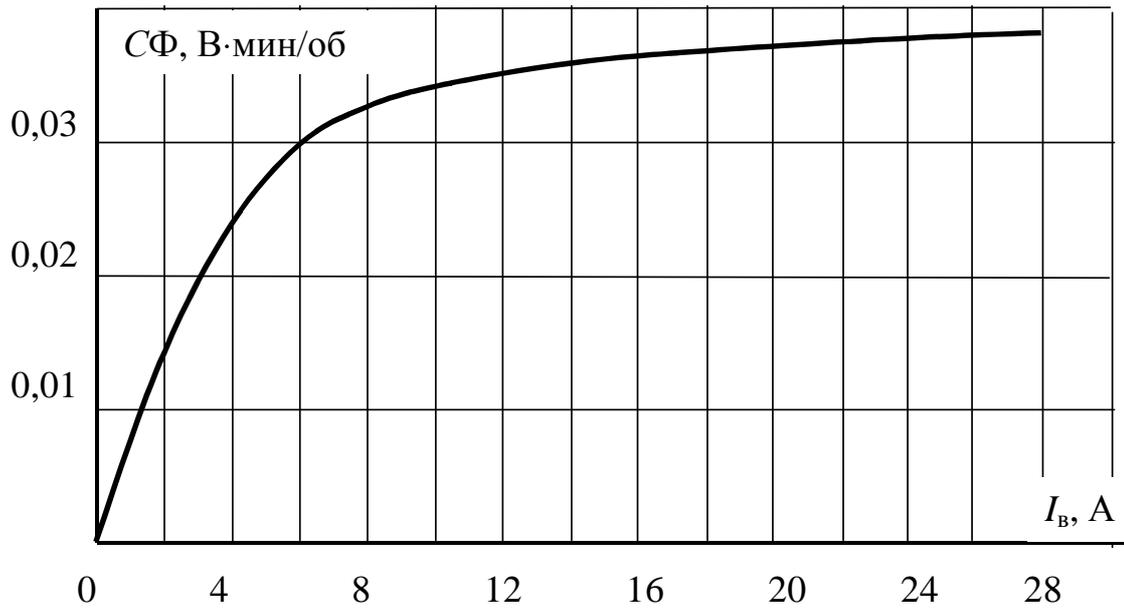
$$U_{\text{кэмакс}} = 60 \text{ В};$$

$$U_{\text{бэмакс}} = 5 \text{ мА};$$

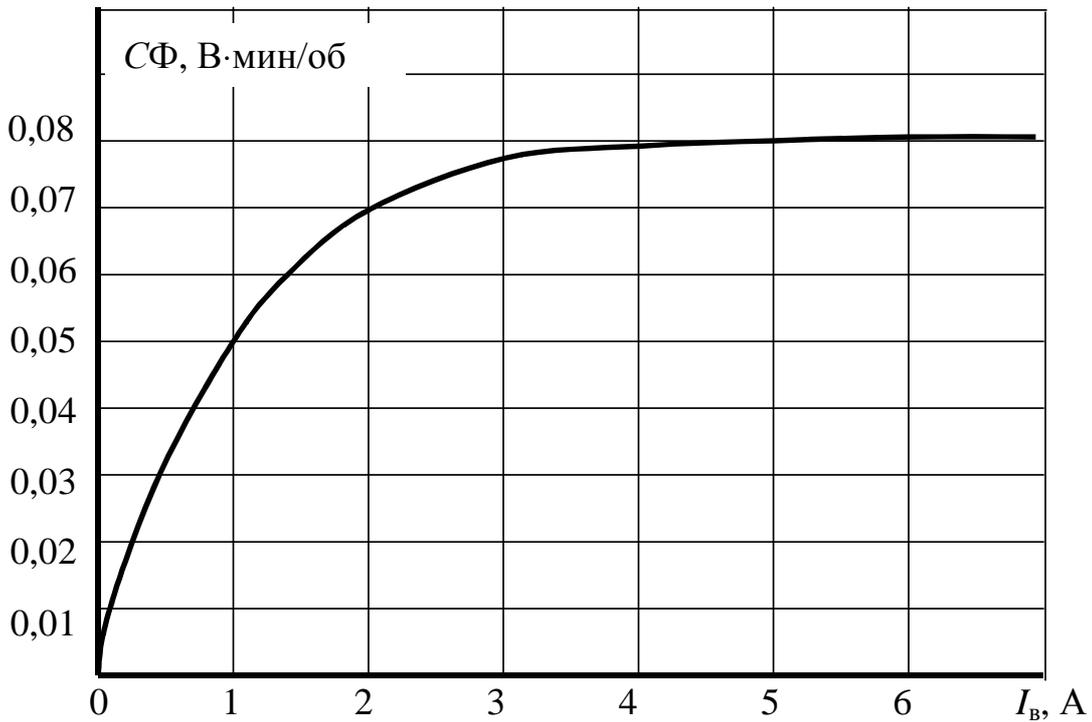
$$f = 5 \text{ МГц};$$

$$h_{21} = 80 \dots 240;$$

$$P_{\text{расс макс}} = 150 \text{ мВт.}$$



Зависимость $C\Phi = f(I_B)$ электродвигателя П41
(последовательное возбуждение)



Зависимость $C\Phi = f(I_B)$ электродвигателя П11
(независимое возбуждение)

5. Самостоятельная работа

В качестве самостоятельной работы магистрант должен повторить и изучить материал пройденных лекций; освоить основные темы практических занятий, проводить исследовательскую работу по данному предмету в библиотеке, в периодической печати и в Интернете.

6. Список использованной литературы:

6.1. Основная литература:

1. Механическая часть тягового подвижного состава./ Под ред. И.С. Бирюкова, А. Н. Савоськина и др. М.: Транспорт, 1992.- 440 с.
2. Тихменев Б. Н., Трахтман А. М. Подвижной состав электрифицированных железных дорог, М.: Транспорт, 1980.- 471 с.
3. Преобразовательные полупроводниковые устройства подвижного состава. Под ред. Ю. М. Инькова, М.: Транспорт, 1982.- 260 с.
4. Проектирование систем управления электрическим подвижным составом. Под ред. Н. А. Ротанова, М.: Транспорт, 1986.-280 с.

Литература, разработанная преподавателями кафедры «Городской и промышленный электрический транспорт»

ТашИИТ:

5. Усманходжаев Н. М., Связев В. П. Трамвай ва троллейбус электр жихозлари, Т.: ТашИИТ, 2004.-272 б.
6. N. M. Usmonho'jayev, G. A. Xromova. V. P. Sviyazyev. Elektrovoz elektr jihozlari va ta'miri . Toshkent: «O'zbekiston faylasuflari milliy jamiyati nashriyoti», 2007.- 120 b .
7. Хромова Г. А., Камалов И. С., Инсапов Д. М. Метрополитен асослари («Основы метрополитена») (русско-узбекский). Toshkent: «O'zbekiston faylasuflari milliy jamiyati nashriyoti», 2007.- 160 b.
8. Системы автоматизированного проектирования электрического оборудования на электроподвижном составе. Методические указания по выполнению курсового проекта для магистрантов-электромехаников. // Составили: Хромова Г. А., Байгузин И. К. Препринт, ТашИИТ, 2007. – 27 с.
9. САПР для ПС ЭТ. Конспект лекций для магистрантов-электромехаников. // Конспект составили: Хромова Г. А., Байгузин И. К. Препринт, ТашИИТ, 2004. – 69 с.

6.2. Дополнительная литература:

10. Справочник по электроподвижному составу, тепловозам, электропоездам. Т. 1 и 2. М.: Транспорт, 1976.- 870с.
11. Справочник по преобразовательной технике/ Под ред. И. М. Чиженко, Киев: Техника, 1978.- 365 с.
12. Херхагер М., Партоль Х. Mathcad 2000. Полное руководство. Перевод с немецкого под ред. К. Ю. Королькова. ВНУ, Киев, 2000.- 400 с.
13. Волков Е. А. Численные методы. М.: Наука, 1982.- 352 с.
14. Дьяконов В. П. Энциклопедия Mathcad 2001i и Mathcad 11.- М.: Солон-Пресс, 2004. – 832 с.
15. Макаров Е. Г. Инженерные расчеты в Mathcad. Учебный курс. – СПб.: Питер, 2003.- 448 с.

6.3. Интернет-сайты:

16. ЖДМ-online • Информационная служба журнала <Железные дороги мира> - [www. GDM-online.ru](http://www.GDM-online.ru)
17. WESSEX INSTITUTE OF TECHNOLOGY (Англия – Кембридж, UK)
www.wessex.ac.uk
18. Московский институт инженеров железнодорожного транспорта (МИИТ) - [www. miit-inf.ru](http://www.miiit-inf.ru)
19. Российский государственный открытый технический университет путей сообщения (РГОТУПС) - [www. rgotupc.ru](http://www.rgotupc.ru)
20. Санкт-Петербургский Университет инженеров путей сообщения (СПУПС – ЛИИЖТ) - [www. liigt-inf.ru](http://www.liigt-inf.ru)