

12/5/10

Одобрено кафедрой  
«Локомотивы  
и локомотивное  
хозяйство»

## ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ

Руководство к выполнению лабораторных работ  
для студентов V курса  
специальности  
181400 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ  
(ЭПС)  
по направлению подготовки  
657600 ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ



Москва - 2005

## ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Составитель — канд. техн. наук, проф. С.И. Осипов

Рецензент — канд. техн. наук, доц. А.П. Кун

---

### ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ

#### Руководство к выполнению лабораторных работ

Редактор *Д.Н. Тихонычев*  
Корректор *В.В. Игнатова*  
Компьютерная верстка *О.А. Денисова*

---

Тип. зак.	Изд. зак. 234	Тираж 500 экз.
Подписано в печать 2.03.05	Гарнитура Times.	Офсет
Усл. печ. л. 2,0		Формат 60×90 <sup>1</sup> / <sub>16</sub>

---

Издательский центр РГОТУПС,  
125993, Москва, Часовая ул., 22/2

Участок оперативной печати РГОТУПС,  
125993, Москва, Часовая ул., 22/2

© Российский государственный открытый технический университет  
путей сообщения, 2005

Выполнение лабораторных работ позволяет студентам глубже понять и усвоить изучаемый материал по дисциплине «Теория электрической тяги».

Для того, чтобы успешно и осознанно выполнять лабораторные работы, каждый студент должен до их начала познакомиться с содержанием этих методических указаний и изучить их.

Приступая к выполнению лабораторных работ, нужно иметь четкое представление об их характере и порядке проведения. Необходимые расчеты, построения и графики студент обязан выполнять в процессе лабораторной работы. Поэтому каждый студент должен иметь при себе чертежные принадлежности, миллиметровую бумагу и вычислительную технику, к которой он привык.

Перед допуском к лабораторным работам преподаватель проверяет подготовку студента. Неподготовленные студенты к лабораторным работам не допускаются.

После подготовки стенда или сборки схемы, перед включением их в работу, необходимо получить разрешение на включение у преподавателя или лаборанта.

При выполнении работ нужно строго соблюдать рекомендуемые настоящим руководством режимы. Нельзя допускать чрезмерных скоростей вращения, токов, напряжений и т.д., которые могут привести к травмам студентов и порче оборудования. При всех затруднениях, возникающих в связи с наладкой или использованием приборов и другого оборудования, студент должен обращаться к преподавателю или лаборанту. После окончания лабораторной работы студенты должны показать полученные результаты, выполненные расчеты и графики преподавателю, которые должны быть выполнены в соответствии с этим руководством. Отчет по лабораторной работе оформляется на бланке или в тетради, где перечисляется порядок выполнения работы, проделанные операции (опыты, расчеты), схемы установок, используемые формулы, проводится анализ полученных результатов с выводами. К нему прилагаются выполненные на миллиметровой бумаге необходимые графики.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА $(1 + \gamma)$ , УЧИТЫВАЮЩЕГО ИНЕРЦИЮ ВРАЩАЮЩИХСЯ ЧАСТЕЙ

#### I. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

В лабораторной работе предстоит определить момент инерции модели колесной пары, соединенной с якорем электрического двигателя, методом выбега и рассчитать коэффициент  $(1 + \gamma)$ , учитывающий инерцию вращающихся частей.

#### II. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Характер движения поезда зависит от величины действующих сил, массы поезда и инерции вращающихся частей – колесных пар локомотивов и вагонов, якорей тяговых машин и элементов зубчатой передачи.

Влияние вращающихся частей в уравнении движения поезда оценивается коэффициентом  $1 + \gamma$ . Величина  $\gamma$  зависит от момента инерции вращающихся частей, радиусов колесных пар, величины передаточного отношения зубчатой передачи и массы подвижного состава.

Моментом инерции  $J$  тела относительно оси называется сумма произведений масс всех точек  $m_{вр}$  тела на квадраты их расстояний  $\rho$  от полюса или, в общем виде, кг·м<sup>2</sup>:

$$J = \int \rho^2 dm_{вр}$$

Для тел сложной конфигурации (колесные пары, якоря электрических машин и т.д.) момент инерции определяют экспериментально, по величине запасенной кинетической энергии, используя характеристику выбега. Эта характеристика показывает зависимость частоты вращения  $n$  или угловой частоты  $\omega$  в функции времени  $t$  в режиме выбега. При этом частота вращения  $n$  или угловая частота  $\omega$  уменьшается, поскольку часть запасенной кинетической энергии тратится на со-

вершение работы по преодолению сил сопротивления вращению.

В эксперименте тело разгоняют до частоты, несколько большей номинальной, затем переводят в режим выбега и измеряют  $n$  через определенные промежутки времени.

По результатам измерений строят кривую  $n(t)$  — линию  $AB$  (рис. 1). Как видно из графика, величина  $\frac{dn}{dt}$  при изменении частоты вращения не остается постоянной. Это объясняется изменением момента сопротивления при снижении частоты вращения. Если бы этот момент сопротивления не изменялся, величина  $\frac{dn}{dt}$  была бы постоянной.

Если определить момент сопротивления вращению  $M_c$  при номинальной частоте вращения  $n_n$  и принять его неизменным при других частотах, то изменение частоты вращения определится прямой  $AC$ , касательной к линии  $AB$  в точке  $A$ , соответствующей  $n_n$ . Полученное время (отрезок  $A'C$ ) называют *условным временем выбега*  $T_1$ .

Для определения момента инерции тела используем **второй закон Ньютона для вращательного движения**, Н·м:

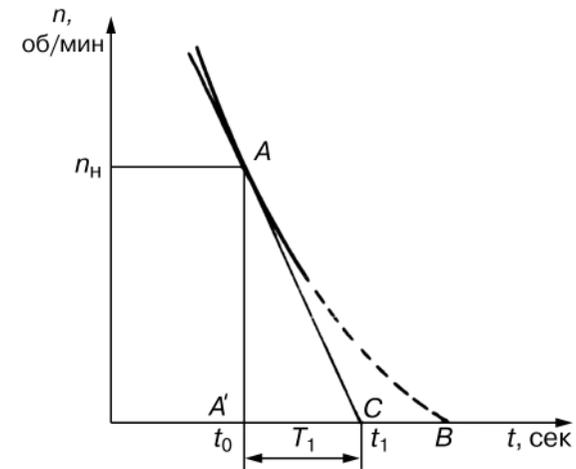


Рис. 1

$$M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (1)$$

где  $J$  — момент инерции вращающихся частей установки, кг·м<sup>2</sup>,

$$\text{или так как } 1 \text{ кг} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}/\text{с}^2}, \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2;$$

$\frac{d\omega}{dt}$  — угловое замедление, рад/с.

Так как  $\frac{d\omega}{dt} = \frac{2\pi}{60} \frac{dn}{dt}$  (а при постоянном замедлении  $\frac{dn}{dt}$  опережают как отношение скорости  $n_n$  к условному времени выбега  $T_1$ ), получим, Н·м

$$M_c = J \frac{2\pi n_n}{60 T_1}, \quad (2)$$

откуда Н·м·с<sup>2</sup> или кг·м<sup>2</sup>

$$J = \frac{60 M_c T_1}{2\pi n_n}. \quad (3)$$

Для определения момента инерции по этой формуле необходимо определить момент сопротивления  $M_c$ . Его определяют исходя из потерь мощности в установке. Эти потери для установки. Состоящей из электрической машины и модели колесной пары, определяют, используя режим холостого хода установки.

Потери мощности  $\Delta P_d$  в работающем электрическом двигателе складываются из следующих составляющих:

1. Потери в меди обмоток  $\Delta P_m$ , вызываемых тепловым действием тока при прохождении его по проводникам. Они пропорциональны электрическому сопротивлению обмоток и квадрату тока.

2. Переходных потерь в щеточном контакте  $\Delta P_{щ}$ , возникающих вследствие падения напряжения под щетками. Их оце-

нивают из расчета падения напряжения 3 В для щеток положительной и отрицательной полярности, не имеющих гибких шунтов и 2 В при использовании щеток с шунтами.

3. Механических потерь  $\Delta P_{мех}$ , которые появляются вследствие трения вала якоря в подшипниках, щеток о коллектор, на вращение насаженного на вал вентилятора при самовентиляции двигателя и т.д. Эти потери зависят от скорости вращения двигателя.

4. Магнитных потерь  $\Delta P_{магн}$ , возникающих вследствие перемагничивания стали сердечника и зубцов якоря вследствие гистерезиса и вихревых токов. Их величина определяется размерами петли гистерезиса, которые зависят от материала сердечника и зубцов, толщины листов и магнитной индукции в них, а так же частотой перемагничивания и массой сердечника и зубцов.

5. Добавочных потерь  $\Delta P_{доб}$ , к которым относят мощность всех потерь, не учтенных перечисленными потерями. К ним относятся потери в сердечниках, вследствие искажения основного магнитного потока, появления вихревых токов в полюсных наконечниках и других деталях электрического двигателя, потери вследствие неравномерного распределения тока по сечению шин и щеток и т.д. Добавочные потери возрастают с увеличением нагрузки двигателя.

Если определяется момент инерции установки, состоящей из электрического двигателя и соединенной с ним модели колесной пары, вращающейся в своих подшипниках, то необходимо учесть и потери мощности  $\Delta P_k$  на трение в этих подшипниках.

Таким образом, при работе установки потери мощности в ней равны, Вт,

$$\Delta P = \Delta P_m + \Delta P_{щ} + \Delta P_{мех} + \Delta P_{магн} + \Delta P_{доб} + \Delta P_k. \quad (4)$$

Эти потери при работе электрического двигателя на холостом ходу при выбранной частоте вращения  $n_n$  определяют по затраченной мощности на вращение якоря и модели колесной пары. Ее рассчитывают по току  $I_{0я}$  и напряжению  $U_0$ , подведенному к двигателю:

$$\Delta P = \Delta P_{xx} = U_0 I_{0я}. \quad (5)$$

В режиме выбега при отключенном токе якоря ( $I_{я} = 0$ ) и включенном независимом возбуждении электрической машины, потери мощности при той же частоте вращения могут быть определены как потери при холостом ходе, за вычетом потерь в меди обмоток якоря и дополнительных полюсов, и переходных потерь в щеточном контакте (разницей небольших по величине добавочных потерь пренебрегаем)

$$\Delta P_{в} = \Delta P - \Delta P_{м} - \Delta P_{щ},$$

Потери в меди цепи обмотки якоря определяют при известном их сопротивлении по формуле

$$\Delta P_{м} = I_{0я}^2 r, \quad (6)$$

где  $r$  — сопротивление обмоток якоря и дополнительных полюсов двигателя установки,  $r = 6,5$  Ом.

Потери напряжения в щеточном контакте (при наличии гибких шунтов) принимаются равными  $2$  В, тогда переходные потери мощности в щеточном контакте, Вт

$$\Delta P_{щ} = 2I_{0я}. \quad (7)$$

Следовательно

$$\Delta P_{в} = \Delta P - I_{0я}^2 r - 2I_{0я}. \quad (8)$$

Эту мощность потерь при выбеге выразим через механическую мощность, пропорциональную произведению момента сопротивления  $M_c$  (в Н), на угловую частоту

$$\Delta P_{в} = M_c \omega, \quad (9)$$

отсюда момент сопротивления при  $n_H$  равен, Н·м

$$M_c = \frac{60 \Delta P_{в}}{2\pi n_H}. \quad (10)$$

Подставив полученную величину  $M_c$  в формулу (3), получим величину момента инерции установки. Следует иметь в виду, что момент инерции колесной пары, якоря тягового двигателя и элементов зубчатой передачи электровоза имеет значительно большую величину по сравнению с моментом инерции модели вследствие разницы в массах и размерах вращающихся частей и из-за наличия зубчатой передачи с передаточным отношением  $\mu$ .

В теории электрической тяги влияние вращающихся частей на изменение скорости движения оценивают коэффициентом  $(1 + \gamma)$ .

Коэффициент  $\gamma$  показывает отношение эквивалентной массы  $m_3$  к физической массе  $m$  подвижной единицы (локомотива, вагона):

$$\gamma = \frac{m_3}{m}. \quad (11)$$

*Эквивалентной массой* называют сумму отношений моментов инерции к радиусам колесных пар в квадрате. По аналогии с электровозом эквивалентной массой установки, состоящей из колесной пары и тягового двигателя при передаточном отношении  $\mu = 1$ , назовем отношение момента инерции  $J$  к радиусу колесной пары в квадрате ( $R^2$ ):

$$m_3 = \frac{J}{R^2}. \quad (12)$$

Следовательно, коэффициент инерции в случае использования колесной пары и электродвигателя установки на макете электровоза, будет равен:

$$1 + \gamma = 1 + \frac{J}{R^2 m}, \quad (13)$$

где  $m$  — часть массы макета электровоза, приходящаяся на одну колесную пару,  $m = 35$  кг;

$R$  — радиус колеса, равный  $0,115$  м.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как влияет коэффициент  $1 + \gamma$  на изменение скорости движения поезда?
2. Как определяют сопротивление вращению тела сложной конфигурации, имеющего привод от электрического двигателя?
3. Что характеризует угол наклона кривой  $n(t)$  при вращении в режиме выбега?

## III. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ СТЕНДА И МОМЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ

Ознакомьтесь со схемой включения электрического двигателя с независимым возбуждением под напряжение сети постоянного тока через реостаты и выключатели (рис. 2).

1.1. При полностью введенных реостатах в цепях якоря и обмотки возбуждения подать питание на установку (100 В) и включить тумблер SA1. Установить с помощью реостата ток в обмотке возбуждения 0,8–1 А.

Изменяя сопротивление реостата в цепи якоря двигателя, довести частоту вращения до  $n_n = 900$  об/мин (скорость измеряют тахометром или с помощью тахогенератора) и записать

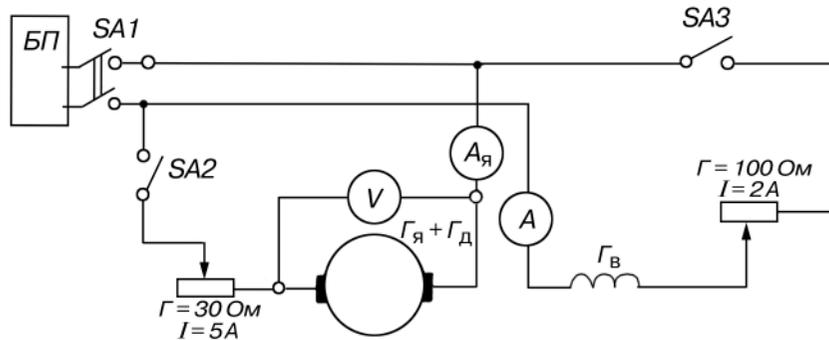


Рис. 2

в табл. 1 значение тока  $I_{0я}$  и напряжения  $U_0$ . Рассчитать  $\Delta P$ , по формуле (5),  $\Delta P_в$  по формуле (8) и  $M_c$  по формуле (10).

Результаты свести в табл. 1.

1.2. Повторить определение  $M_c$  при  $n_n = 800$  об/мин, с измерением и расчетами в порядке, указанном в п. 1.1 и заполнить вторую строку в табл. 1.

Таблица 1

Скорость вращения $n$ , об/мин	Напряжение $U_0$ , В	Ток $I_{0я}$ , А	Потери		Момент сопротивления $M_c$ , Н·м
			$\Delta P$	$\Delta P_в$	

### 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА $1 + \gamma$

2.1. Снять характеристику выбега. Запустить установку с электрическим двигателем, включенным по схеме (рис. 2), не изменяя тока возбуждения, и довести частоту вращения модели колесной пары и якоря до 1000 об/мин, затем разорвать цепь тока якоря (цепь возбуждения не разрывается) и измерять частоту вращения  $n$  через каждые 5 с в течение 25 с. В связи с тем, что измерения выполняются часто, а скорость вращения снижается быстро, опыт нужно проводить четко и оперативно, предварительно потренировавшись в работе.

Для повышения точности измерений опыт повторить не менее 3 раз.

Результаты измерений занести в табл. 2.

Таблица 2

№ опыта	Время $t$ , с	Частота вращения в опытах $n$ , об/мин			
		I	II	III	$n_{ср}$
1	0	1000	1000	1000	1000
	5				
	10				
2	...	900	900	900	900
	0				
	5				
...					

По данным табл. 2 построить кривые выбега (подобные линии  $AB$  на рис. 1) и определить условное среднее время выбега при  $n_n = 900$  об/мин по формуле:

$$T_1 = t_1 - t_0.$$

2.2. Повторить опыты так же при  $n = 900$  об/мин и определить еще одно значение  $T_1$  (при  $n_n = 800$  об/мин).

2.3. Рассчитать момент инерции вращающихся частей станда.

Используя данные табл. 1 и 2 и условное среднее время выбега  $T_1$ , по формуле (3) дважды определить момент инерции  $J$  модели колесной пары и якоря электрического двигателя.

2.4. Определить коэффициент  $1 + \gamma$  макета электровоза по формуле (13).

2.5. Проанализировать полученные результаты и составить выводы по проделанной работе.

#### IV. ОФОРМЛЕНИЕ РАБОТЫ

В результате проделанной лабораторной работы студент составляет отчет, в котором указываются схемы (см. рис. 2), графики (см. рис.1), заполненные табл. 1 и 2 и полученные величины  $\Delta P = \dots$  Вт;  $P_b = \dots$  Вт;  $M_c = \dots$  н·м;  $J = \dots$  кг·м<sup>2</sup>;  $1 + \gamma = \dots$  и делаются выводы по работе.

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 СКОРОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

#### I. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомить студентов со скоростными характеристиками электроподвижного состава постоянного тока при разных уровнях напряжения.

## II. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Из уравнения движения поезда следует, что характер изменения скорости зависит от величины действующих на поезд сил. В режиме тяги этими силами являются сила тяги, которую машинист может регулировать, и сила сопротивления движению.

При равенстве этих сил установившаяся скорость движения  $V$ , км/ч, определяется из уравнения

$$V = \frac{U_d - I_d \Sigma r}{C_V \Phi}, \quad (14)$$

где  $U_d$  — напряжение, подведенное к тяговой машине, В;

$I_d$  — ток, потребляемый тяговой машиной, А;

$\Sigma r$  — сопротивление цепи якоря тяговой машины, Ом;

$C_V$  — постоянная электроподвижного состава, зависящая от конструктивной постоянной двигателя, диаметра колес и передаточного отношения зубчатой передачи,  $\frac{\text{В}}{\text{Вб} \cdot \text{км/ч}}$ ;

$\Phi$  — магнитный поток тягового двигателя, Вб.

Таким образом, изменяя величины  $U_d$ ,  $\Sigma r$ ,  $\Phi$  для каждого значения тока  $I_d$ , можно получить различные установившиеся скорости движения  $V$ .

Скоростная характеристика показывает зависимость скорости движения  $V$  от тока  $I_d$  тягового двигателя при неизменном подведенном напряжении и постоянном омическом сопротивлении обмоток машины.

Скорость  $V$  на ободу колеса можно определить в зависимости от частоты вращения вала якоря тяговой машины по формуле

$$V = 0,188 \frac{Dn}{\mu}, \quad (15)$$

где  $D$  — диаметр колеса, м;

$\mu$  — передаточное отношение зубчатой передачи, через которую вращающий момент передается от вала тягового двигателя на колесную пару;

$n$  — частота вращения вала якоря тягового двигателя, об/мин.

Зависимость частоты вращения  $n$  от тока  $I_d$  определяют при испытании тягового двигателя на стенде и пересчитывают значения  $n$  на  $V$  по формуле (15).

Характеристики  $V(I_d)$  на электроподвижном составе постоянного тока приводят при разных напряжениях на двигателе в зависимости от схем соединения и подключения к контактной сети. Полученные значения скоростей на одном соединении тяговых двигателей (например параллельном  $V_{\text{п}}$ ) можно пересчитать на другое напряжение, соответствующее другому соединению двигателей (например последовательному  $V_{\text{с}}$ ) по формуле

$$V_{\text{с}} = \frac{U_{\text{с}} - I_{\text{д}} \Sigma r}{U_{\text{п}} - I_{\text{д}} \Sigma r} V_{\text{п}}, \quad (16)$$

где  $U_{\text{с}}$  — напряжение на двигателе при последовательном соединении, В;  
 $U_{\text{п}}$  — напряжение на двигателе при параллельном соединении, В;  
 $\Sigma r = 17 \text{ Ом}$  — сопротивление обмоток двигателя лабораторной установки.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как регулируют скорость движения электроподвижного состава постоянного тока?
2. Каким образом снимают скоростные характеристики в лаборатории?
3. Из каких условий исходят, пересчитывая скоростные характеристики на другое напряжение?

### III. ОПИСАНИЕ СТЕНДА

Лабораторный стенд имитирует электропоезд постоянного тока. Он состоит из двух электрических двигателей  $D_1$  и  $D_2$  и панели с пускорегулирующей аппаратурой. Якоря электрических двигателей  $D_1$  и  $D_2$ , соединены между собой и с колесом 2 (рис. 3). Для изменения момента сопротивления вращению колеса  $M_{\text{с}}$ , а следовательно, и потребляемого тока  $I_{\text{д}}$

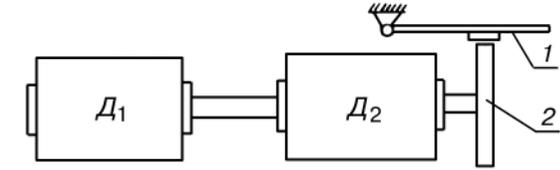


Рис. 3

имеется механический тормоз с рукояткой  $I$ . Схема включения двигателей  $D_1$  и  $D_2$  приведена на рис. 4. В цепь этих двигателей включают пусковой реостат при разгоне на последовательном и параллельном соединении. Переход с одного соединения на другое выполнен мостовым. Порядок работы электрических цепей указан на развертке контроллера (слева на рис. 4). На первой позиции двигатели  $D_1$  и  $D_2$  включены между собой последовательно и в их цепи находятся все секции реостата  $R_{\text{п}}$ . При переходе на 2, затем на 3 и 4 позиции из цепи выключаются поочередно секции реостата и на 4 позиции весь реостат оказывается выведенным из цепи. Эта позиция является ходовой (безреостатной) при последователь-

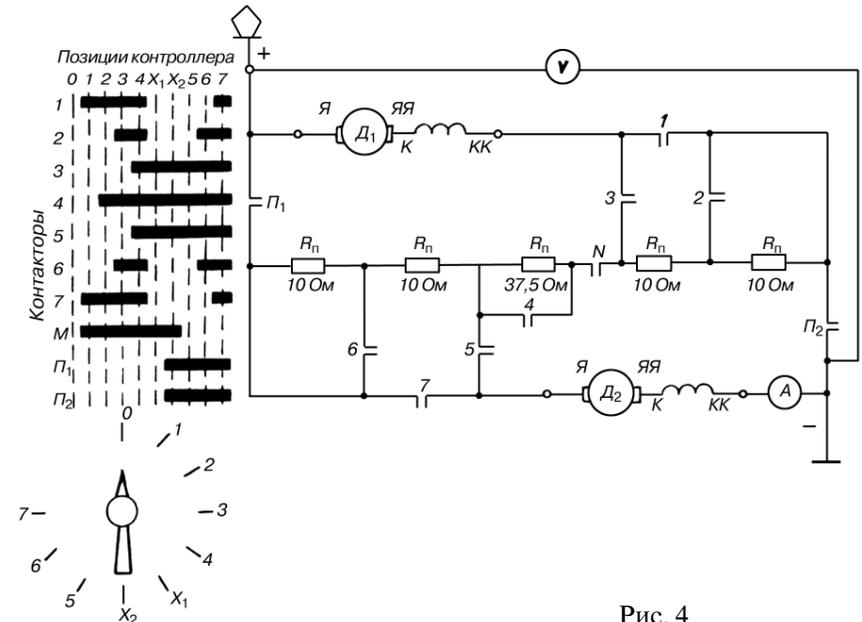


Рис. 4

ном соединении двигателей. Позиции  $X_1$  и  $X_2$  являются переходными. На 5 позиции двигатели соединены параллельно между собой; в цепи каждого двигателя включены по две секции реостата. Они выключаются при переходе на 6 и 7 позиции. 7 позиция – ходовая (безреостатная) при параллельном соединении двигателей. Ток двигателя измеряют амперметром  $A$ , напряжение сети — вольтметром  $V$ , частоту вращения — с помощью тахогенератора.

#### IV. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

##### 1. СНЯТИЕ СКОРОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ И ПАРАЛЛЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ ДВИГАТЕЛЕЙ

1.1. Детально ознакомиться с устройством лабораторного стенда, схемой включения двигателей (см. рис.4).

1.2. Снять скоростные характеристики на 1–7 позициях. (Реостатные скоростные характеристики 1–3 и 5–6 будут использованы в лабораторной работе № 3.) После разрешения преподавателя включить ток двигателей, установив рукоятку контроллера на первую позицию при отторможенном положении тормоза. После получения установившихся скорости и тока снять показания напряжения  $U_c$ , тока  $I_c$  и скорости вращения  $n$  и занести их в табл. 3. Затем нажатием на тормозной рычаг увеличить ток на 0,1 А и снова снять значения  $I_d$ . Такие измерения продолжать до  $n = 0$ . Аналогично снять значения  $I_d$  и  $n$  на 2-й, 3, 4, 5, 6 и 7 позициях контроллера изменяя ток нажатием на тормозной рычаг в пределах 0,6–1,6 А через 0,2 А.

Результаты занести в табл. 3 и записать напряжение по вольтметру  $V$  (см. рис. 4).

1.3. Пересчитать по формуле (15) частоты вращения колеса в линейную скорость на ободу колеса — скорость движе-

Таблица 3

№ позиции	$I_d$ , А	$n$ , об/мин	$V$ , км/ч

ния воображаемого поезда и занести результаты в табл. 3. Диаметр колеса установки  $D = 0,16$  м, передаточное отношение  $\mu = 1$ .

#### 2. ПОСТРОЕНИЕ И ПЕРЕСЧЕТ СКОРОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

2.1. На основании данных табл. 3 построить графики снятых скоростных характеристик  $V(I_d)$  для всех семи позиций контроллера (по типу рис. 5).

2.2. Для усвоения порядка пересчета характеристик с одного напряжения на другое студенты должны пересчитать характеристику  $V_n(I_d)$  7-й позиции на 4-ю и получить расчетные значения скорости  $V_{cp}$  по формуле (16). Результаты расчетов занести в табл. 4, показать на графике  $V_{cp}(I_d)$  и оценить % расхождения снятой и рассчитанной характеристик на 4 поз. по формуле

$$\%_{\text{расхожд}} = \frac{V_c - V_{c.p.}}{V_c} \cdot 100. \quad (17)$$

Попробуйте самостоятельно объяснить полученные расхождения.

Таблица 4

№ п/п	$I_d$ , А	$U_n$ , В	$U_c$ , В	$V_n$ , км/ч	$V_c$ , км/ч (эксперимент)	$V_{c.p.}$ , км/ч (расчетная)	% расхождения

2.3. Составить выводы о проделанной работе с анализом полученных характеристик.

#### V. ОФОРМЛЕНИЕ РАБОТЫ

По результатам лабораторной работы студенты составляют отчет, в котором приводится порядок выполнения, необходимые формулы, расчеты, схема установки (см. рис. 4), заполненные табл. 3 и 4, скоростные характеристики на реостатных позициях и на безреостатных  $V_n(I_d)$ ,  $V_c(I_d)$  и  $V_{c.p.}(I_d)$  — (все на одном графике), выводы по работе.

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3**  
**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОСТАТНОГО ПУСКА**  
**ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА**

---

### I. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомить студентов с реостатным пуском электроподвижного состава постоянного тока и построением пусковой диаграммы.

### II. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

При реостатном пуске тяговых двигателей сопротивление реостата изменяется ступенями. Каждой такой ступени соответствует реостатная скоростная характеристика  $V_p(I_d)$ .

Если известны точки безреостатной скоростной характеристики, то скорости движения при сопротивлении реостата  $R_n$  можно определить аналитически следующим образом.

Скорость движения  $V$ , км/ч, при работе на безреостатной характеристике определяют по формуле

$$V = \frac{U_d - I_d \Sigma r}{C_V \Phi}, \quad (18)$$

где  $U_d$  — подведенное напряжение, В;

$I_d$  — ток тягового двигателя, А;

$\Sigma r$  — сопротивление обмоток тягового двигателя, Ом;

$C_V$  — постоянная электроподвижного состава  $\left( \frac{\text{В}}{\text{Вб} \cdot \text{км/ч}} \right)$ , за-

висящая от конструктивной постоянной тягового двигателя, диаметра колес и передаточного отношения зубчатой передачи;

$\Phi$  — магнитный поток на полюс, Вб.

Скорость движения  $V_p$  на реостатной позиции при том же токе равна, км/ч

$$V_p = \frac{U_d - I_d (\Sigma r + R_n)}{C_V \Phi}, \quad (19)$$

где  $R_n$  — сопротивление реостата, отнесенное к одному тяговому двигателю, Ом.

Из формул (18) и (19) получим  $V_p$ , км/ч, равна

$$V_p = \frac{U_d - I_d (\Sigma r + R_n)}{U_d - I_d \Sigma r} V, \quad (20)$$

Соответственно, при включенном в цепь тягового двигателя реостате, сопротивлением  $R_n$ , скорость движения  $V_p$  для каждого тока  $I_d$  может быть определена по известной скорости  $V$ , взятой на безреостатной характеристике при токе  $I_d$ .

Переход с одной реостатной характеристики на следующую (вывод ступени реостата) вызывает бросок тока  $I_d$ , а следовательно и силы тяги  $F_k$ . Если реостат имеет большое число секций, то каждая ступень его сопротивления будет меньше, вследствие чего броски тока и силы тяги  $F_k$  также будут меньше. При этом создаются благоприятные условия для пуска и разгона электроподвижного состава, однако усложняется схема и требуется больше контакторов, замыкающих секции реостата, и проводов.

Чрезмерно малое число секций реостата вызовет повышенные броски тока  $I_d$  и силы тяги  $F_k$ .

Для оценки бросков тока  $I_d$  при разгоне электроподвижного состава используют коэффициент неравномерности пуска по току  $\kappa_H$ , равный:

$$\kappa_H = \frac{I_{d \max} - I_{d \min}}{2I_{дп}}, \quad (21)$$

где  $I_{d \max}$  — максимальный ток при разгоне, А (после перехода на следующую позицию);

$I_{d \min}$  — минимальный ток перед переходом на последующую позицию, А;

$I_{дп}$  — среднее значение тока при разгоне, А;

$$I_{\text{дп}} = \frac{I_{\text{дmax}} + I_{\text{дmin}}}{2}.$$

Для электровозов коэффициент неравномерности по току при расчетах принимают равным 0,04–0,08, для электропоездов — 0,08–0,15.

Для уже построенных типов электроподвижного состава коэффициент неравномерности по току можно определить из *пусковой диаграммы* (рис. 5), которая является графиком скоростными характеристиками при различных напряжениях и всех ступенях сопротивления пускового реостата. На ней показаны горизонтальные линии перехода с одной характеристики на другую при  $V = \text{const}$ . Реостатные характеристики, которые при  $V = 0$  соответствуют токам, меньшим чем  $I_{\text{дmax}}$  называют *маневровыми*, остальные называются *разгонными*. В зоне малых скоростей переходы условно показывают с использованием кратковременной работы на каждой маневровой характеристике, а затем после выхода на разгонные характеристики при работе на каждой из них до тока  $I_{\text{дmin}}$ . По величинам токов перед переходом на следующую разгонную характеристику и после перехода определяют коэффициент неравномерности пуска по току  $\kappa_{\text{п}}$ .

### III. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Для исследования реостатного пуска электроподвижного состава используется лабораторный стенд, описание которого приведено в лабораторной работе № 2; схема показана на рис. 4.

### IV. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

#### 1. ПЕРЕСЧЕТ РЕОСТАТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

1.1. Снятые в лабораторной работе № 2 и построенные реостатные характеристики на 3 и 5 позициях рукоятки контроллера необходимо пересчитать с безреостатных характеристик 4 и 7.

Для усвоения порядка пересчета снятых характеристик студенты должны на основании полученной из опыта безреостат-

ной характеристики на 4 позиции рассчитать реостатную характеристику на 3 позицию по формуле (20) при тех же токах, при которых снимали точки. На 3 позиции в цепь двух последовательно включенных двигателей включены 2 секции реостата по 10 Ом, всего 20 Ом. Следовательно, на каждый двигатель

$$U_{\text{д}} = \frac{U_{\text{сети}}}{2} \text{ и } R_{\text{п}} = 10 \text{ Ом.}$$

Сопротивление обмоток двигателей  $\sum r = 17 \text{ Ом}$ . При пересчете с 7 позиции на 5 позицию двигателя включены параллельно —  $U_{\text{д}} = U_{\text{сети}}$  В и в цепи каждого двигателя включены две секции реостата по 10 Ом. Следовательно,  $R_{\text{п}} = 20 \text{ Ом}$ . Полученные результаты

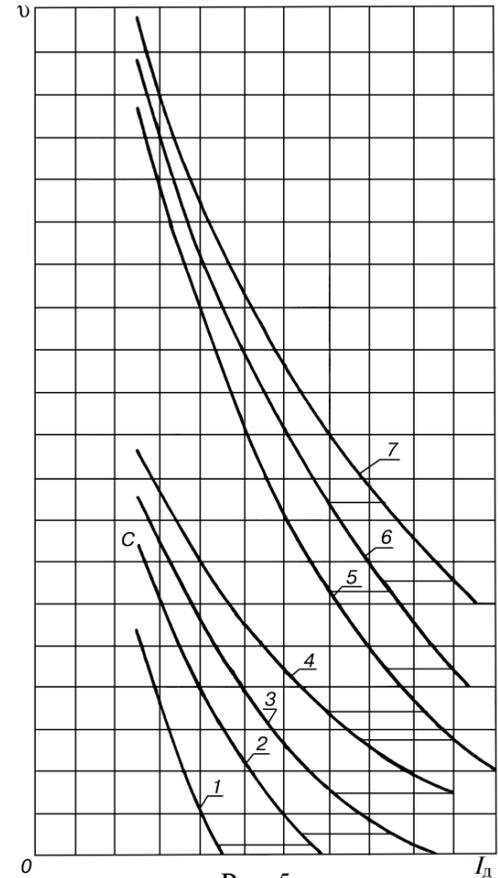


Рис. 5

занести в табл. 5 и показать расчетные характеристики  $V_{\text{р}}(I_{\text{д}})$  на 3 и 5 позициях на графике по типу рис. 5. В предпоследней графе табл. 5 необходимо показать скорости, полученные при снятии характеристик.

1.2. Сравнить рассчитанные графики  $V_{\text{р}}(I_{\text{д}})$  со снятыми кривыми на 5-й ( $R_{\text{п}} = 20 \text{ Ом}$ ) и 3-й ( $R_{\text{п}} = 10 \text{ Ом}$ ) позициях. Объяснить полученные расхождения.

Таблица 5

№ позиции	$R_{\text{п}}$ , Ом	$U_{\text{д}}$ , В	$I_{\text{д}}$ , А	$V$ , км/ч	$V_{\text{р}}$ , км/ч

## 2. ЗАВЕРШЕНИЕ ПОСТРОЕНИЯ ПУСКОВОЙ ДИАГРАММЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА НЕРАВНОМЕРНОСТИ ТОКА ПРИ ПУСКЕ

2.1. Закончить пусковую диаграмму. Для этого на графике показать горизонтальные линии переходов с одной характеристики на другую при последовательном и параллельном соединениях двигателей, в соответствии с указанием раздела II этой лабораторной работы, приняв  $I_{\text{дmin}} = 1,0 \text{ А}$ .

2.2. Определив среднее изменение токов при переходах с позиции на позицию и средние токи при разгоне, рассчитать по формуле (21) коэффициент неравномерности по току  $\kappa_n$ .

Попробуйте самостоятельно объяснить, почему полученные значения  $\kappa_n$  отличаются от указанных в разделе II.

2.3. Составить выводы о проделанной работе.

## V. ОФОРМЛЕНИЕ РАБОТЫ

По результатам лабораторной работы студент составляет отчет, в котором приводятся табл. 5, пусковая диаграмма со снятыми характеристиками на 1-7 позициях (взятые из лабораторной работы № 2), рассчитанные характеристики на 3 и 5 позициях контроллера и анализом полученных результатов; указываются коэффициенты неравномерности при пуске  $\kappa_n$  при переходах на каждую последующую позицию (берутся только снятые характеристики), делаются выводы по работе.

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

## ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ РЕОСТАТНОГО ТОРМОЖЕНИЯ ПРИ САМОВОЗБУЖДЕНИИ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

### I. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомить студентов с системой реостатного торможения при самовозбуждении тягового двигателя. Снять токовые характеристики и рассчитать тормозные характеристики.

## II. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Тяговые двигателя электроподвижного состава на основании принципа обратимости электрических машин могут быть переведены из двигательного режима в генераторный. При этом механическая энергия движущегося поезда будет превращаться в электрическую энергию. При реостатном торможении эта энергия гасится в тормозном реостате.

На электроподвижном составе реостатное торможение используют при самовозбуждении тяговых двигателей или при независимом возбуждении.

Принцип самовозбуждения тягового двигателя основан на использовании остаточного магнитного потока, который остается в магнитной системе машины после прохождения тока по обмоткам возбуждения (в режиме тяги).

Если в остаточном магнитном потоке вращать якорь, то в его обмотке будет наведена ЭДС и при замыкании цепи реостатного торможения пойдет ток через обмотки якоря и возбуждения тягового двигателя и тормозной реостат.

Нужно иметь в виду, что при переводе тягового двигателя из двигательного режима в генераторный изменяется направление тока в обмотке якоря. Чтобы ток обратного направления при реостатном торможении не размагнитил тяговый двигатель, необходимо при переходе с тягового режима в тормозной переключить обмотку якоря или обмотку возбуждения для того, чтобы ток в обмотке возбуждения совпадал по направлению с током в режиме тяги.

При установившемся режиме реостатного торможения ЭДС тягового двигателя  $E$ ,  $\mathcal{B}$ , уравнивается падением напряжения в обмотках двигателя и тормозном реостате.

$$E = I_T (\sum r + R_T), \quad (22)$$

где  $R_T$  — сопротивление тормозного реостата, Ом, отнесенного к одному двигателю.

ЭДС тягового двигателя

$$E = C_V \Phi V. \quad (23)$$

Из (22) и (23) получим

$$V = \frac{I_T(\Sigma r + R_T)}{C_V \Phi} \quad (24)$$

Выражение (24) является уравнением токовой характеристики при реостатном торможении. Величину тока регулируют (при данной скорости) изменением сопротивления реостата  $R_T$ .

Тормозную силу  $B_d$ , Н, отнесенную к ободам колесной пары, определяют по формуле:

$$B_d = 3,6 C_V \Phi I_T + \Delta B, \quad (25)$$

где  $\Delta B$  — сила, вызванная механическими и магнитными потерями в тяговом двигателе и потерями в передаче.

Если эти потери оценить через КПД  $\eta_B$ , то уравнение (25) преобразуется в выражение (26)

$$B_d = \frac{3,6 C_V \Phi I_T}{\eta_B} \quad (26)$$

Тормозная сила локомотива

$$B_T = B_d m, \quad (27)$$

где  $m$  — количество тяговых машин.

На основании уравнений (24), (26) и (27) можно построить тормозные характеристики  $B_T(V)$ .

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как зависит величина тока  $I_T$  реостатного торможения от скорости движения?
2. Чем определяется величина магнитного потока тяговой машины?
3. Как влияет ток  $I_T$  тяговой машины на величину тормозной силы при реостатном торможении?
4. Какой вид имеет тормозная характеристика и почему?

## III. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка состоит из тягового двигателя и приводящего его во вращение двигателя параллельного возбуждения.

Схема включения обмоток машин, тормозного реостата, переключателей и измерительных приборов приведена на рис. 6.

В собранной схеме тяговый двигатель  $M$  с помощью рубильника  $III$  может быть включен в работу двигателем (ДВ) или генератором (Ген).

Режим двигателя используют для создания остаточного магнитного потока, который необходим для самовозбуждения машины.

В режиме генератора тяговая машина может быть включена по схеме с самовозбуждением (рубильник  $II$  в положении «Самовозб») или с независимым возбуждением (рубильник  $II$  в положении «Незав»).

Тормозной реостат  $R_T$  секционирован. Секции включаются с помощью переключателя «П», имеющего 5 положений:

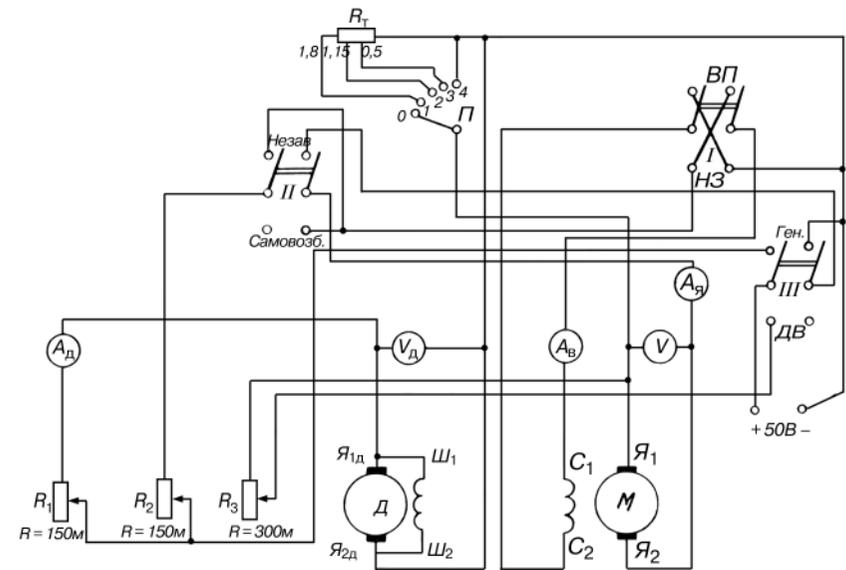


Рис. 6

- 0 — реостат отключен, цепь разомкнута;
- 1 — реостат включен полностью  $R_T = 1,8 \text{ Ом}$ ;
- 2 — реостат включен частично  $R_T = 1,15 \text{ Ом}$ ;
- 3 — реостат включен частично  $R_T = 0,5 \text{ Ом}$ ;
- 4 — реостат выключен  $R_T = 0$ .

Обмотка возбуждения тягового двигателя реверсируется рубильником *I*.

При самовозбуждении тяговой машины ток  $I_T$  и тормозную силу  $B_T$  можно регулировать изменением сопротивления реостата  $R_T$ .

Якорь тяговой машины приводится во вращение двигателем *D*.

Частоты его вращения и якоря тяговой машины *M*, а следовательно, линейные скорости на ободу колеса или равные им скорости движения поезда, регулируют изменением сопротивления реостата  $R_1$ , включенного в цепь двигателя.

## IV. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### 1. ОЗНАКОМЛЕНИЕ С УСТАНОВКОЙ И СБОР СХЕМЫ

1.1. Детально разобраться с устройством установки и схемой включения ее элементов.

1.2. Собрать схему включения лабораторной установки и предъявить ее лаборанту.

1.3. Установить переключатель *П* на нулевую позицию, рубильник *I* в положение вперед «Вп», рубильник *II* — в положение самовозбуждения, рубильник *III* — в положение двигательного режима «Дв» и включить кратковременно тяговый двигатель *M* на напряжение 50 В. Регулируя реостатом  $R_3$ , получить ток  $I$  (по амперметру  $A_я$ ) 5-8 А. Включение тягового двигателя в режим тяги необходимо для создания остаточного магнитного потока.

1.4. После снятия напряжения и прекращения вращения установки рубильник *III* переставить в положение «Ген» — подготовить включение тягового двигателя в режиме генератора.

Ввести полностью реостат  $R_1$  в цепь и подать напряжение 50 В на установку. Уменьшая сопротивление  $R_1$  привести во вращение якорь двигателя *D* и тяговой машины *M*. Вольтметр *V* покажет незначительное напряжение, вызванное вращением якоря в остаточном магнитном потоке машины *M*. Перевести переключатель *П* в положение 1-4, включив в цепь тяговой машины реостат  $R_T$ . Убедиться, что напряжение по вольтметру *V* уменьшилось до нуля из-за размагничивания машины *M* встречным током в обмотке возбуждения (по сравнению с током тягового режима). При отсутствии магнитного потока реостатное торможение невозможно. Токи по амперметрам  $A_я$  и  $A_в$  равны нулю.

Переключатель *П* установить в положение «0».

1.5. Снова включить рубильник *III* в положение двигательного режима, включить тяговый двигатель *M* в режим тяги под напряжением 50 В и, регулируя реостатом  $R_3$ , получить ток двигательного режима 5-8 А.

1.6. После снятия напряжения и прекращения вращения установки рубильник *I* перевести в положение «НЗ» (реверсировать обмотку возбуждения) рубильник *III* переставить в положение «Ген» и включить установку под напряжение 50 В. Реостатом  $R_1$  установить напряжение на двигателе *D* по вольтметру 25-30 В. Вольтметр *V* снова покажет незначительное напряжение.

1.7. Переключатель *П* тормозного реостата переставить в положение *I*, затем в 2 и 3 положения и убедиться в том, что тяговый двигатель *M* возбудился, т.е. в нем наведена ЭДС и по цепи обмоток якоря и возбуждения идет ток. Обратите внимание на направление тока в цепях. Переключатель *П* установить в положение *I*.

### 2. СНЯТИЕ ТОКОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ САМОВОЗБУЖДЕНИИ ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

2.1. Регулируя реостатом  $R_1$  частоту вращения якорей электрических машин, устанавливая различные токи реостатного торможения  $I_T$  (по амперметру  $A_я$ ) и измерять с помощью тахогенератора частоты вращения для каждого значения тока от 7 А до 2 А через 1 А.

Результаты необходимо записать в табл. 6 .

Таблица 6

$I_T, \text{ А}$	$U_T, \text{ В}$	$n, \text{ об/мин}$	$V, \text{ км/ч}$	$C_V \Phi, \frac{\text{В}}{\text{км/ч}}$	$B_T = B_{д}, \text{ Н}$
$A_я$	$V$				

2.2. Уменьшить частоту вращения установки и переключатель  $П$  перевести в положение 3 и снова, как в п.2.1., снять показания приборов и тахометра при токах  $I_T$  от 7 до 2 А (токи в п.п. 2.1 и 2.2 брать одинаковыми) и также свести в табл. 6.

2.3. Линейную скорость на ободе колеса и, следовательно, скорость движения имитируемого электровоза с поездом рассчитывают по формуле

$$V = 0,188 \frac{Dn}{\mu}, \quad (28)$$

где  $n$  — частота вращения якоря тяговой машины, об/мин;  
 $D$  — диаметр колеса, м. Для установки  $D = 0,16$  ;  
 $\mu$  — передаточное отношение зубчатой передачи. Для установки  $\mu = 1$ , поскольку колесо насажено на вал якоря.

На основании полученных материалов построить токовые характеристики  $I_T(V)$  для 1 и 3 позиций переключателя  $П$  тормозного реостата и проанализировать изменения остальных электрических величин.

### 3. РАСЧЕТ ТОРМОЗНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

3.1. Для построения тормозной характеристики необходимо знать кривую намагничивания  $C_V \Phi(I_T)$  (при равенстве тока якоря и тока возбуждения).

Эту кривую строят по точкам, рассчитанным исходя из формулы (24) и занесенным в табл.6. Для тяговой машины сопротивление обмоток равно  $\sum r = 1,75$  Ом. Сопротивление тормозного реостата на 1 позиции переключателя  $П R_T = 1,8$  Ом.

3.2. Тормозную характеристику нужно рассчитывать по формуле (26). Установка имеет одну тяговую машину, поэтому  $B_T = B_{д}$ . КПД  $\eta_B$  для тяговых машин электровозов имеет величину 0,92–0,96. Для лабораторной установки с мало-мощными машинами этот КПД ниже. Его можно принять равным 0,8.

Значения  $C_V \Phi$  для различных токов  $I_T$  берут из табл. 6 или из графика  $C_V \Phi(I_T)$ . Результаты расчетов записывают в табл. 6 и строят рассчитанные тормозные характеристики для 1 и 3 позиций переключателя  $П$ . Затем необходимо проанализировать и объяснить, почему они имеют такую форму и вид.

3.3. Составить выводы по проделанной работе.

## V. ОФОРМЛЕНИЕ РАБОТЫ

По результатам лабораторной работы составляется отчет, в котором указывается схема установки (рис. 6), заполненная табл. 6 и графики  $C_V \Phi(I_T)$ ,  $I_T(V)$  и  $B_T(V)$  при реостатном торможении с самовозбуждением тяговых двигателей.

В конце отчета должны быть выводы по результатам проделанной работы.

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

#### ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ РЕОСТАТНОГО ТОРМОЖЕНИЯ ПРИ НЕЗАВИСИМОМ ВОЗБУЖДЕНИИ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

### I. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомить студентов с системой реостатного торможения при независимом возбуждении тяговых двигателей и снять токовые характеристики.

### II. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Реостатное торможение можно осуществлять при независимом возбуждении тяговых двигателей. В этом случае об-

мотки якорей тяговых двигателей замыкают на нерегулируемой тормозной резистор, а величину тока и тормозной силы регулируют изменением тока в обмотке возбуждения тягового двигателя.

При установившемся режиме реостатного торможения ЭДС тягового двигателя  $E$  будет

$$E = I_T (r_0 + R_T), \quad (29)$$

где  $r_0$  — сопротивление обмотки якоря и дополнительных полюсов, Ом.

Поскольку

$$E = C_V \Phi V, \text{ Н}, \quad (30)$$

то из (29) и (30) получим

$$V = \frac{I_T (r_0 + R_T)}{C_V \Phi} \quad (31)$$

уравнение токовой характеристики реостатного торможения.

При данной скорости  $V$ , ток  $I_T$  и тормозную силу регулируют изменением тока возбуждения тягового двигателя.

Тормозную силу  $B_d$  на ободах колесной пары определяют по формуле

$$B_d = 3,6 C_V \Phi I_T + \Delta B, \quad (32)$$

где  $\Delta B$  — сила, вызванная механическими и магнитными потерями в тяговом двигателе и потерями в передаче.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как регулируют ток реостатного торможения и тормозную силу при системе реостатного торможения с независимым возбуждением?

2. Чем определяется величина тока  $I_T$  при реостатном торможении?

3. Какой вид имеет токовая характеристика при реостатном торможении с независимым возбуждением тяговых двигателей?

4. Чем определяется величина ЭДС тягового двигателя при реостатном торможении при системе с независимым возбуждением?

## III. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Описание лабораторной установки для снятия характеристик при реостатном торможении приведено в методических указаниях к лабораторной работе № 4.

Для регулирования тока возбуждения тягового двигателя (измеряемого амперметром  $A_B$ , см. рис. 6) в цепь включен реостат  $R_2$ . При независимом возбуждении направление тока в обмотке возбуждения не имеет значения. Однако для того, чтобы измерительные приборы не переключать, направление тока в обмотке возбуждения нужно оставить без изменения.

## IV. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### 1. ОЗНАКОМЛЕНИЕ С УСТАНОВКОЙ И СБОР СХЕМЫ

1.1. Детально ознакомиться со схемой установки (см. рис. 6) и разобраться в параметрах включаемых аппаратов.

1.2. Установить переключатель  $П$  в положение 3 ( $R_T = 0,5$  Ом).

### 2. СНЯТИЕ ТОКОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ НЕЗАВИСИМОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

2.1. Установить рубильник  $I$  в положение «Вп», рубильник  $II$  в положение «Незав.» (рубильник  $III$  находится в положении «Ген»).

2.2. Подать на установку напряжение 50 В (при полностью введенных реостатах  $R_1$  и  $R_2$ ).

Реостатом  $R_2$  установить ток в обмотке возбуждения тягового двигателя ( $A_B$ ), равный 3 А.

Реостатом  $R_1$  изменять частоту вращения  $n$ , измеряемую тахометром или тахогенератором. При этом ток  $I_T(A_я)$  должен изменяться от 8 до 4 А (через 1 А).

Показания измерительных приборов записывают в табл. 7.

Таблица 7

$I_B, A$	$I_T, A$	$U_T, B$	$n, \text{об/мин}$	$V, \text{км/час}$
$A_B$	$A_я$	$V$		

2.3. Повторить измерения при токе возбуждения  $I_B = 5 A$  и изменять частоту вращения при токах  $I_T(A_я)$  от 8 до 4 А (через 1 А).

2.4. По данным табл. 7 построить графики  $I_T(V)$  при  $I_B = 3$  и 5 А и проанализировать полученные результаты.

2.5. Составить выводы по проделанной работе.

## V. ОФОРМЛЕНИЕ РАБОТЫ

По результатам лабораторной работы составляется отчет, в котором приводят заполненную табл. 7, графики  $I_T(V)$  при независимом возбуждении тягового двигателя  $M$  и выводы по работе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Теория электрической тяги / В.Е. Розенфельд, И.П. Исаев, Н.Н. Сидоров, Озеров М.И.; Под ред. И.П. Исаева. — М.: Транспорт, 1995.

2. О с и п о в С.И., О с и п о в С. С. Основы тяги поездов. — М.: УМК МПС России, 2000.