

12/2/4

**Одобрено кафедрой
«Локомотивы и локомотивное
хозяйство»**

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЖЕЛЕЗНЫЕ ДОРОГИ

**Задание на курсовую работу
с методическими указаниями
для студентов IV курса**

специальности

**190303 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ
ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ (ЭПС)**



Москва – 2007

Оформление курсовой работы

Составитель – доц. В.М. Голубцов

Рецензент – канд. техн. наук, проф. С.И. Осипов

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЖЕЛЕЗНЫЕ ДОРОГИ

Задание на курсовую работу
с методическими указаниями

Редактор *Д.Н. Тихонычев*
Корректор *В.В. Игнатова*
Компьютерная верстка *Л.В. Орлова*

Тип. зак.	Изд. зак. 262	Тираж 600 экз.
Подписано в печать 25.12.07	Гарнитура NewtonC	Офсет
Усл. печ. л. 2,5		Формат 60×90 ¹ / ₁₆

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, 2007

Курсовую работу оформляют в виде расчетной записки, чертежей и графиков, указанных в задании.

В расчетной записке нужно написать заголовок (название работы), отражающей ее содержание. Все расчеты и текст следует записывать на одной стороне листа. Обратная сторона предыдущего листа предназначена для замечаний и исправлений, если они потребуются в результате рецензирования работы.

На первой странице после заголовка нужно указать номер варианта и выписать все исходные данные соответственно варианту и общие – для всех вариантов. После этого можно выполнять расчеты и построения по рекомендованному порядку.

Работа состоит из отдельных разделов, имеющих соответствующую нумерацию. в работе достаточно указать только номер раздела и его заголовок и далее вести требуемый расчет.

Каждая расчетная операция обозначается своим наименованием, например расчет тока, расчет силы тяги и т.д. Далее записывается расчетная формула в общем виде, после чего через знак равенства — ее численное выражение и результат. Если на основании расчетной формулы заполняется таблица, то расчет достаточно привести для одного значения, а в таблицу записать результаты всех вычислений.

Разрешается не писать перечень условных обозначений, входящих в расчетные формулы, если четко выполнено предыдущее требование.

В задании под заголовками «Порядок выполнения» указаны расчеты, таблицы, схемы или графики, которые оформляются в данном разделе.

Все рисунки и таблицы должны иметь порядковую нумерацию. Располагать их нужно в соответствующих местах в удобном для пользования виде.

Порядок нумерации должен соответствовать ГОСТу так, как это сделано в данных методических указаниях.

Задание на курсовую работу

1. Исходные данные

В курсовой работе предлагается выполнить анализ работы системы управления электровозом постоянного тока при разгоне грузового поезда. Задачей анализа является изучение принципов управления работой тяговых электрических двигателей и технической реализации этих принципов на электровозах. Необходимые для выполнения работы исходные данные (табл. 1) выбирают по двум последним цифрам учебного шифра студента.

Исходные данные

Таблица 1

Последняя цифра учебного шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номинальная мощность на валу тягового двигателя, кВт	836	816	796	777	758	740	722	704	687	670
Руководящий подъем, ‰	12	11	10	12	11	10	9	8	7	6
Предпоследняя цифра учебного шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номинальная скорость движения электровоза, км/ч	50,7	49,9	49,2	48,4	47,7	47,0	46,3	45,6	45,0	44,3

Исходные данные, общие для всех вариантов:

$U_{\text{дн}} = 1500$ — номинальное напряжение тягового электрического двигателя (ТЭД), В;

$\eta_{\text{д}} = 0,94$ — номинальный КПД ТЭД;

$\eta_{\text{F}} = 0,95$ — коэффициент потерь силы тяги в процесс реализации тягового усилия;

$U_{\text{c}} = 3000$ — напряжение в контактной сети постоянного тока, В

$\beta_1 = 0,62$ — коэффициент 1-й ступени регулирования возбуждения ТЭД;

$\beta_2 = 0,40$ — то же, 2-й ступени.

Вводный раздел

Сила тяги, необходимая для движения поезда с электрическим приводом, формируется в результате преобразования электрической энергии в механическую. Это преобразование осуществляется тяговыми электрическими двигателями, которые на электроподвижном составе (электровозы и электропоезда) получают энергию из системы электроснабжения через контактную сеть.

Схематически индивидуальный тяговый привод выглядит следующим образом (рис. 1, а).

Любая движущая колесная пара 1 приводится во вращение своим тяговым электрическим двигателем 2 через зубчатую передачу.

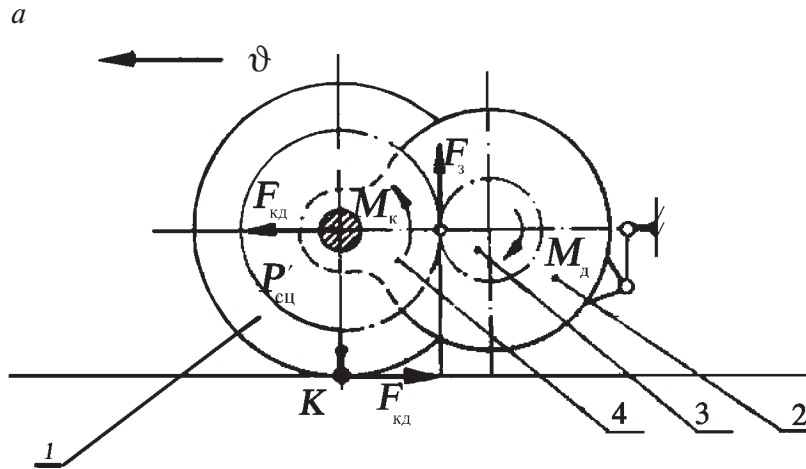
На шестерню 3 с диаметром делительной окружности d_3 действует вращающий момент двигателя $M_{\text{д}}$. При этом в точке зацепления зубчатых колес возникает сила

$$F_3 = 2 \frac{M_{\text{д}}}{d_3}.$$

Эта сила вращает большое зубчатое колесо 4 с диаметром d_4 , в результате чего на колесную пару действует вращающий момент

$$M_{\text{к}} = F_3 d_4 / 2.$$

Направление движения со скоростью ϑ



Направление движения со скоростью ϑ

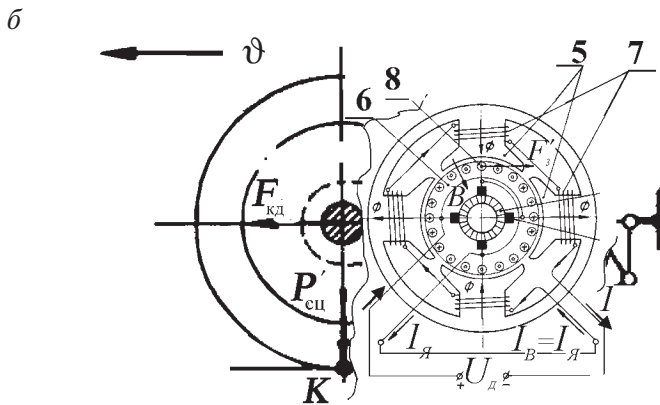


Рис. 1

Величина момента, вращающего колесную пару, зависит от момента, развиваемого тяговым электрическим двигателем $M_д$, и определяется соотношением

$$M_к = F_3 d_4 / 2 = \frac{M_д \cdot d_4}{d_3} = \mu \cdot M_д,$$

где $\mu = \frac{d_2}{d_1} = \frac{z_2}{z_1}$ — передаточное число зубчатой передачи,

обычно выражаемое через отношение числа зубьев большого зубчатого колеса z_2 к числу зубьев шестерни z_1 .

Под действием силы тяжести, т.е. веса электровоза (или электропоезда), приходящегося на движущую колесную пару $P'_{сц}$ в точках касания колес с рельсами K (см. рис. 1, а), возникают силы сцепления, препятствующие проскальзыванию колес относительно рельсов. При вращении колесной пары двигателем возникает сила $F_{кд}$, которую принято называть касательной силой тяги движущей колесной пары или одного двигателя.

Силы тяги всех движущих колесных пар электровоза или электропоезда суммируются и реализуются для поступательного движения поезда.

Величина касательной силы тяги, развиваемой одной колесной парой,

$$F_{кд} = 2 \frac{M_к}{d_к} = 2 \frac{\mu \cdot M_д}{d_к} \cdot \eta_{зп},$$

где $d_к$ — диаметр колесной пары, м;

$\eta_{зп}$ — коэффициент, учитывающий потери момента на преодоление трения в зубчатой передаче.

Величина максимальной касательной силы тяги не может быть больше силы сцепления колес с рельсами, которая зависит от состояния поверхностей колес и рельсов, скорости движения и других факторов и если двигатель создает силу тяги, величина которой будет больше величины сил сцепления колес

с рельсами, то колеса будут проскальзывать (боксовать) и сила тяги сильно уменьшится.

На рис. 1,б показана принципиальная схема устройства электрического двигателя. Известно, что на каждый прямолинейный проводник δ обмотки якоря длиной ℓ_a с током I' в магнитном поле с индукцией B полюсов 5 с обмотками 7 по закону Ампера действует электромагнитная сила F'_3 :

$$F'_3 = BI' \ell_a \sin \alpha.$$

где α — угол между направлением тока в проводнике и вектором магнитной индукции.

Магнитная индукция равна отношению магнитного потока Φ к площади полюса S_{Π} и среднее значение магнитной индукции в воздушном зазоре по дуге окружности τ поверхности якоря, приходящейся на один полюс 5, можно выразить, как $B = \Phi / S_{\Pi}$. В свою очередь площадь одного полюса равна площади боковой цилиндрической поверхности якоря, деленной на число полюсов $2p$ электродвигателя

$$S_{\Pi} = \tau \cdot \ell_a = \frac{\pi \cdot D_{\text{я}} \cdot \ell_a}{2p}.$$

Если обмотка якоря состоит из N проводников, соединенных между собой последовательно и параллельно, то ток в каждом проводнике будет равен току электродвигателя $I_{\text{я}}$, разделенному на число параллельных ветвей обмотки $2a$:

$$I' = \frac{I_{\text{я}}}{2a}.$$

Вращающий момент M_3 электрического двигателя 2 постоянного тока, созданный электромагнитными силами F'_3 , действующими на все проводники δ обмотки якоря равен произведению силы F'_3 на ее плечо относительно оси якоря, равное $D_{\text{я}}/2$ и на общее число проводников в обмотке якоря N

$$M_3 = F'_3 \frac{D_{\text{я}}}{2} N \text{ или } M_3 = \frac{p \cdot N}{a \cdot 2\pi} \Phi \cdot I_{\text{я}}$$

Вращающий момент $M_{\text{д}}$ на валу тягового электрического двигателя постоянного тока несколько меньше электромагнитного момента M_3 , часть которого теряется на преодоление механических и магнитных потерь. В курсах электрических машин и тяговых двигателей изучаются эти потери. Можно задаться коэффициентом потерь $\eta_m = 0,95$ и с учетом этого записать

$$M_{\text{д}} = C_m \Phi I_{\text{я}} \eta_m,$$

где $C_m = \frac{pN}{a \cdot 2\pi}$ — конструктивная постоянная двигателя

для расчета вращающего момента.

Зависимость между силой тяги, отнесенной к ободу колеса и вращающим моментом можно получить из следующей формулы:

$$F_{\text{кд}} = 2 \frac{\mu}{d_{\text{к}}} \eta_3 M_{\text{д}}.$$

Подставив сюда значение для $M_{\text{д}}$, получим

$$F_{\text{кд}} = 2 \frac{\mu}{d_{\text{к}}} \eta_3 C_m \Phi I_{\text{я}} \eta_m,$$

Более кратко:

$$F_{\text{кд}} = C_F \Phi I_{\text{я}} \eta_F,$$

где $C_F = C_m \cdot 2 \frac{\mu}{d_{\text{к}}}$ — конструктивная постоянная для вычисления

силы тяги одного двигателя, а

$$\eta_F = \eta_m \cdot \eta_3.$$

При вращении якоря проводники обмотки пересекают магнитное поле со скоростью $\vartheta_{\text{я}}$ и в них наводится электродвижущая сила (ЭДС) по закону электромагнитной индукции Фарадея:

$$E' = B \ell_a \vartheta_{\text{я}} \sin \alpha$$

Окружная скорость на поверхности сердечника якоря зависит от скорости его вращения n , $\frac{\text{об}}{\text{мин}}$ и ее можно выразить

$$\vartheta_{\text{я}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{я}} \cdot n}{60}.$$

Учитывая ранее сказанное о том, что все N проводников обмотки якоря соединяются в $2a$ параллельных ветвей, а электрическая схема обмотки такова, что ЭДС $\frac{N}{2a}$ проводников одной параллельной цепи складываются; между щетками противоположной полярности будет действовать ЭДС двигателя.

$$E = \sum_1^{\frac{N}{2a}} B \ell_a \frac{\pi D_{\text{я}}}{60} \cdot n.$$

С учетом выражения для среднего значения магнитной индукции $B = \frac{2p}{\pi D_{\text{я}} \cdot \ell_a} \cdot \Phi$, рассмотренной ранее, можно записать

$$E = \frac{pN}{a \cdot 60} \cdot \Phi \cdot n = C_n \cdot \Phi \cdot n,$$

где $C_n = \frac{pN}{a \cdot 60}$ — конструктивная постоянная двигателя для расчета ЭДС по скорости вращения якоря.

Скорость колеса, т.е. поступательная скорость колесной пары, может быть выражена через частоту вращения вала двигателя следующим соотношением:

$$\vartheta = \pi D_{\text{к}} \frac{n}{60\mu},$$

где $D_{\text{к}}$ — диаметр колес колесной пары, м.
Скорость движения поезда, км/ч:

$$\vartheta = \frac{\pi \cdot D_{\text{к}} \cdot 3600}{60 \cdot \mu} \cdot n = 0,188 \frac{D_{\text{к}}}{\mu} \cdot n.$$

Выражение ЭДС, наводимой на обмотке якоря, также можно записать в зависимости от скорости движения:

$$E = \frac{1}{0,188} \cdot \frac{pN}{a \cdot 60} \cdot \frac{\mu}{D_{\text{к}}} \cdot \Phi \cdot \vartheta = C_{\vartheta} \cdot \Phi \cdot \vartheta,$$

где $C_{\vartheta} = 5,3 \frac{pN\mu}{a \cdot 60 \cdot D_{\text{к}}}$ — конструктивная постоянная двигателя для вычисления ЭДС по скорости.

Следует обратить внимание на соотношение $C_{\vartheta} = C_F \frac{1}{3,6}$

или $C_F = 3,6 C_{\vartheta}$, что позволит упростить предстоящие расчеты в курсовой работе. В этом можно убедиться, разделив полученные выражения одно на другое. Объясняется это тем, что линейная скорость в СИ измеряется м/с, а в железнодорожной практике исторически применяют км/ч.

На основании второго закона Кирхгофа напряжение, подведенное к двигателю, $U_{\text{д}}$ уравнивается его ЭДС и падением напряжения на сопротивлении его обмоток $r_{\text{д}}$. С учетом этого

$$U_{\text{д}} = E + I_{\text{я}} \cdot r_{\text{д}} = C_n \Phi \cdot n + I_{\text{я}} r_{\text{я}} = C_{\vartheta} \Phi \cdot \vartheta + I_{\text{я}} r_{\text{д}}.$$

Из выражения легко получить зависимость частоты вращения вала двигателя или скорости движения поезда от тока двигателя, которую принято называть скоростной характеристикой ТЭД. В последнем случае добавляют, что эта характеристика отнесена к ободу колеса. Аналитическое выражение скоростной характеристики имеет вид

$$n = \frac{U_{\text{д}} - I_{\text{я}} \cdot r_{\text{д}}}{C_n \cdot \Phi}.$$

На ободу колеса

$$\vartheta = \frac{U_{\text{д}} - I_{\text{я}} \cdot r_{\text{д}}}{C_{\vartheta} \cdot \Phi}.$$

Порядок выполнения

1. Получить соотношение между C_F и C_ϑ , для чего необходимо разделить одно на другое выражения для них, полученные в этом разделе.

2. Проверить правильность соотношения $C_\vartheta = C_F \frac{1}{3,6}$.

3. Выразить $F_{\text{кл}}$ не через C_F , а через C_ϑ для последующих расчетов в п. 1.4 следующего раздела.

1. Подготовка исходных характеристик

С учетом вышесказанного, состояние поезда с электровозом в любой момент времени, но без учета электрических переходных процессов можно описать следующей системой уравнений:

$$E = C_\vartheta \Phi \vartheta \quad (\text{на основании закона Фарадея}); \quad (1)$$

$$F_{\text{кл}} = 3,6 C_\vartheta \Phi I \eta_F \quad (\text{на основании закона Ампера}); \quad (2)$$

$$U - E = I \Sigma r \quad (\text{на основании закона Ома}); \quad (3)$$

$$F_k - W = M \frac{d\vartheta}{dt} \quad (\text{второй закон Ньютона}), \quad (4)$$

где E — ЭДС обмотки якоря;

C_ϑ — конструктивная постоянная, зависящая от конструкции ТЭД и параметров тяговой передачи электровоза и диаметра колеса;

Φ — магнитный поток главных полюсов ТЭД;

ϑ — скорость движения электровоза;

I — ток обмотки якоря;

η_F — коэффициент, учитывающий потери тягового усилия;

Σr — суммарное сопротивление всех участков силовой цепи;

U — напряжение питания;

F_k — сила тяги (касательная) электровоза;

W — сумма сил сопротивлений, действующих на поезд;

$\frac{d\vartheta}{dt}$ — ускорение движения поезда

M — масса поезда, т.

Поставив (1) в (3) и заменив Σr через

$$\Sigma r = r_d + R_n, \quad (5)$$

где r_d — суммарное сопротивление обмоток ТЭД;

R_n — сопротивление пускового резистора,

получим уравнение, характеризующее состояние электрической цепи ТЭД:

$$U - C_\vartheta \Phi \vartheta = I (r_d + R_n). \quad (6)$$

Исходными характеристиками для последующих расчетов являются характеристика намагничивания $\Phi (I_B)$ и электротяговая характеристика ТЭД $F_{\text{кл}} (I_B)$.

Для расчета магнитный поток удобно заранее умножить на конструктивную постоянную C_ϑ . Тогда произведение $C_\vartheta \Phi = \frac{E}{\vartheta}$ из выражения (1) представляет собой удельную ЭДС, т.е. ЭДС, приходящуюся на единицу скорости движения, имеющая размерность км/ч.

Зависимость между током возбуждения (при последовательном и полном возбуждении ток возбуждения равен току якоря) и идеальной ЭДС выражается экспериментально полученной приближенной формулой

$$C_\vartheta \Phi = 35,5 \left(1 - e^{-\frac{I_B}{260}} \right), \quad (7)$$

где I_B — значение тока возбуждения, для которого рассчитывается удельная ЭДС, А.

Порядок выполнения

1.1. Рассчитать номинальный ток ТЭД с точностью до целых чисел, А:

$$I_n = \frac{P_{\text{дн}} \times 10^3}{U_{\text{дн}} \eta_d}$$

1.2. Рассчитать шесть значений токов якоря, соответствующих 0,25; 0,5; 0,75; 1,25; 1,5; 1,75 номинального тока.

1.3. Для семи значений токов якоря (включая I_n) по формуле (7) определить удельную ЭДС. Результаты расчета представить в виде таблицы, аналогичной по форме верхней части табл. 3.

1.4. Рассчитать силу тяги ТЭД, соответствующую принятым токам, с точностью до целых чисел, кН

$$F_{\text{кл}} = 3,6C_{\vartheta}\Phi I\eta_F \times 10^{-3}.$$

Расчетная формула записывается один раз для одного вычисления, последующие результаты расчета заносят в расчетную таблицу.

1.5. Построить на одном листе А4 формата (210×297 мм) по данным таблицы кривые $C_{\vartheta}\Phi(I)$ и $F_{\text{кл}}(I)$ в масштабе:

- для тока — $M_I = 5$ А/мм;
- для силы тяги — $M_F = 2,5$ кН/мм.

Ток откладывать по оси абсцисс, а его функции — по оси ординат.

График функции $C_{\vartheta}\Phi(I_B)$ построить в масштабе 0,2 В/кВ/ч на миллиметр оси ординат.

2. Силовая электрическая цепь электровоза постоянного тока

Силовая электрическая цепь любого вида электроподвижного состава (ЭПС) состоит из ТЭД и устройств, необходимых для управления их работой.

Можно сказать, что в силовой цепи реализуются физические принципы управления ЭПС, а тем самым и управление движением поезда.

Цепь управления движением поезда состоит в реализации желаемой скорости его движения. Определить конечный результат управления можно только на основании решения выражения (4), которое называется *уравнением движения поезда*.

На данном этапе рассматриваются способы, которыми можно изменять ток якоря и, следовательно, тяговое усилие, которое является одной из составляющих, входящих в это уравнение. Преобразуя выражение (6), получаем формулу (8):

$$\vartheta = \frac{U - I(r_d + R_n)}{C_{\vartheta}\Phi}. \quad (8)$$

Выражение (8) лежит в основе теории управления электровозом, поскольку оно связывает ток якоря, а, следовательно, и тяговое усилие (см. формулу (2)) со скоростью движения поезда. Обращаем внимание на то, что от тока якоря зависит не только числитель выражения (8), но и знаменатель (см. выражение (7)).

Из анализа выражения (8) следует, что для изменения зависимости $\vartheta(I)$, которая называется *скоростной характеристикой*, т.е. для получения семейства скоростных характеристик, расположенных во всем диапазоне скоростей движения от нулевой до максимальной, можно использовать три способа:

- 1) регулирование напряжения питания U ;
- 2) регулирование пускового резистора R_n ;
- 3) изменение функциональной зависимости между током якоря и током возбуждения, в результате чего одному значению тока якоря будет соответствовать несколько значений магнитного потока Φ .

Рассмотрим реализацию перечисленных способов на примере четырехосной секции электровоза постоянного тока.

Напряжение питания на электроподвижном составе постоянного тока изменяется путем переключения числа последовательно включенных двигателей. На рис. 2а показано последовательное включение обмоток четырех ТЭД.

Для увеличения напряжения, подводимого к ТЭД, используется схема рис. 2б, в которой обмотки ТЭД включаются в две параллельные группы (по два двигателя последовательно в каждой группе). Такую схему принято называть *схемой параллельного соединения*. Необходимо обратить внимание на то, что ТЭД может устойчиво работать при напряжении на коллекторе, не превышающем 1500 В. Поэтому, имея в контактной сети напряжение $U_c = 3000$ В, возможны только два варианта включения ТЭД — рис. 2, а и 2, б.

Для расчета скоростных характеристик ТЭД преобразуем выражение (6) применительно к схемам, изображенным на рис. 2.

$$U_c = mC_{\vartheta}\Phi\vartheta + I(mr_d + R_{\Pi});$$

или

$$\frac{U_c}{m} = C_{\vartheta}\Phi\vartheta + I\left(r_d + \frac{R_{\Pi}}{m}\right). \quad (9)$$

Упростим выражение (9), введя два понятия:

1. Напряжение контактной сети, отнесенное к одному двигателю — U'_c

$$U'_c = \frac{U_c}{m},$$

где m — число последовательно включенных ТЭД.

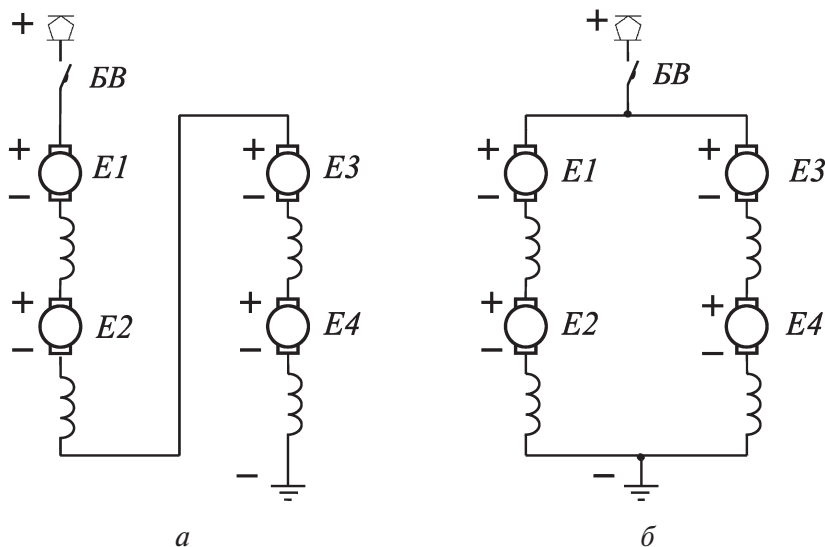


Рис.2

2. Сопротивление пускового резистора, отнесенное к одному двигателю — R'_{Π}

$$R'_{\Pi} = \frac{R_{\Pi}}{m}.$$

Тогда выражение (9) принимает вид

$$U'_c = C_{\vartheta}\Phi\vartheta + I(r_d + R'_{\Pi}) \quad (10)$$

которое является исходным для расчета скоростных характеристик. Каждой схеме включения двигателей соответствует своя скоростная характеристика при $U'_c = 750$ В и $U'_c = 1500$ В.

Для оценки влияния пускового резистора на характеристику ТЭД, преобразуем выражение (10):

$$U'_c = C_{\vartheta}\Phi\vartheta + Ir_d + IR'_{\Pi}.$$

Тогда получим

$$U'_c - IR'_{\Pi} = C_{\vartheta}\Phi\vartheta + Ir_d. \quad (11)$$

Правая часть выражения (11), как это ясно из схемы, изображенной на рис. 3, характеризует напряжение двигателя U_d . В общем случае напряжение на двигателе можно записать как разность:

$$U_d = U'_c - IR'_{\Pi} \quad (12)$$

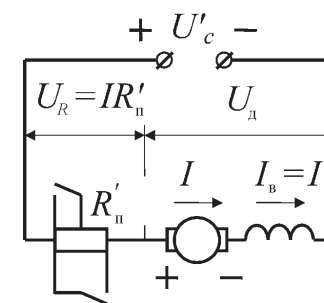


Рис. 3

Выражение (12) поясняет сущность резисторного регулирования: за счет напряжения на резисторе

$$U_R = IR'_{\Pi}. \quad (13)$$

при постоянном напряжении питания уменьшается напряжение, подводимое к двигателю.

Сопротивление пускового реостата изменяется ступенями. Число характеристик равно числу ступеней, поскольку каждая характеристика $\vartheta(I)$ рассматривается при неизменном сопротивлении пускового резистора на рассматриваемой позиции регулирования (позиции контроллера) — $R_{\text{пн}}$. Реостатное регулирование вследствие больших потерь энергии используется только при пуске.

Кроме перечисленных способов на всех видах ЭПС применяется регулирование возбуждения. Под возбуждением двигателя понимается процесс создания магнитного потока Φ , который возникает при протекании тока по обмотке возбуждения. Здесь обращаем внимание на то, что магнитный поток непосредственно связан только с током возбуждения. Рассматриваемый способ регулирования основан на том, что меняется соотношение между током якоря и током возбуждения. При полном возбуждении (см. рис. 3) ток якоря является одновременно и током возбуждения $I_{\text{в}} = I$. Если необходимо посредством регулирования возбуждения получить характеристику $\vartheta(I)$, соответствующую большим скоростям движения, то в цепь двигателя вносятся изменения. Наибольшее распространение получил способ шунтирования обмоток возбуждения тяговых электродвигателей (рис. 4). Параллельно обмотке возбуждения включается резистор $R_{\text{ш}}$, сопротивление которого может регулироваться.

Ток якоря I в точке B_1 разветвляется на два направления: часть тока попадает в обмотку возбуждения $I_{\text{в}}$, а часть ответвляется в шунтирующую цепь $I_{\text{ш}}$. По первому закону Кирхгофа

$$I = I_{\text{в}} + I_{\text{ш}}.$$

Отсюда

$$I_{\text{в}} = I - I_{\text{ш}}.$$

Отношение тока возбуждения к току якоря принято называть *коэффициентом регулирования возбуждения*

$$\beta = \frac{I_{\text{в}}}{I}$$

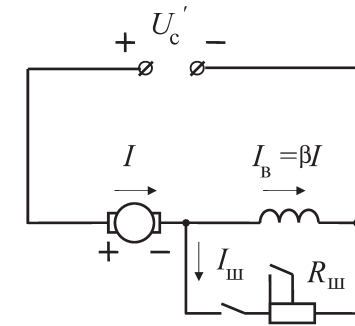


Рис. 4

Величина β зависит от отношения сопротивлений обмотки возбуждения $r_{\text{в}}$ и шунтирующего резистора $R_{\text{ш}}$.

По закону Ома

$$I_{\text{в}} r_{\text{в}} = I_{\text{ш}} R_{\text{ш}},$$

а ток в шунтирующей цепи $I_{\text{ш}} = I - I_{\text{в}}$, следовательно,

$$I_{\text{в}} r_{\text{в}} = (I - I_{\text{в}}) R_{\text{ш}}.$$

Ток возбуждения $I_{\text{в}} = \beta I$, подставляя его в предыдущее условие, после преобразования получим:

$$\beta = \frac{R_{\text{ш}}}{r_{\text{в}} + R_{\text{ш}}}. \quad (14)$$

При шунтировании обмоток возбуждения ток возбуждения уменьшается относительно тока якоря, поэтому такой способ регулирования возбуждения принято называть «*ослаблением возбуждения*».

Коэффициент регулирования возбуждения можно называть *коэффициентом ослабления возбуждения*.

При ступенчатом уменьшении $R_{\text{ш}}$ получим ступенчатое уменьшение β . При $\beta = 1$ будем иметь полное возбуждение, а при различных степенях регулирования, когда $\beta < 1$, получим для β_1 — первую, для β_2 — вторую и другие ступени ослабления возбуждения.

Подводя итог рассмотренным положениям, следует отметить, что управление работой ТЭД при тяговом режиме достигается посредством регулирования параметров: U_c' , $R_{\text{п}}$ и β .

Параметром принято называть величину, характеризующую какое-либо основное свойство процесса, в данном случае — зависимость скорости от тока якоря. Можно сказать, что изменение любого из перечисленных параметров влияет на положение скоростной характеристики в системе координат I и ϑ .

2.1. Схема силовой цепи электровоза постоянного тока

Схемой силовой цепи электровоза (рис. 5) называют графическое изображение электрической цепи включения тяговых электрических двигателей (ТЭД), электрических аппаратов и оборудования, необходимых для управления работой тяговых двигателей.

Все устройства, входящие в схему, изображают условными графическими обозначениями по ГОСТу. На схеме не показаны контакторы реверсора, посредством которых изменяется направление тока в обмотках возбуждения или якорей тяговых двигателей для изменения направления движения. Кроме того, не показаны аппараты защиты от аварийных режимов, а также сделаны другие упрощения, которые не мешают пониманию основных процессов, происходящих в силовой цепи.

Все изменения, происходящие в силовой цепи ТЭД в процессе управления, как правило, осуществляются аппаратами, которые называют *контакторами*. Контакттор приводится в действие по так называемой *косвенной схеме*, когда замыкание и размыкание контактов, включенных в силовую цепь высокого напряжения, осуществляются каким-либо силовым приводом. Управление приводом осуществляется дистанционно посредством электрических цепей низкого напряжения (50–110 В). Управление цепями низкого напряжения осуществляет машинист посредством «*контроллера машиниста*».

Последовательность изменений в схеме отображает таблица замыкания контакторов (табл. 2). Каждое фиксированное состояние схемы называют *позицией* (строка таблицы). В каждой строке указывают номера замкнутых контакторов и величину регулируемого параметра. Таблица замыкания контакторов является как бы ключом для «чтения» схемы.

В упрощенной схеме включения четырех ТЭД автономной секции восьмиосного электровоза постоянного тока (см. рис. 5) осуществляется регулирование сопротивления реостата и переключение двигателей с последовательного на последовательно-параллельное соединение, которое принято называть *параллельным*. Это название объясняется тем, что переключаются

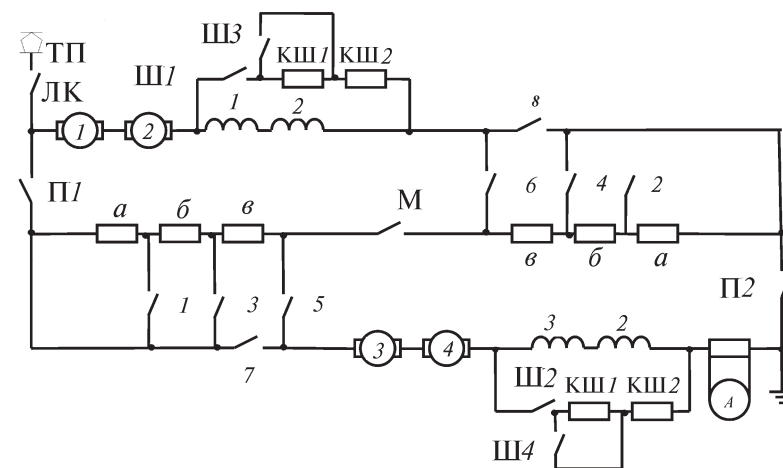


Рис. 5

группы двигателей (по два последовательно соединенных двигателя в каждой), а группы соединяются параллельно.

В схеме предусмотрены две ступени регулирования возбуждения ТЭД посредством шунтирования обмоток главных полюсов (возбуждения).

Порядок выполнения

2.1.1. Выполнить чертеж схемы силовой цепи электровоза на листе формата А4 (210×297 мм), вычерченной карандашом с соблюдением условных обозначений (см. рис. 5). Разрешается использование трафаретов условных обозначений.

2.2. Расчет сопротивления секций реостата и шунтирующих резисторов

Предварительно полное сопротивление реостата рассчитать из условия трогания при токе в силовой цепи $I_{тр} = I_H$.

Тогда по закону Ома сопротивление при трогании, Ом:

$$R_{тр} = \frac{U_c}{I_{тр}} - 4r_d = \frac{3000}{I_H} - 4r_d.$$

Сопротивление секций реостата принимается равным, Ом:

$$R_a = 0,18R_{тр}; R_b = 0,17R_{тр}; R_c = 0,15R_{тр}.$$

Сопротивление шунтирующих резисторов рассчитать из условия (2.4) при $\beta_1 = 0,62$ и $\beta_2 = 0,40$ по формулам, Ом:

$$R_{ш2} = \frac{\beta_2}{1-\beta_2} 2r_b,$$

где $r_b = 0,3r_d$;

$$R_{ш1} + R_{ш2} = 2\frac{\beta_1}{1-\beta_1}r_b,$$

откуда определить величину сопротивления резистора $R_{ш1}$.

Порядок выполнения

2.2.1. Расчет сопротивлений секции реостата с точностью до двух знаков после запятой.

2.2.2. Рассчитать сопротивления шунтирующих резисторов $R_{ш1}$ и $R_{ш2}$ с указанной выше точностью.

2.2.3. Значения сопротивлений каждой секции и шунтирующих резисторов записать над прямоугольниками, обозначающими резисторы в схеме (см. рис. 5).

Таблица 2

Таблица замыкания контакторов электровоза постоянного тока

Позиция	Контактор												Регулируемые параметры						
	ЛК	М	П1	П2	1	2	3	4	5	6	7	8	Ш1	Ш2	Ш3	Ш4	U_c , В	R, Ом	β
1	ЛК	М	-	-	-	-	-	-	-	7	8	-	-	-	-	-	750		1,00
2	ЛК	М	-	-	1	-	-	-	-	7	8	-	-	-	-	-	750		1,00
3	ЛК	М	-	-	1	2	-	-	-	7	8	-	-	-	-	-	750		1,00
4	ЛК	М	-	-	1	2	3	-	-	7	8	-	-	-	-	-	750		1,00
5	ЛК	М	-	-	1	2	3	4	-	7	8	-	-	-	-	-	750		1,00
6	ЛК	М	-	-	1	2	3	4	5	7	8	-	-	-	-	-	750		1,00
7	ЛК	М	-	-	1	2	3	4	5	6	7	8	-	-	-	-	1500		1,00
8	ЛК	-	П1	П2	-	-	-	-	5	6	-	-	-	-	-	-	1500		1,00
9	ЛК	-	П1	П2	1	2	-	-	5	6	-	-	-	-	-	-	1500		1,00
10	ЛК	-	П1	П2	1	2	3	4	5	6	-	-	-	-	-	-	1500		1,00
11	ЛК	-	П1	П2	1	2	3	4	5	6	7	8	-	-	-	-	1500		1,00
12	ЛК	-	П1	П2	1	2	3	4	5	6	7	8	Ш1	Ш2	-	-	1500		0,62
13	ЛК	-	П1	П2	1	2	3	4	5	6	7	8	Ш1	Ш2	Ш3	Ш4	1500		0,40

2.3. Таблица замыкания контакторов

Порядок работы схемы приведен в таблице замыкания контакторов (см. табл. 2).

Как видно из табл.2, пуск электровоза начинается после включения линейного контактора ЛК при полностью включенном реостате (см. поз. 1 в табл. 2).

После начала движения машинист переводит рукоятку контроллера в поз. 2, в результате чего будет закорочена секция a пускового реостата (см. табл. 2 и рис. 4). По мере увеличения скорости движения машинист осуществляет перевод рукоятки контроллера на последующие позиции.

На позиции 7 все секции закорочены, и сопротивление реостата равно нулю. Эта позиция называется *ходовой*, поскольку вся энергия, потребляемая электровозом, идет на тягу поезда. Время работы на этой позиции не ограничивается. Однако длительная работа осуществляется только при особых условиях, когда требуется движение при пониженных скоростях.

При переходе на позицию 8 включаются контакторы П1 и П2, при этом реостат на короткий промежуток времени подсоединяется параллельно тяговым двигателям. Далее размыкается контактор М и тяговые двигатели с последовательно включенными группами секций $(a+b+v)$ оказываются подсоединены параллельно под полное напряжение контактной сети. Происходит изменение напряжения питания U'_c , отнесенного к одному двигателю, с 750 до 1500 В.

При переходе на последующие позиции сопротивление реостата уменьшается до нуля на 11-й позиции. Эта позиция — *ходовая* при параллельном соединении групп двигателей.

На позициях 12 и 13 регулируется возбуждение ТЭД. На позиции 12 реализуется первая ступень ослабления возбуждения при $\beta_1 = 0,62$, а на 13 — вторая ступень при $\beta_2 = 0,40$. После выхода схемы на позицию 13 дальнейший разгон поезда происходит при работе на 13-й характеристике и будет зависеть от внешних условий, а именно от соотношения силы тяги электровоза и суммы сил сопротивления движению поезда.

3. Скоростные и электротяговые характеристики электровоза постоянного тока

3.1. Расчет и построение скоростных и электротяговых характеристик электровоза постоянного тока при реостатном регулировании на последовательном и параллельном соединениях ТЭД (позиции 1-11)

Расчет координат точек скоростных и тяговых характеристик электровоза выполнить в форме табл. 3. В таблицу записать точки двигателя из таблицы координат номинальных характеристик (шаг 1.2). Соответственно токам записать значения $C_\vartheta \Phi$.

Сила тяги электровоза определяется путем умножения силы тяги двигателя на число двигателей электровоза $N_d = 8$.

Порядковые номера позиций и напряжения питания должны соответствовать таблице замыкания контактов (табл. 2).

Расчетное сопротивление силовой цепи, Ом, отнесенное к одному двигателю, определяется из условия

$$R'_n + r_d = \frac{R_n}{m} + r_d, \quad (15)$$

где R_n — сопротивление реостата на очередной (n -й) позиции из табл. 2;

m — число последовательно соединенных двигателей.

Расчет скорости движения выполнить по формуле скоростной характеристики, км/ч,

$$\vartheta_n = \frac{U'_c - I_i (R'_n + r_d)}{C_\vartheta \Phi_i}, \quad (16)$$

где n — порядковый номер позиции;

i — порядковый номер значения тока.

По данным табл. 3 необходимо построить семейство скоростных характеристик $\vartheta(I)$, которое будет рассмотрено на шаге 5 при анализе процесса разгона поезда.

Порядок выполнения

3.1.1. Привести расчетные формулы и расчет $R'_n + r_d$.

3.1.2. Для каждого значения сопротивления силовой цепи (позиции регулирования) рассчитать скорости движения, соответствующие токам, приведенным в первой строке табл. 3. Результаты расчетов последовательно заносятся в строки таблицы. Для сокращения времени рекомендуем воспользоваться программой расчета, приведенной в **приложении**.

Таблица 3

Расчет скоростных характеристик электровоза постоянного тока при реостатном регулировании

1		2	3	4	5	6	7	8
Ток двигателя I , А								
Удельная ЭДС $C_v \Phi$, В/км/ч								
Сила тяги электровоза F_k , кН								
Позиция	Напряжение питания, U'_c , В	Сопротивление цепи, отнесенное к одному двигателю, $(R'_n + r_d)$, Ом		Скорость движения v , км/ч				
1	750					x	x	x
2	750						x	x
3	750							x
4	750							
5	750							
6	750							
7	750							
8	1500						x	x
9	1500							
10	1500							
11	1500							

3.1.3. Начертить семейство скоростных характеристик с 1-й по 11-ю позиции в правой части листа миллиметровой бумагой формата А3 (420×297 мм). Примерный вид графика

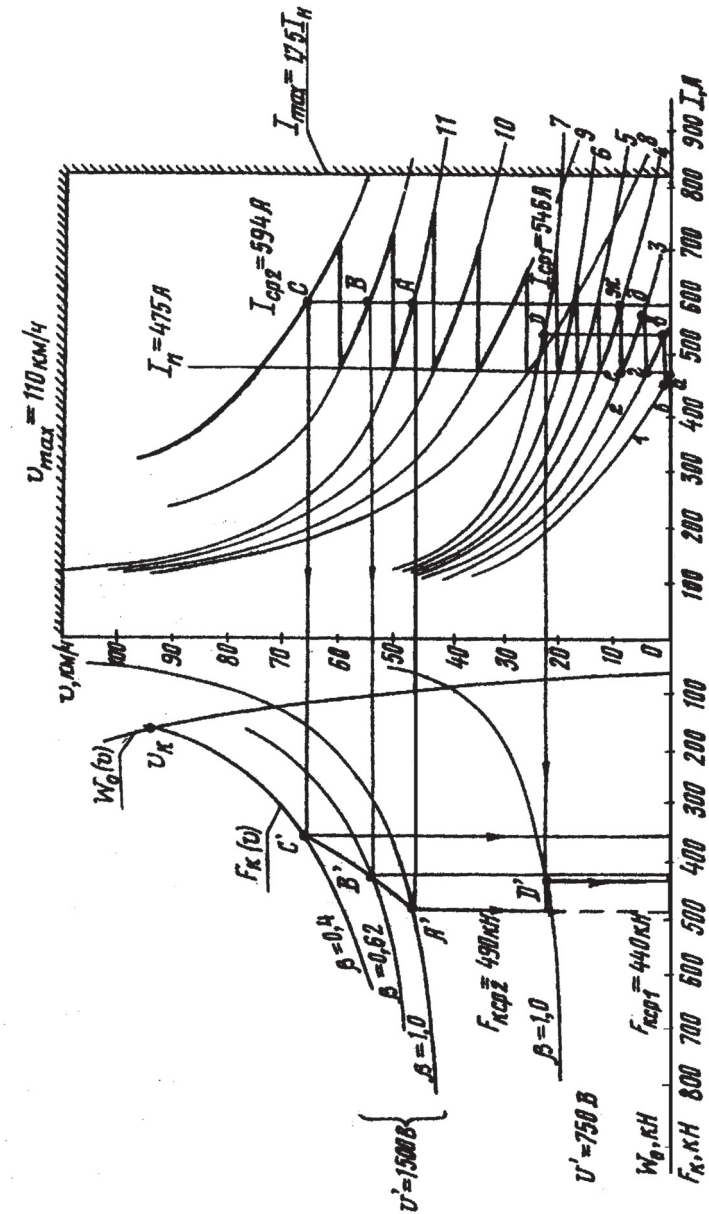


Рис. 6

показан на рис. 6. Ток откладывается по оси абсцисс вправо в масштабе $M_I = 5 \text{ А/мм}$; скорость откладывается по оси ординат вверх в масштабе $M = 0,5 \text{ км/на мм}$. Миллиметровую бумагу разрешается заменить бумагой в клетку (двумя развернутыми листами тетради).

3.1.4. В левой части листа построить тяговые характеристики электровоза для 7-й и 11-й позиций. Сила тяги откладывается по оси абсцисс влево в масштабе $M_F = 5 \text{ кН/мм}$.

Расчетные точки соединяют плавными тонкими линиями карандашом.

3.2 Расчет и построение скоростных и тяговых характеристик при регулировании возбуждения (позиции 12 и 13)

Расчет координат точек тяговых характеристик выполнить по форме табл. 4. В таблицу записать все точки двигателя (шаг 1.4), начиная с тока $I = 0,5 I_n$.

Расчитать точки в обмотках возбуждения двигателя при включенных контакторах Ш1 и Ш2 (см. рис. 3) соответственно каждому значению тока двигателя $I_{вi} = \beta_1 I_i$, где $\beta_1 = 0,62$ — коэффициент ослабления возбуждения 1-й ступени (позиция 12).

Аналогичный расчет выполнить при 2-й ступени ослабления возбуждения, когда на позиции 13 замкнуты контакты Ш1, Ш2, Ш3, Ш4 и $\beta_2 = 0,40$.

Из графика $C_\vartheta \Phi (I_{в})$, который Вы построили на шаге 1.5, определите значения $|C_\vartheta \Phi|_\beta$ для рассчитанных токов возбуждения и запишите в соответствующие строки табл. 4.

Расчет силы тяги двигателя, кН, выполнить по формуле

$$F_{кд} = 3,6 |C_\vartheta \Phi|_\beta I \eta_F 10^{-3}. \quad (17)$$

Здесь нужно подумать, какие цифры подставить в формулу, исходя из условия, что с магнитным потоком в двигателе взаимодействует ток в обмотке якоря (ток двигателя).

Силу тяги электровоза рассчитать соответственно числу двигателей ($N_d = 8$).

Для расчета скорости движения следует воспользоваться уравнением скоростной характеристики, км/ч,

$$\vartheta = \frac{U'_c - I r_d}{|C_\vartheta \Phi|_\beta}. \quad (18)$$

В последнем расчете пренебречь незначительным изменением сопротивления r_d при шунтировании обмоток возбуждения тяговых двигателей.

Порядок выполнения

3.2.1. Привести расчетные формулы и расчет одного значения: $F_{кд}$; $F_{к}$; ϑ при β_1 и аналогично при β_2 .

3.2.2. Заполнить расчетную таблицу по форме табл. 4.

3.2.3. Привести скоростные и электронные характеристики позиций 12 и 13, изображенные на графике, построенном на предыдущем шаге. Пример построения характеристик показан на рис. 6.

Таблица 4

Расчет координат точек тяговых характеристик электровоза при регулировании возбуждения ТЭД

Ток двигателя $I, \text{ А}$							
При коэффициенте регулирования возбуждения $\beta_1 = 0,62$	Ток возбуждения $I_{в}, \text{ А}$	х					
	Удельная ЭДС $ C_\vartheta \Phi _\beta, \frac{\text{В}}{\text{км/ч}}$	х					
	Сила тяги двигателя $F_{кд}, \text{ кН}$	х					
	Сила тяги электровоза $F_{к}, \text{ кН}$	х					
	Скорость движения $\vartheta, \text{ км/ч}$	х					
При коэффициенте регулирования возбуждения $\beta_2 = 0,40$	Ток возбуждения $I_{в}, \text{ А}$	х					
	Удельная ЭДС $ C_\vartheta \Phi _\beta, \frac{\text{В}}{\text{км/ч}}$	х					
	Сила тяги двигателя $F_{кд}, \text{ кН}$	х					
	Сила тяги электровоза $F_{к}, \text{ кН}$	х					
	Скорость движения $\vartheta, \text{ км/ч}$	х					

3.3 Построение пусковой диаграммы электровоза постоянного тока

Пусковой диаграммой будем называть графическое изображение изменения тока и скорости в период пуска электровоза. Эта диаграмма на семействе характеристик $I(\vartheta)$ показана жирной линией. При построении пусковой диаграммы необходимо учитывать, что рабочая область характеристик ограничена максимально доступным током, равным $1,75 I_n$ и конструктивной скоростью локомотива — 110 км/ч.

Рассмотрим, как осуществляется разгон электровоза с поездом. При трогании ($\vartheta = 0$), когда все двигатели соединены последовательно и включено полное сопротивление реостата, ток определяется только напряжением сети и сопротивлением. Если $F_{ктр} > W$ (см. (4)), то начнется увеличения скорости, а, следовательно, и ЭДС двигателей (см (1)).

Из рассмотрения уравнения электрического равновесия (6) следует, что увеличение ЭДС сопровождается уменьшением тока. Однако нельзя забывать и о том, что уменьшение тока, в свою очередь, вызывает уменьшение падения напряжения на резисторе R_n (см. (12)).

За счет влияния обоих рассмотренных факторов скоростные характеристики при больших R_n идут круто, т.е. с увеличением скорости ток меняется мало. Пока сопротивление реостата $R_{п1}$ и напряжение U' не будут изменены, ТЭД будет работать по характеристике 1 (см. рис. 5), ускорение поезда будет малым, а разгон затягиваться.

Длительная работа с включенным реостатом не допускается. Поэтому после начала движения (точка a на рис. 5) следует уменьшить сопротивление реостата и тем самым перейти на характеристику 2 (из точки b в точку v , рис. 6).

При уменьшении сопротивления реостата возрастает ток двигателей и соответственно увеличивается ток электровоза (точка v на рис. 6). В точке z характеристики 2 осуществляется дальнейшее уменьшение сопротивления реостата, в результате чего происходит переход на характеристику 3 в точке и последующий переход на характеристику 4 в точке e .

Как правило, машинист разгоняет поезд до возможно более высокой скорости, а поэтому задерживается на характеристике 4 только до перехода на последующую пятую характеристику и так далее, пока не будет выбрана характеристика 13. При переходе с 7-й на 8-ю характеристику изменяется схема соединения двигателей с последовательного на параллельное соединение. На рис. 6 все переходы в процессе разгона показаны зигзагообразной жирной линией, которую принято называть *пусковой диаграммой*.

После выхода на характеристику позиции 13 скорость движения устанавливается соответственно силам сопротивления движению.

Каждый переход с позиции на позицию является результатом замыкания определенных контактов с силовой цепи. (см. рис. 5 и таблицу замыкания контактов — табл. 2.)

Замыкание реостатного контактора приводит к уменьшению сопротивления электрической цепи двигателей и вызывает возрастание (бросок) тока и соответственно силы тяги. Возрастание тока происходит за короткий промежуток времени, в течение которого скорость движения поезда не успевает измениться. Поэтому на пусковой диаграмме броски тока при переходе показаны при неизменной скорости. Однако с увеличением силы тяги возрастает ускорение, поезд продолжает двигаться ускоренно и скорость движения при работе на фиксируемой позиции возрастает по очередной тяговой характеристике до момента следующего изменения в силовой цепи и перехода на следующую (очередную) характеристику.

После начала движения машинист выдерживает рукоятку контроллера на каждой позиции до тех пор, пока ток не снизится до определенного выбранного машинистом значения. Ток, при котором производится переход на следующую позицию, называется *током переключения* I_n . При выполнении курсовой работы ток переключения принимается равным номинальному $I_n = I_n$.

Построенная для принятого пускового тока пусковая диаграмма (жирная ступенчатая линия на рис. 6) отличается от диаграммы реального электровоза. Отличие обусловлено тем, что для уменьшения вычислительной работы, выполняемой студентом, на силовой схеме, приведенной на рис. 3 существенно уменьшено число контактов и пусковых резисторов, а следовательно, и число расчетных позиций

регулирования (скоростных характеристик). За счет этого броски тока при переходе с позиции на позицию получились значительными и различными для последовательного и параллельного соединений двигателей; при параллельном соединении число позиций регулирования в два раза меньше, чем при последовательном.

Для выполнения расчетов в разделе 5 нужно знать среднюю силу тяги, а следовательно и средний ток в процессе разгона. При выполнении курсовой работы при последовательном соединении ТЭД средний ток нужно принять равным $I_{\text{ср1}} = 1,15I_{\text{н}}$, а параллельном — $I_{\text{ср2}} = 1,25I_{\text{н}}$.

Для указанных токов графически определить силу тяги и скорость выхода на безреостатные характеристики (ходовые). Результат графического расчета показать на скоростных и тяговых характеристиках рис. 6 (точки A, B, C, D и $A', B', C' D'$).

Совершенно очевидно, что с увеличением числа характеристик броски тока и силы тяги уменьшаются.

На реальных электровозах число позиций и характеристик при ступенчатом регулировании свыше 30. Тем самым достигается более плавное регулирование, благоприятное для работы ТЭД и регулировании силы.

Порядок выполнения

3.3.1 Построить пусковую диаграмму, аналогичную показанной на графике семейства тяговых характеристик, цветным карандашом или не слишком жирной линией (см. рис. 5).

3.3.2 Показать на графике ток переключения $I_{\text{п}}$, средний пусковой ток $I_{\text{ср1}}$ для последовательного соединения и средний пусковой ток $I_{\text{ср2}}$ для параллельного соединения. Графически определить скорости, соответствующие средним токам, для всех безреостатных скоростных характеристик.

3.3.3 Графически определить значения силы тяги, соответствующие средним токам для полного и ослабленного возбуждений (при ослабленном возбуждении определяются силы тяги, соответствующие току $I_{\text{ср2}}$).

Результаты расчета записать в тетрадь и показать на характеристиках рис. 6. Найденные величины являются исходными при расчете массы поезда, который выполняется в разделе 4.

4. Расчет массы поезда

Масса поезда и скорость его движения определяется, исходя из условия полного использования мощности и тяговых качеств локомотива. За расчетный режим принято движения поезда с установившейся скоростью ($\frac{d\vartheta}{dt} = 0$) на расчетном подъеме $i_{\text{п}}$ (см. задание).

Для решения поставленной задачи нужно рассмотреть уравнения движения поезда (4), которое для установившейся скорости имеет вид

$$F_{\text{кр}} - W = 0. \quad (19)$$

Значение $F_{\text{к}}$ определены на шаге 3. В расчете нужно использовать наибольшее значение. Силы сопротивления W представим в виде двух слагаемых

$$W = W_{\text{о}} + W_{\text{д}}, \quad (20)$$

где $W_{\text{о}}$ — основное сопротивление движения поезда;

$W_{\text{д}}$ — дополнительное сопротивление движению поезда, возникающее на подъемах и кривых участках пути.

Основное сопротивление движению, кН,

$$W_{\text{о}} = w_{\text{о}} \cdot M \cdot 9,81 \cdot 10^3. \quad (21)$$

где M — масса поезда, т,

рассчитывается на основании полученного опытным путем удельного основного сопротивления движению, Н/кН, при расчетной скорости движения $\vartheta_{\text{п}}$

$$w_{\text{оп}} = 1,08 + 0,01\vartheta_{\text{п}} + 1,52 \cdot 10^{-4} \vartheta_{\text{п}}^2, \quad (22)$$

где $\vartheta_{\text{п}}$ — расчетная скорость поезда на расчетном подъеме, км/ч (точка A').

Удельное сопротивление от подъезда численно равно величине подъема в тысячах, Н/кН,

$$w_i = i / 100. \quad (23)$$

Тогда дополнительное сопротивление от подъема, кН,

$$W_i = iM \cdot 9,8 \cdot 10^{-3}. \quad (24)$$

Подставляя выражения (20) ÷ (24) в (18), можно определить массу поезда (в тоннах), при движении которого на расчетном подъеме будут действовать силы сопротивления, численно равные расчетной силе тяги $F_{кр}$

$$M = \frac{F_{кр}}{(w_{оп} + i) \cdot 9,81 \cdot 10^{-3}}. \quad (25)$$

Порядок выполнения

4.1. Выбрать и обосновать, исходя из полного использования силы тяги электровоза, расчетное значение силы тяги $F_{кр}$ и соответствующую ей расчетную скорость ϑ_p на основании результатов расчетов в разделе 3.

4.2. Рассчитать основное удельное сопротивление движению при расчетной скорости.

4.3. Рассчитать с округлением до 50 т массу поезда.

5. Анализ работы системы управления электровозом при разгоне поезда

На данном шаге определяется, за какое время и на каком протяжении пути возможно разогнать поезд на площадке до установившейся скорости движения. Далее нужно проанализировать процесс управления электровозом при разгоне поезда и сделать соответствующие выводы.

5.1. Расчет времени и пути разгона поезда расчетной массы на прямом горизонтальном участке пути

Уравнение движения поезда при движении поезда на прямом горизонтальном участке пути имеет вид

$$F_k - W_o = M \frac{d\vartheta}{dt}. \quad (26)$$

Время разгона t_p , за которое поезд на площадке достигнет определенной скорости движения ϑ_p (конечной), при которой $F_k = W_o$, можно определить, преобразовав (26) к виду

$$dt = \frac{M}{F_k - W_o} \cdot \frac{1}{3,6} d\vartheta. \quad (27)$$

Заменяя бесконечно малые приращения на конечные, получаем расчетное выражения времени, с,

$$\Delta t = \frac{M}{F_{к ср} - W_{о ср}} \cdot \frac{1}{3,6} \cdot \Delta \vartheta \quad (28)$$

где Δt — время, в течение которого скорость движения увеличивается на $\Delta \vartheta$, с;

$\Delta \vartheta$ — интервал скорости, в котором величины $F_{к ср}$ и $W_{о ср}$ считаются постоянными, соответствующими средней скорости движения для рассматриваемого интервала.

Величины $F_{к ср}$ и $W_{о ср}$ и определяются графически. Для этого необходимо рассчитать основное сопротивление движению для нескольких скоростей движения в интервале от 0 до 100 км/ч. Расчет выполняется по (21) и (22). По полученным значениям в левой части рис. 5 строится зависимость $\vartheta (W_o)$. Необходимые

для графического расчета тяговые характеристики электровоза были построены в разделе 3. Конечная скорость на позиции 13 соответствует точке пересечения тяговой характеристики позиции 13 с кривой основного сопротивления движению $\vartheta (W_0)$.

Время разгоны до скорости ϑ_k определяется как сумма времен движения на каждом интервале скорости

$$t_0 = \sum_{i=0}^{i=k} \Delta t_i \quad (29)$$

где k — количество интервалов в диапазоне скоростей от 0 до ϑ_k .

Путь, пройденный поездом за время разгона, m

$$S_p = \sum_{i=0}^{i=k} \frac{\vartheta_{ср i}}{3,6} \cdot \Delta t_i \quad (30)$$

где $\vartheta_{ср i}$ — средняя скорость движения поезда i -м интервале.

Расчет выполнить в форме табл. 5.

Для наглядности и последующего анализа необходимо построить графики $\vartheta(S)$ и $t(S)$ разгона до скорости выхода на 13-ю характеристику в масштабах:

скорость — $M_\vartheta = 0,5 \div 1$ км/ч/мм,

время — $M_t = 1 \div 5$ с/мм,

путь — $M_s = 20$ или 50 м/мм.

Порядок выполнения

5.1.1. Построить тяговые характеристики для 11, 12 и 13 позиций (см. рис. 6).

5.1.2. Рассчитать и построить характеристики основного сопротивления движению для скоростей 0,25, 50, 75 и 100 км/ч.

5.1.3. Графически определить конечную скорость разгона поезда.

5.1.4. Заполнить таблицу расчета времени и пути разгона поезда (табл. 5).

5.1.5. Построить графики скорости $\vartheta(S)$ и времени $t(S)$ в период разгона поезда.

5.1.6. Сделать выводы из данного шага с примерной количественной оценкой:

1) изменение времени разгона при увеличении или уменьшении среднего значения пусковой силы тяги;

2) изменения времени разгона на подъеме и на спуске.

Таблица 5

Расчет времени и пути разгона поезда

Интервал скорости ϑ , км/ч	Численное значение интервала скорости, км/ч	$\vartheta_{ср}$, км/ч	Δv , км/ч	$F_{кр}$, кН	W_0 , Н/кН	$W_{ср}$, кН	$F_{кр} - W_{ср}$, кН	Δt , с	t , с	ΔS , м	S , м
0 ÷ 10		5,0	10,0	440	1,13	39	401	-	24	-	33
10 ÷ 20		15,0	10,0	440	1,26	44	396	25	49	104	137
20 ÷ D'	20 ÷ 23	21,5	3,0	440	1,37	47	393	7	56	42	179
D ÷ 30	23 ÷ 30	26,5	7,0	490	1,45	50	440	15	71	110	289
30 ÷ 40		35,0	10,0	490	1,62	56	434	22	93	214	503
40 ÷ A'	40 ÷ 47	43,5	7,0	490	1,80	63	427	16	109	193	696
A ÷ B'	47 ÷ 53	50,0	6,0	450	1,96	67	383	15	124	208	904
B ÷ C'	53 ÷ 65	59,0	12,0	390	2,20	75	305	38	162	623	1527
C' + $\frac{\vartheta_c + \vartheta_k}{2}$	65 ÷ 79	72,0	14,0	300	2,59	89	211	64	226	1280	2807
$\frac{\vartheta'_N + \vartheta_E}{2}$	79 ÷ 94	86,5	15,0	200	3,08	106	94	155	381	3724	6531

5.2. Управление электровозом при разгоне поезда

Управлением принято называть целенаправленное действие, которое вносит желаемое изменение в управляемый процесс. Как правило, это действие основано на информации (сведениях) о его результатах. В нашем случае результатом управления является желаемое изменение скорости движения поезда.

Управлением электровозом осуществляется посредством замыкания или размыкания контактов в силовой цепи ТЭД (см. раздел 2.1, рис. 4 и табл. 3). Управление контакторами осуществляется машинистом посредством контролера и цепей низкого напряжения (цепи управления изучаются на V курсе).

В процессе управления машинист контролирует ток в двигателях по показаниям амперметра, включенного в силовую цепь через измерительный шунт (см. рис. 3).

После перемещения рукоятки контролера на последующую позицию ток увеличивается и затем постепенно уменьшается по мере увеличения скорости движения. Соответственно току в двигателях изменяется сила тяги электровоза.

После начала движения машинист выдерживает рукоятку контролера до тех пор, пока ток не снизится до определенного выбранного машинистом значения. Пусковая диаграмма, постоянная в разделе 3, является одной из возможных. При влажных или замасленных рельсах возникает проскальзывание колесных пар. В этом случае машинист перемещает рукоятку контролера при меньших токах двигателя. Для уменьшения времени разгона и сокращения потерь энергии в пусковых резисторах машинист должен стремиться реализовать такой ток переключения, при котором бросок тока якоря достигает значения $1,75I_n$. Максимальное значения тока ограничено сцеплением колес с рельсами и настройкой защиты по максимальному току.

Порядок выполнения

5.2.1. Определить графически (см. рис. 6) максимальный возможный ток переключения, рассматривая пусковую диаграмму для параллельного соединения двигателя.

5.2.2. Показать, какие изменения, по Вашим соображениям, должны произойти в графиках $\vartheta(S)$ и $t(S)$, построенных на предыдущем шаге, при реализации максимально возможного тока переключения. Какой технико-экономический эффект можно получить за счет рационального управления электровозом?

Контрольные вопросы для самопроверки и подготовки к защите данной работы

1. В чем состоит главная задача управления движением поезда?
2. Какие параметры регулируют в процессе управления движением поезда в системе электрической тяги?
3. Как изменяется тяговая характеристика электровоза при увеличении напряжения тяговых двигателей?
4. Как изменяется тяговая характеристика электровоза при включении реостата в электрическую цепь тяговых двигателей и какое влияние на характеристику оказывает сопротивление реостата?
5. Что называется возбуждением тяговых электрических двигателей и как изменяется тяговая характеристика электровоза при различных значениях коэффициента регулирования возбуждения?
6. Как можно объяснить, что при заданном среднем пусковом токе при переходе на ослабленное возбуждение уменьшается расчетная сила тяги и увеличивается расчетная скорость?
7. Из какого условия определяется масса поезда?

ЛИТЕРАТУРА

1. Электрические железные дороги /Под ред. А.В.Плакса, В.Н.Пупынина –М.: Транспорт, 1993.
2. Правила тяговых расчетов для поездной работы. –М.: Транспорт, 1985.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Листинг программы БЕЙСИК расчета скоростных характеристик для одиннадцати позиций контроллера

```
10 CIS:REM Очистка экрана
20 INPUT «ВВЕДИТЕ НОМИНАЛЬНЫЙ ТОК в амперах», IN
30 FOR M=1 TO 11: REM Начало позиций
40 PRINT «РАСЧЕТ ДЛЯ ПОЗИЦИИ», M
50 INPUT «ВВЕДИТЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПОЗИЦИИ в омах»,
R 60 CLS
70 FOR N=1 TO 7:REM Начало цикла токов
80 DATA 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, 1.75
90 READ K
100 I=IN*K
110 CF=35.5*((I-EXP(-I/260)))
120 IF M<=7 THEN U=750
130 IF M>7 THEN U=1500
140 V=(U/I*R)/CF
150 PRINT «СКОРОСТЬ», V; «км/ч», «ПРИ ТОКЕ», I;»А”
160 NEXT N:REM Конец цикла токов
170 RESTORE:REM Восстановление данных строки 80
180 NEXT M:REM Конец цикла позиций
190 END
```