

**МПС РОССИИ  
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОТКРЫТЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ**

---

11/2/2

Одобрено кафедрой  
«Энергоснабжение электрических  
железных дорог»

**УТВЕРЖДЕНО**  
Деканом факультета  
«Транспортные средства»

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЖЕЛЕЗНЫЕ ДОРОГИ

Задание на курсовую работу № 1  
с методическими указаниями  
для студентов III курса  
специальности

101800. ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ (ЭНС)



Москва - 2002

Рецензент – канд. техн. наук, проф. Р. В. Шиловская

© Российский государственный открытый технический университет путей сообщения Министерства путей сообщения Российской Федерации, 2002

## 1. СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Целью курсовой работы является выполнение тягового расчета для грузового поезда с электровозом постоянного или переменного тока при номинальном и отличном от номинального напряжения в тяговой сети. В результате расчета получают зависимости скорости движения поезда, времени и потребляемого тока от расстояния, а также показатели движения поезда по участку или обобщенные параметры: среднюю скорость, время хода, расход электроэнергии. Результаты расчетов могут быть использованы при составлении графика движения поездов, при расчетах системы электроснабжения, а также позволяют оценить влияние напряжения в тяговой сети на обобщенные параметры.

**Курсовая работа включает в себя разделы:**

1. Проверка массы состава.
2. Расчет и построение удельной тяговой характеристики при номинальном напряжении в тяговой сети и удельной характеристики основного сопротивления движению поезда.
3. Расчет и построение тяговой характеристики, удельной тяговой характеристики, токовой характеристики при заданном напряжении в тяговой сети.
4. Расчет и построение кривых движения поезда при номинальном и заданном напряжениях: зависимости скорости поезда, времени и тока электровоза от пройденного пути.
5. Расчет обобщенных параметров: технической скорости, времени хода поезда по участку, расхода электроэнергии и удельного расхода энергии.
6. Оценка влияния уровня напряжения на движение поезда по реальному участку.

Перед выполнением курсовой работы необходимо изучить теоретический материал по основам электрической тяги [1-3]. В [1;2] подробно излагаются теоретические сведения и рассматриваются примеры расчета; [3] содержит основные положения по производству тяговых расчетов и справочный материал. При выполнении курсовой работы следует пользоваться Международной системой единиц СИ.

## 2. Исходные данные

Для выполнения курсовой работы заданы следующие исходные данные.

1. Тип электровоза, масса состава  $m_c^{зад}$ , масса вагонов брутто (четырёхосные вагоны с роликовыми подшипниками)  $m_v$ , расчетный подъем  $i_p$  и заданное напряжение  $U_{зад}$ , выбираются студентом в табл.1 по предпоследней цифре учебного шифра (цифры, стоящие после обозначения специальности ЭНС). Если шифр состоит из одной цифры, то предпоследней следует считать ноль.

Приведенный и спрямленный профиль пути, включающий уклоны элементов  $i$  и их длины  $l$ , ограничение по скорости  $v_{огр}$  на элементе профиля заданы в табл.2 и 3. Данные табл.2 следует выбирать по последней цифре шифра, табл.3 - по предпоследней цифре.

Таблица 1

Предпоследняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип электровоза	ВЛ 10			ВЛ 60 <sup>к</sup>		ВЛ 11		ВЛ 80 <sup>к</sup>		
Масса состава $m_c^{зад}$ , Т	2900	3000	3100	3200	3600	3650	3700	3800	3900	4000
Масса вагонов $m_v$ , Т	72	74	75	76	78	80	81	82	83	84
Расчетный подъем $i_p$ , ‰	9	9	9	9	10	10	10	10	10	10
Заданное напряжение $U_{зад}$ КВ	2,6	3,6	23	28	2,5	2,7	3,5	22	23	27,5



2. Тяговые характеристики  $F_k(v)$  электровозов постоянного тока приведены на рис.1, 2. Токовые характеристики  $I_j(v)$  даны на рис.3, 4. Характеристики изображены при номинальном напряжении в тяговой сети  $U_n=3$  кВ.

Таблица 2

Длины элементов профиля пути, м

№ элемента профиля	Варианты (последняя цифра шифра)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	600	650	700	750	800	850	900	950	1000	1050
2	3050	1500	950	3200	500	800	2400	600	3050	1500
3	1500	950	3200	500	800	2400	600	3050	1500	950
4	950	3200	500	800	2400	600	3050	1500	950	3200
5	3200	500	800	2400	600	3050	1500	950	3200	500
6	500	800	2400	600	3050	1500	950	3200	500	800
7	800	2400	600	3050	1500	950	3200	500	800	2400
8	2400	600	3050	1500	950	3200	500	800	2400	600
9	600	3050	1500	950	3200	500	800	2400	600	3050
10	1400	1350	1300	1250	1200	1150	1100	1150	1000	950

Таблица 3

## Уклоны элемента профиля пути

№ элемента профиля	Варианты (предпоследняя цифра шифра)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	3.0	7.2	8.9	4.8	-12.1	1.3	-8.1	-1.9	3.0	7.2
3	-1.9	3.0	7.2	8.9	4.8	-12.1	1.3	-8.1	-1.9	3.0
4	-8.1	-1.9	-3.0	7.2	8.9	4.8	-12.1	1.3	-8.1	-1.3
5	1.3	-8.1	-1.9	3.0	7.2	8.9	4.8	-12.1	1.3	-8.1
6	-12.1	1.3	-8.1	-1.9	3.0	7.2	8.9	4.8	-12.1	1.3
7	4.8	-12.1	1.3	-8.1	-1.9	3.0	7.2	8.9	4.8	-12.1
8	8.9	4.8	-12.1	1.3	-8.1	-1.9	3.0	7.2	8.9	4.6
9	7.2	8.9	4.8	-12.1	1.3	-8.1	-1.9	3.0	7.2	8.5
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ограничение скорости, км/ч	40	40	40	40	45	45	45	50	50	50
На элементе №	5	6	7	8	9	5	6	7	8	9

*Примечание.* Ось начальной станции А считать в начале первого элемента профиля пути, ось конечной станции В - в конце десятого элемента.

Тяговые характеристики электровозов переменного тока показаны на рис.5,6, характеристики активной составляющей тока электровоза - на рис. 7, 8 для номинального напряжения в тяговой сети  $U_{\text{н}}=25\text{кВ}$

Можно пользоваться подобными характеристиками, приведенными в ПТР [3].

3. Нагрузка от оси на рельсы для каждого электровоза  $P_0 = 225 \text{ кН}$ .

4. Максимальная скорость движения электровозов  $V_{\text{max}}$ : для ВЛ10, ВЛ11, ВЛ60<sup>к</sup> - 100 км/ч, для ВЛ80<sup>к</sup> - 110 км/ч.

5. Допустимые скорости на спусках по условиям безопасности движения поезда приведены на рис.9.

## Оформление работы

Курсовую работу следует оформлять в виде расчетной записки и чертежей. Записку пишут на листах размером 203х288 только с одной стороны, оставляя слева и справа оставляются поля шириной 20 - 25 мм. Оформление следует производить в соответствии с требованиями ЕСКД (ГОСТ 2.105-68). На обложке записки нужно указать название дисциплины, курс, специальность, фамилию, имя, отчество и учебный шифр студента.

Все чертежи выполняются аккуратно тонкими линиями карандашом на миллиметровой бумаге или с помощью графических устройств компьютера. На осях координат необходимо указать деления, по которым можно определить численные значения приведенных величин. Рекомендуется применять нормальный ряд масштабов – 1,0; 2,0(2,5); 4,0; 5,0; 10,0 ед/мм и т.д. Чертежи необходимо приклеивать или прикреплять к записке.

Записка должна быть написана аккуратно, разборчиво без сокращения слов. Страницы должны быть пронумерованы, в конце указан список использованной литературы. После выполнения работы она отправляется на рецензирование. При наличии ошибок их можно исправлять на чистой стороне листа. При ошибках в чертежах делаются исправления на старом или выполняется новый чертеж, при этом старый сохраняется.

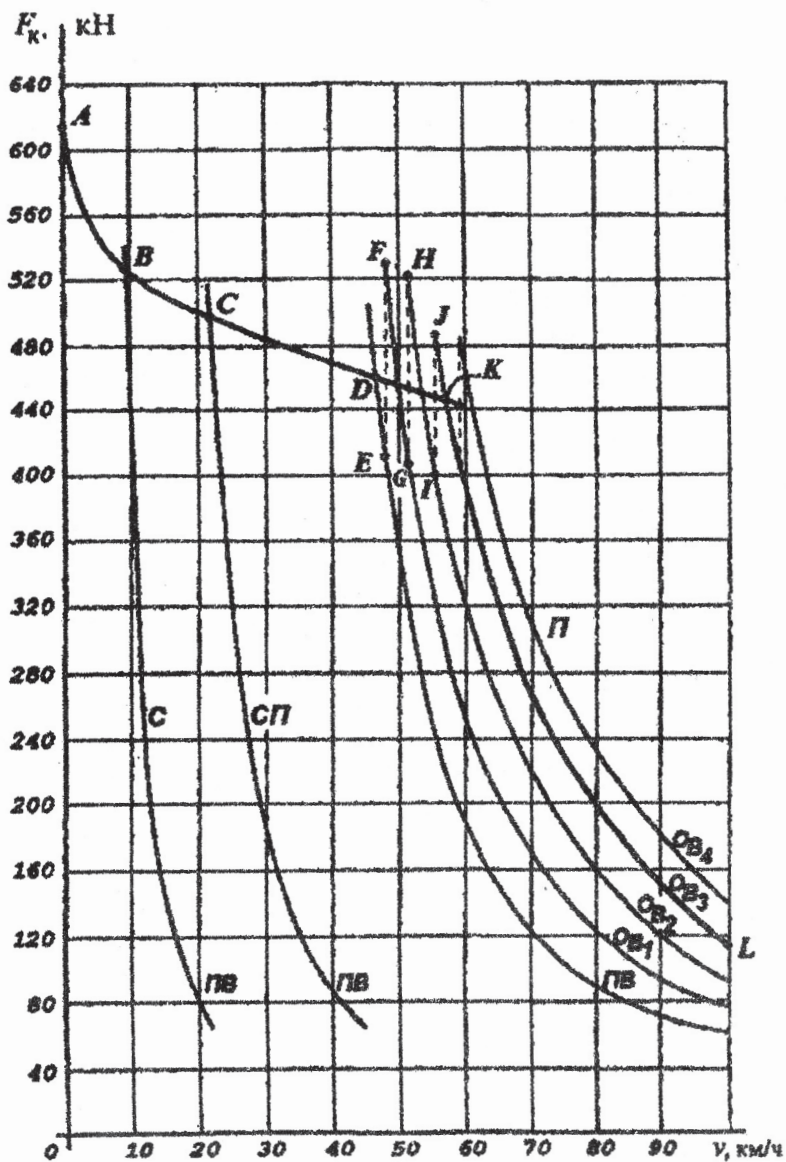


Рис. 1. Тяговые характеристики электровоза ВЛ 10

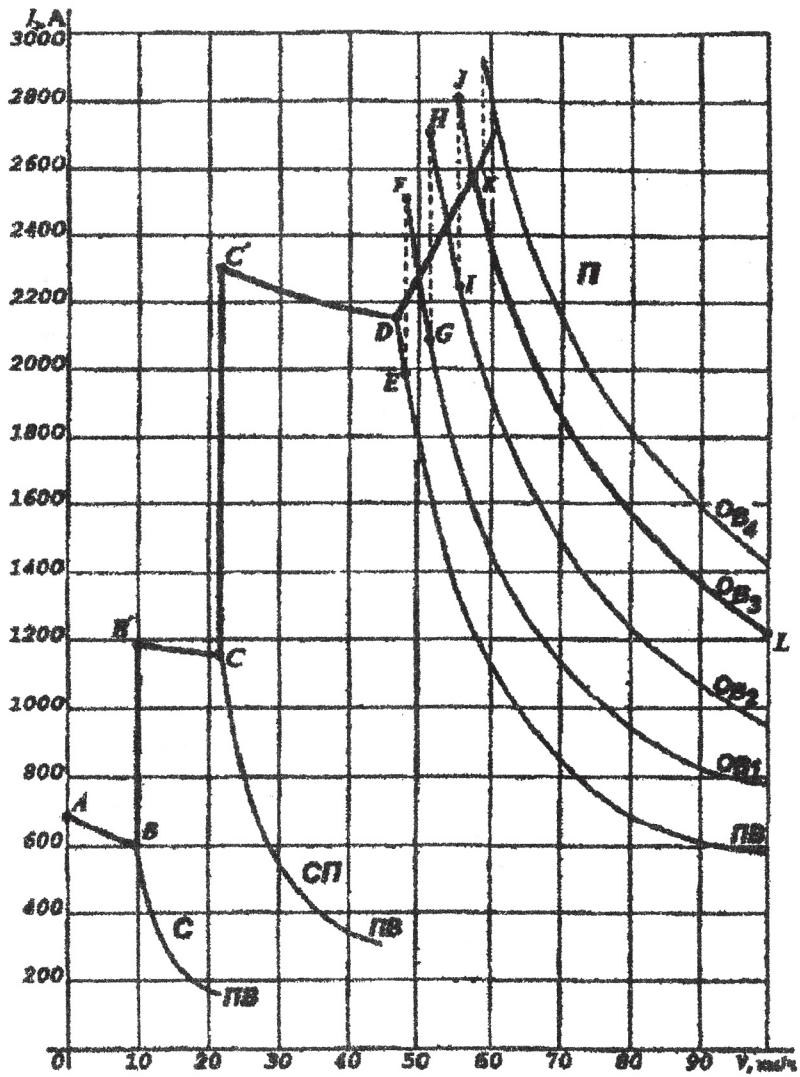


Рис. 2. Токвые характеристики электроваза ВЛ 10



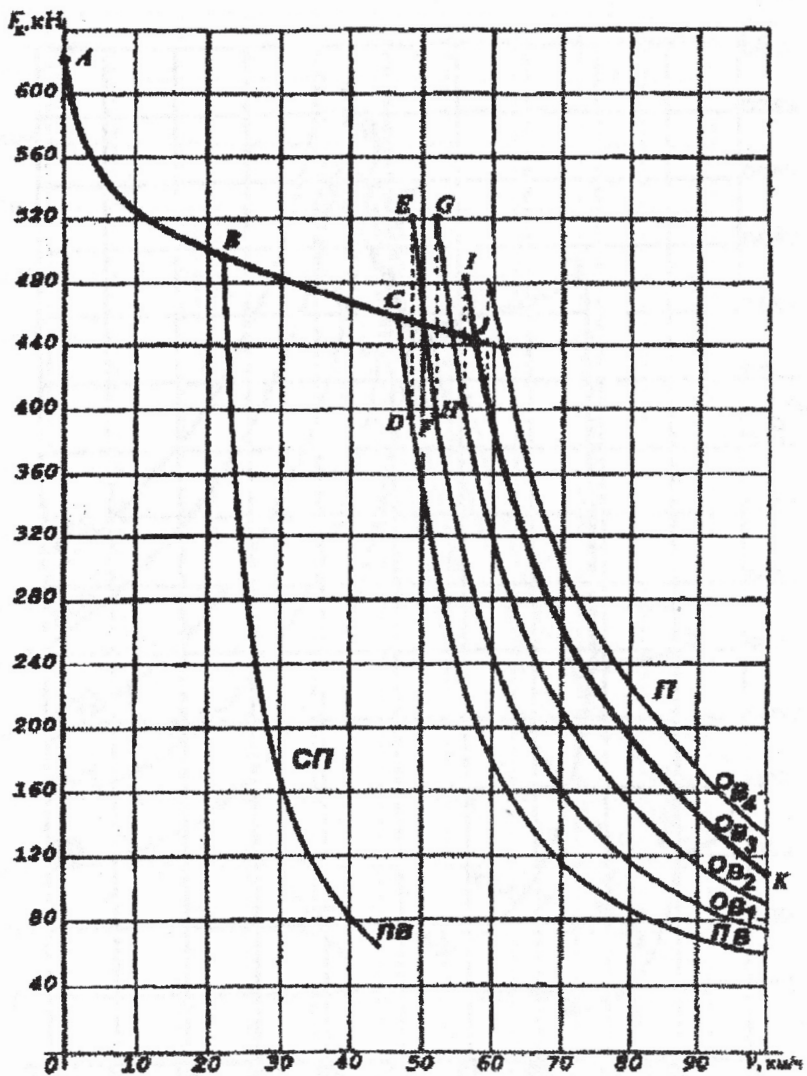


Рис. 3. Тяговые характеристики электровоза ВЛ 11 (2 секции)

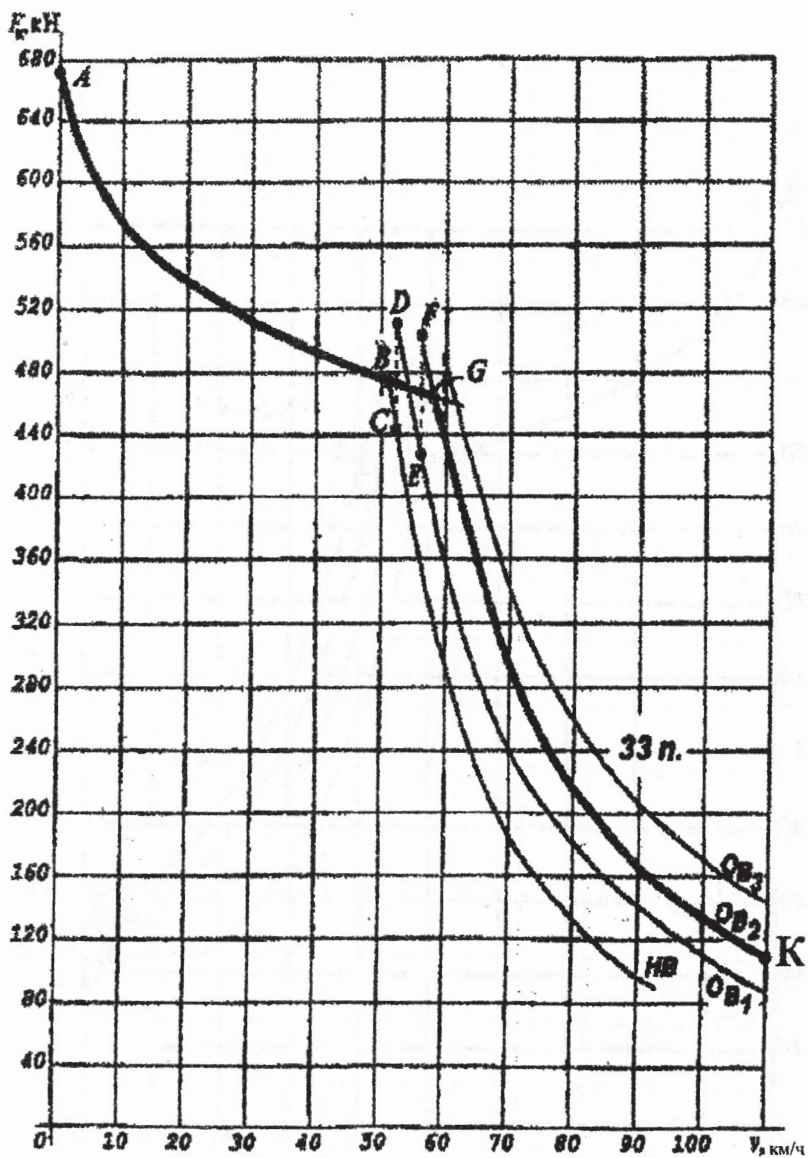


Рис.4. Токовые характеристики электровоза ВЛ11 (2 секции)

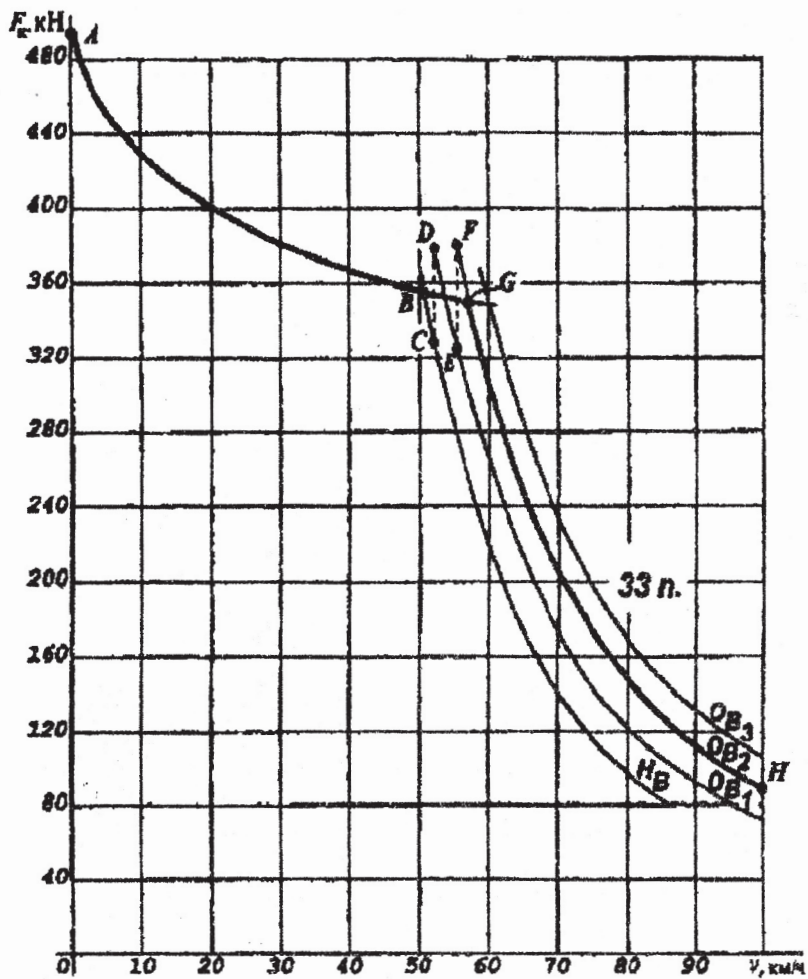


Рис. 5. Тяговые характеристики электровоза ВЛ60<sup>к</sup>

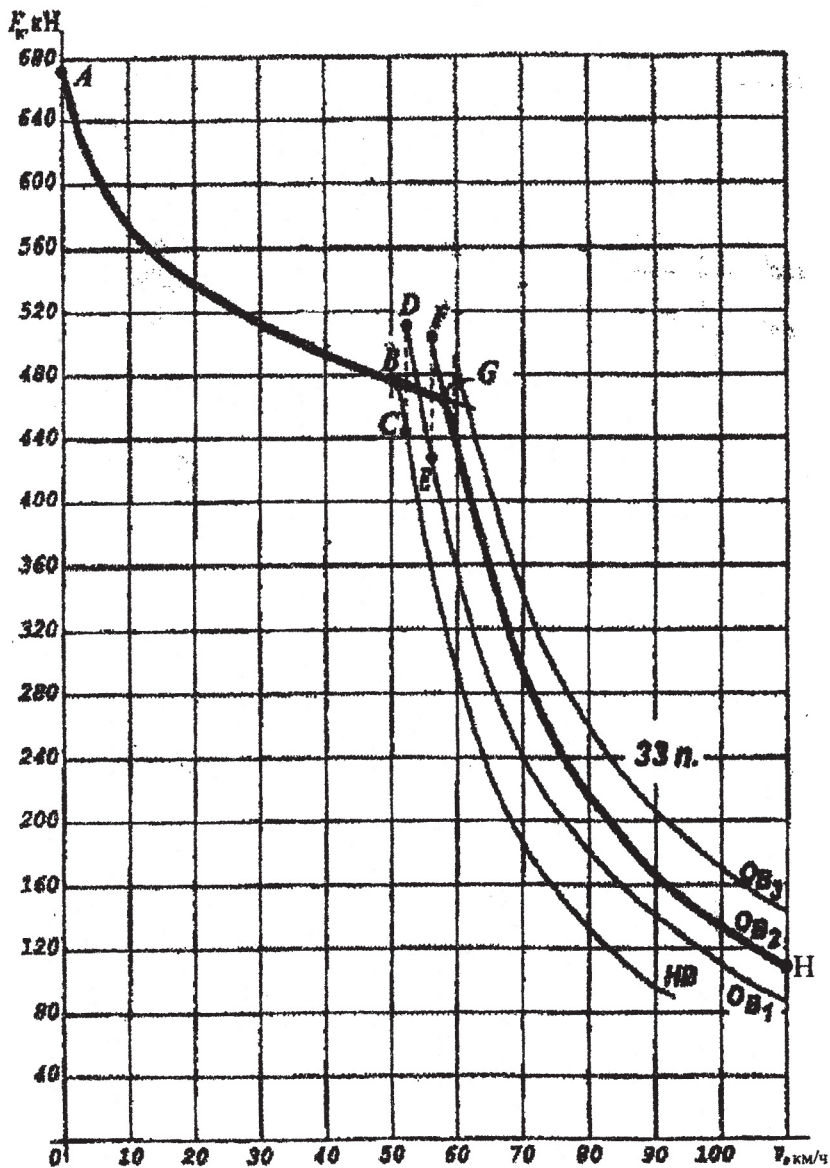


Рис. 6. Тяговые характеристики электровоза ВЛ80<sup>к</sup>

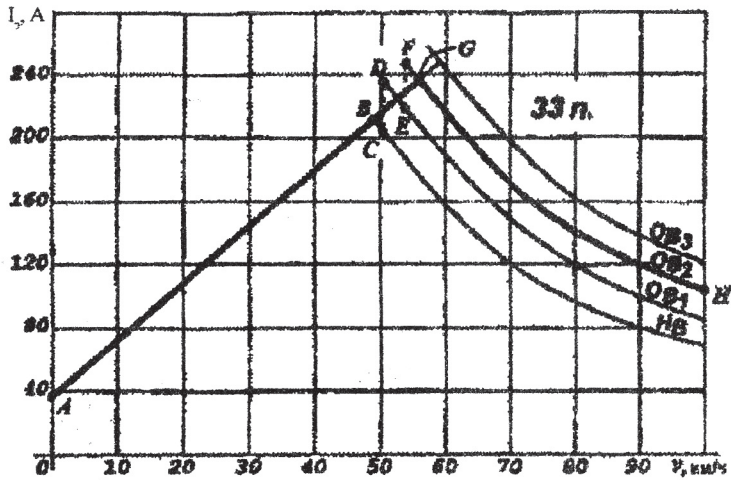


Рис. 7. Токвые характеристики электроваз ВЛ60<sup>к</sup>

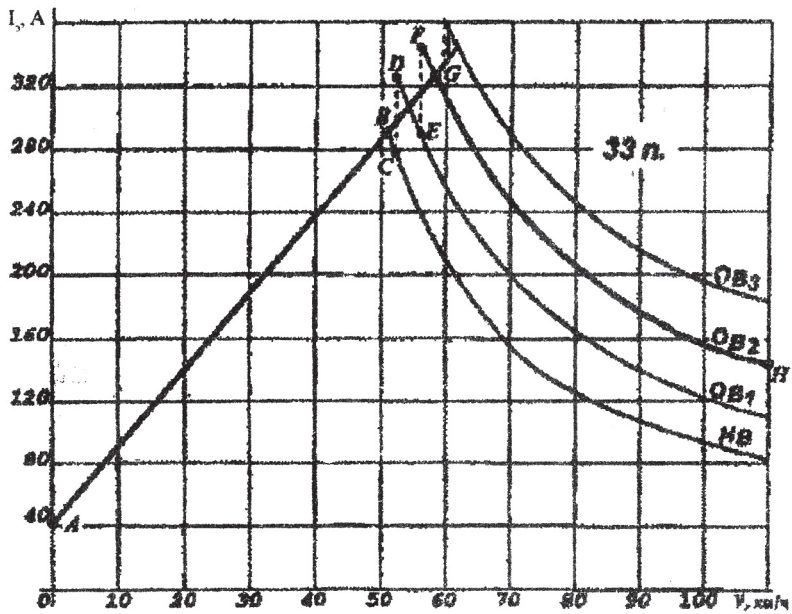


Рис. 8. Токвые характеристики электроваз ВЛ60<sup>к</sup>



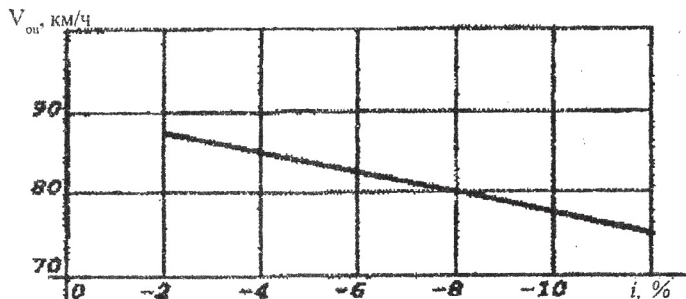


Рис. 9. Ограничение скорости на спусках

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

В начале работы необходимо привести исходные данные в соответствии с учебным шрифтом: численное значение величин, указанных в таблицах, и чертежи на миллиметровке формата А4, на которых изображают заданные тяговые и токовые характеристики электровозов.

Вычисления необходимо выполнять с точностью до трех-четырёх значащих цифр и в соответствии с рекомендациями [3]. При тяговых расчетах [3] принимать:

- 1) расстояния - в целых метрах для элементов профиля;
- 2) уклоны - в тысячных с одним знаком после запятой;
- 3) силу тяги, силы сопротивления и тормозные - с округлением до 500 Н;
- 4) удельные силы - в Н/кН с двумя знаками после запятой;
- 5) ток - с округлением до 5 А;
- 6) скорость - в км/ч с одним знаком после запятой;
- 7) масса состава (грузовые составы) - с округлением до 50 т;
- 8) расход электроэнергии - с округлением до 10 кВт·ч;
- 9) удельный расход электроэнергии - в кВт·ч/(т·км) с одним знаком после запятой;
- 10) перегонное время хода - до 0,1 мин. Размерности величин указаны в СИ.

После изучения теоретических положений о движении поезда можно приступить к расчетам. Движение поезда по участку может быть описано вторым законом Ньютона; результирующая сила, действующая на поезд, равна массе, умноженной на ускорение:  $F_y = m_n \cdot a$ . В поезде на поступательное движение всех частей накладывается вращательное движение колесных пар, якорей тяговых двигателей, элементов зубчатой передачи. Поэтому приведенная масса поезда  $m_n$ , в которой учтено влияние вращающихся частей, больше массы поезда при поступательном движении  $m$  и равна:  $m_n = m(1+g)$ . Коэффициент  $(1+g)$  различен для разных типов вагонов и электровозов. Для грузового поезда его определяют как средневзвешенную величину:  $(1+g) = 1,06$ .

В тяговых расчетах принято пользоваться удельной ускоряющей силой  $f_y = F_y/(mg)$  ( $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ), а ускорение представляют как производную скорости по времени. Тогда уравнение движения поезда будет иметь вид:

$$f_y \frac{\xi}{1+\gamma} = \frac{dv}{dt}, \quad (1)$$

где  $\xi$  - коэффициент, зависящий от принятых единиц измерения входящих в формулу величин.

Полученное уравнение является дифференциальным.

Это нелинейное уравнение, так как ускоряющая сила зависит нелинейно от скорости и от режима ведения поезда. В результате решения его могут быть получены искомые зависимости. Удельная ускоряющая сила в общем случае равна:

$$f_y = f - w_0 - i - b,$$

где  $f$  - удельная сила тяги;

$w_0$  - удельное основное сопротивление движению;

$i$  - удельное сопротивление от уклона и кривых (дополнительное);

$b$  - удельная тормозная сила.

При тяге и выбеге (то есть движении по инерции с отключенными двигателями)  $b=0$ , а при торможении и выбеге

$f = 0$ . Если  $f_y$  положительна, то скорость поезда увеличивается, если - отрицательна, то уменьшается; при  $f_y = 0$  скорость поезда неизменна (говорят, что поезд движется с установившейся скоростью). Основное сопротивление движению вызывается трением в подшипниках подвижного состава, трением качения колес по рельсам и сопротивлением воздуха. Его величина зависит от скорости движения поезда  $v$  и определяется по эмпирическим зависимостям, приведенным в [3]. Причем, для электровозов эти зависимости различны при движении под током и на выбеге.

Для определения ускоряющей силы необходимо знать ее составляющие и уметь их рассчитывать.

Далее пояснения излагаются в той последовательности, в которой они могут быть использованы для выполнения курсовой работы.

### 1. Проверка массы состава

Для проверки массы состава на заданном участке выбирается наиболее тяжелый для движения подъем. Если на нем скорость поезда будет уменьшаться и достигнет установившейся величины, то такой подъем берется для расчетов, и его называют расчетным. В курсовой работе задан участок 15 км, а реальный участок (или плечо локомотива) составляет 180 - 200 км, поэтому дополнительно указан расчетный подъем, по которому можно проверить массу состава. Условием проверки является движение поезда с постоянной (установившейся) скоростью, соответствующей расчетной силе тяги. Расчетная сила тяги соответствует точке выхода на ходовую характеристику локомотива, то есть предполагается, что в случае останова поезда на расчетном подъеме электровоз сможет разогнать поезд заданного веса до нормальных условий движения.

При этом расчетная сила тяги должна быть равна силам сопротивления движению:

$$F_{кр} = m_{л}g(w_0' + i_p) + m_{с}g(w_0'' + i_p),$$

где  $F_{кр}$  - расчетная сила тяги на ободу колеса локомотива (в точке выхода на ходовую позицию);

$m_n, m_c$  - массы локомотива и состава соответственно;  
 $w_0'$  - удельное основное сопротивление движению электро-  
 за под током;

$w_0''$  - удельное основное сопротивление движению состава;

$i_p$  - расчетный подъем.

Отсюда допустимая масса состава по условиям движения по  
 расчетному подъему будет

$$m_c^{доп} = \frac{F_{кр} - m_n g (w_0' + i_p)}{(w_0'' + i_p) g} \quad (2)$$

Расчетная сила тяги  $F_{кр}$  берется из тяговой характеристики для  
 заданного электроваза и равна наибольшему значению, соответствую-  
 щему ходовой позиции при полном (нормальном) возбуждении.  
 Для электровазов постоянного тока - точка  $D$  (ВЛ10), точка  $C$  (ВЛ11),  
 а переменного - точка  $B$ .

Масса локомотива

$$m_n = P_0 n / g, \quad (3)$$

где  $n$  - количество осей (6 у ВЛ60\*, 8 у остальных).

Удельное сопротивление движению электроваза под током,  
 Н/кН, равно [3]:

$$w_0' = 1,9 + 0,01v + 0,0003v^2. \quad (4)$$

Для состава, сформированного из четырехосных вагонов с  
 роликовыми подшипниками, величина  $w_0''$ , Н/кН, равна [3]:

$$w_0'' = 0,7 + (3 + 0,1v + 0,0025v^2) / m_{во}, \quad (5)$$

где  $m_{во}$  - масса вагона, приходящаяся на одну ось,

$$m_{во} = m_{в} / n_{ос} = m_{в} / 4. \quad (6)$$

Итак, порядок проверки массы состава по условию движения  
 поезда по расчетному подъему следующий:

1.1. По тяговой характеристике заданного электроваза  
 определяется тяговое усилие  $F_{кр}$  и скорость  $v_p$  в расчетной точке ( $D$ ,  
 $C$  или  $B$  - см. выше).



1.2. Определяется масса локомотива  $m_n$  по (3) (с округлением до 1 т).

1.3. По (4),(5) и (6) определяются  $w_0'$  и  $w_0''$  для найденного значения скорости  $v_p$ .

1.4. Определяется  $m_c^{\text{доп}}$  по (2).

Полученную массу состава  $m_c^{\text{доп}}$  сравнивают с заданной. Должно быть  $m_c^{\text{зад}} < m_c^{\text{доп}}$ , тогда в дальнейших расчетах принимают массу состава  $m_c = m_c^{\text{зад}}$ . В противном случае масса состава принимается равной допустимой расчетной:  $m_c = m_c^{\text{доп}}$ .

## 2. Расчет удельных характеристик

Удельными характеристиками являются зависимости: удельной силы тяги от скорости  $f(v)$ , удельного основного сопротивления от скорости  $w_0(v)$ , расчетной удельной силы тяги от скорости  $f_{\text{расч}}(v)$  и удельной тормозной силы от скорости  $b(v)$ . Эти характеристики необходимы для определения удельной ускоряющей силы  $f_y$  при решении уравнения (1).

Значения удельных сил тяги, Н/кН, рассчитываются по формуле

$$f = F_k / [(m_n + m_c) \cdot g], \quad (8)$$

Значения силы тяги  $F_k$ ,  $H$ , для заданного электровоза берутся по тяговым характеристикам по расчетной кривой, показанной жирной линией: для электровозов постоянного тока - *ABCDKL* (ВЛ10), *ABCJK* (ВЛ11), а переменного - *ABGH*. Начальная часть этой кривой соответствует пуску поезда с учетом ограничения по сцеплению и току, а далее - движению по рабочей автоматической характеристике. По ПТР [3] рабочей считается предпоследняя характеристика ослабления возбуждения (ослабления поля): для электровозов постоянного тока - *ОВ3*, для переменного - *ОВ2*. При этом точки, соответствующие переходу на различные ступени *ОВ* не учитываются, а заменяются усредненной линией: например, вместо ломаной *DEFGHIJK* для электровоза ВЛ10 берется прямая *DK*.

Значения  $f$  надо рассчитывать через интервалы  $\Delta v = 5+10$  км/ч. Необходимо также отметить точки, соответствующие переходу на новую группировку двигателей, - *B*, *C*, *D* для электровозов постоян-



ного тока и точку В для электровозов переменного тока (переход на расчетную позицию нормального возбуждения НВ), а также точки выхода на расчетную характеристику ОВЗ или ОВ2 - К (для ВЛ10), J (для ВЛ11) и G (ВЛ60<sup>к</sup>, ВЛ80<sup>к</sup>).

Удельное основное сопротивление движению поезда, Н/кН, рассчитывается по формуле

$$w_0 = (w_0' m_n + w_0'' m_c) / (m_n + m_c), \quad (9)$$

Составляющие  $w_0'$  и  $w_0''$  определяются по ранее приведенным формулам (4) и (5) для тех же значений скорости  $v$ , что и при расчете  $f$ . Полученная зависимость соответствует движению электровоза под током, т.е. в режиме тяги.

В режимах выбега и торможения, при отключенных двигателях, удельное основное сопротивление движению поезда, Н/кН, будет равно:

$$w_{0x} = (w_x' m_n + w_0'' m_c) / (m_n + m_c), \quad (10)$$

где  $w_x'$  - удельное основное сопротивление движению электровоза без тока, Н/кН:

$$w_x' = 2,4 + 0,11v + 0,00035v^2. \quad (11)$$

Расчетная удельная характеристика силы тяги, используемая в тяговых расчетах, определяется как разность двух построенных кривых: удельной характеристики силы тяги и удельного основного сопротивления движению поезда:

$$f_{\text{расч}} = f - w_0. \quad (12)$$

Зависимость  $f_{\text{расч}}(v)$  можно рассчитать для тех же значений скорости, для которых имеются значения  $f$  и  $w_0$ , найденные ранее. Удельная тормозная сила при экстренном торможении, Н/кН, определяется по формуле

$$b_{\tau} = 1000 \varphi_{\text{кр}} \theta_p, \quad (13)$$

где  $\varphi_{\text{кр}}$  - расчетный коэффициент трения колодки о бандаж:

$$\varphi_{кр} = 0,27 \frac{100 + v}{100 + 5v}, \quad (14)$$

$\theta_p$  - расчетный тормозной коэффициент.

В соответствии с ПТР [3] в грузовых поездах на спусках до  $20^\circ/_{00}$  тормозную силу электровоза и его вес в расчет не принимают. Тогда

$$\theta_p = 68,7 n_{ваг} n_{ос} / (m_c g). \quad (15)$$

Количество вагонов  $n_{ваг}$  можно определить по массе состава, разделив его на массу вагона и округлив до ближайшего целого. Количество осей в каждом вагоне  $n_{ос} = 4$ .

При торможениях перед станциями и на уклонах используют служебное торможение, при котором удельная тормозная сила

$$b = 0,5 b_r. \quad (16)$$

При выполнении курсовой работы следует рассчитать точки характеристик: удельной силы тяги  $f(v)$ , удельного основного сопротивления  $w_0(v)$  и расчетной удельной силы тяги  $f_{расч}(v)$ . Необходимо также составить таблицу зависимости тока электровоза  $I_3(v)$  для последующего ее использования при проведении тягового расчета на ЭВМ. Характеристики удельной тормозной силы  $b(v)$  и удельного основного сопротивления движению без тока  $w_{ок}(v)$  будут рассчитываться автоматически на ЭВМ. Порядок расчета рекомендуется следующий:

2.1. Для заданного электровоза по тяговым характеристикам берутся значения силы тяги  $F_k$  (в Н), по расчетной кривой, показанной жирной линией, для всего диапазона изменения скорости от 0 до  $V_{max}$  через 5 или 10 км/ч; необходимо определить  $F_k$  также в характерных точках, указанных выше.

2.2. По (8) определить значения удельной силы тяги  $f$  для всех значений скорости, взятых в 2.1.

2.3. Для тех же значений скорости определить удельное основное сопротивление  $w_0$  по (9); для этой цели рекомендуется составить

программу и решить ее на ЭВМ. К пояснительной записке приложить распечатку программы и результатов расчета.

2.4. По (12) рассчитать точки характеристики расчетной удельной силы тяги  $f_{\text{расч}}(v)$ .

2.5. По токовой характеристике заданного электровоза определить значения тока  $I_3$  при тех же значениях скорости.

2.6. Зависимости  $w_0(v)$  и  $f_{\text{расч}}(v)$  построить на листе миллиметровки формата А4.

В пояснительной записке можно подробно привести расчет только одной точки  $f_{\text{расч}}$ , а остальные результаты представить в табл. 4.

Таблица 4

$v$ , км/ч		0	...	$V_{\text{max}}$
$F_k$ , Н				
$f$ , Н/кН				
$w_0$ , Н/кН				
$f_{\text{расч}}$ , Н/кН				
$I_3$ , А				

### 3. Пересчет характеристик на заданное напряжение

Заданные кривые: зависимости силы тяги от скорости  $F_k(v)$  и тока электровоза от скорости  $I_3(v)$  при движении по автоматическим характеристикам построены для номинального напряжения  $U_n$ . При изменении напряжения в тяговой сети они изменяются. Одной и той же силе тяги и току электровоза при другом напряжении, например при заданном  $U_{\text{зад}}$  будет соответствовать другая скорость [1; 2]:

$$v_{\text{зад}} = (E_{\text{зад}}/E_n)v \approx (U_{\text{зад}}/U_n)v, \quad (17)$$

где  $E_{\text{зад}}$  и  $E_n$  - ЭДС тяговых двигателей при заданном и номинальном напряжениях соответственно.

Если напряжение  $U_{\text{зад}}$  меньше номинального, то характеристики сдвигаются влево, а при  $U_{\text{зад}} > U_n$  - вправо. В режиме пуска (разгона) поезда ход тяговой характеристики определяется ограничениями по току двигателя или по сцеплению колес с рельсами, поэтому на эту



часть расчетной кривой  $F_k(v)$  напряжение влияния практически не оказывает. Таким образом, для построения расчетной тяговой характеристики при  $U_{зад}$  достаточно найти по (17) новые значения скорости участков  $KL$  (для ВЛ10),  $JK$  (для ВЛ11) и  $GH$  (ВЛ60\*, ВЛ80\*) при тех же значениях  $F_k$ , что и на исходных кривых. При этом точки выхода на автоматическую характеристику ( $K$ ,  $J$  и  $G$  - соответственно) должны располагаться на исходной ветви пускового участка характеристики (или на ее продолжении при  $U_{зад} > U_H$ ).

У токовых характеристик  $I_3(v)$  во всех точках следует пересчитать значения скорости по (17), за исключением, разумеется, точки  $A$ , в которой  $v=0$ .

Пересчет точек характеристик рекомендуется выполнить в следующей последовательности, используя таблицу 5:

3.1. Переписать из табл.4 значения  $F_k$ , взятые с исходных тяговых характеристик, только для участка автоматической характеристики.

3.2. Пересчитать по (17) все значения скорости из табл.4 и занести их в табл.5.

Таблица 5

$v_{зад}$	км/ч	0	...	$v_{зад\ max}$
$F_{кз}$	Н			
$f_2$	Н/кН			
$w_{0,2}$	Н/кН			
$f'_{расч}$	Н/кН			
$I_3$	А			

3.3. Построить другим цветом на миллиметровке, содержащей исходную тяговую характеристику, новую зависимость  $F_k(v_{зад})$ :

а) скопировать пусковой участок  $AK$ ,  $AJ$  или  $AG$  (в зависимости от типа электровоза) с задания, продлив кривую, если  $U_{зад} > U_H$ ;

б) по полученным в п. 3.1 и 3.2 данным построить участок автоматической характеристики. Найти графически точку пересечения кривых а) и б), откорректировать в таблице значения  $v_{зад}$  и  $F_k$  для этой точки. По полученному графику определить

остальные значения  $F_k$  на участке пуска для найденных в п. 3.2 значений  $v_{\text{зад}}$ .

3.4. По (8) определить значения удельной силы тяги  $f$ .

3.5. По построенной в 2.6 зависимости определить значения  $w_0$  для  $v_{\text{зад}}$ .

3.6. Аналогично п. 2.4 рассчитать точки характеристики расчетной удельной силы тяги при заданном напряжении  $f'_{\text{расч}}(v)$  и построить ее на том же графике, что и кривые п. 2. 6.

Перенести значения тока  $I_3$  из табл. 4 в табл. 5, по полученным данным на том же чертеже, где исходная зависимость, построить другим цветом  $I_3(v_{\text{зад}})$ .

#### 4. Расчет кривых движения поезда

Кривые движения поезда, то есть зависимости  $v(s)$  и  $t(s)$ , рассчитываются путем интегрирования дифференциального уравнения (1). Это уравнение с разделяющимися переменными:

$$dv = \frac{\xi f_y}{1 + \gamma} dt. \quad (18)$$

Если обозначить  $\zeta = \xi/(1 + \gamma)$  и заменить бесконечно малые приращения конечными, получим:

$$\Delta v = \zeta f_y \Delta t. \quad (19)$$

Выражение (19) используется непосредственно в расчетах.

Чтобы определить пройденный за время  $\Delta t$  путь, выразим скорость через путь  $s$  и время  $t$ :  $v = ds/dt$ . Заменив приращения конечными и считая, что скорость на интервале  $\Delta t$  изменяется линейно, получим:

$$\Delta s = \zeta' (v_0 + v/2) \Delta t, \quad (20)$$



где  $\xi'$  - коэффициент, зависящий от принятых единиц измерения, входящих в формулу величин;  $v_0$  - скорость в начале рассматриваемого интервала  $\Delta t$ .

В данной работе принято  $f_y$  измерять в Н/кН, время в минутах, скорость в км/ч, а путь - в метрах; с учетом принятого ранее значения  $(1+\gamma)=1,06$  получим  $\xi=2,0$ , а  $\xi'=16,67$ . Для получения результатов с достаточной точностью при расчетах следует принять  $\Delta t = 0,01$  мин.

В курсовой работе основной объем вычислений по расчету кривых движения выполняется во время лабораторной сессии с помощью специальной диалоговой программы для ЭВМ. Программа производит интегрирование уравнения движения по (19), (20) и выводит результат на дисплей пошагово, через каждые 50 м. На каждом шаге, в зависимости от ситуации, студент задает режим движения "тяга", "выбег" или "торможение" для следующего шага. По заданному режиму программа определяет в начале каждого интервала  $\Delta t$  значение  $f_y = f - w_0 - i - b$ , используя информацию о составе, удельной тяговой характеристике, местоположении поезда и профиле участка. Величины, зависящие от скорости, берутся по ее значению  $v_0$  в начале интервала  $\Delta t$ .

Выбор режима движения на каждом шаге должен осуществляться с таким расчетом, чтобы поезд прошел участок возможно быстрее, но скорость его на элементах профиля с ограничениями не должна выходить за эти ограничения. Необходимо также обеспечить остановку поезда в конце участка.

Обычно режим тяги используется на протяжении всего элемента профиля: а) при разгоне поезда на подъеме, площадке или небольшом спуске (до  $-2 \text{ ‰}$ ); б) при движении на подъем со скоростью, близкой к установившейся.

Режим выбега нужно использовать при движении на небольших подъемах, площадках и спусках со скоростью, близкой к установившейся.

Торможение применяется при приближении к участкам, имеющим ограничения скорости и перед конечной станцией, а также кратковременно на спусках (подтормаживание).

Построение кривых движения при следовании по элементам профиля с ограничениями скорости имеет следующие особенности.

Если ограничение задано на участке, близком к горизонтальному или на подъеме, в реальных условиях машинист выбирает одну из низших позиций, при которой напряжение на тяговых двигателях существенно меньше и поезд идет примерно с постоянной скоростью. Так как тяговые расчеты ведутся по расчетной характеристике, обеспечивающей максимальное использование мощности локомотива, при пониженной скорости поезд будет ускоряться. Поэтому, двигаясь по ограничению, нужно чередовать режимы тяги и выбега: при тяге позволить поезду разогнаться до скорости, заданной ограничением, затем перейти на выбег; на выбеге сделать несколько шагов, чтобы скорость снизилась примерно на 5 км/ч, после чего сделать несколько шагов в тяге, пока она снова не достигнет ограничения и т. д.

На крутых спусках поезд разгоняется и в режиме выбега. Поэтому на таких элементах профиля нужно чередовать режимы выбега и торможения по тому же принципу: выбег - до скорости, заданной ограничением, затем - торможение, снижающее скорость на 5 км/ч, снова выбег и т.д.

При работе с программой имеется возможность "вернуться" на любое число шагов с тем, чтобы выбрать более рациональный режим ведения поезда.

Расчет точек для построения кривых движения нужно выполнить в следующем порядке:

4.1. Приняв начальную скорость  $v=0$  и начальную координату поезда  $s=0$  (в начале участка), по формулам (19), (20) рассчитать первые три-четыре точки зависимостей  $v(s)$  и  $t(s)$ . При этом принимать  $\Delta t=0,01$  мин., а ускоряющую силу брать по зависимости  $f_{\text{расч}}(v)$ , построенной для номинального напряжения:

$$f_v = f_{\text{расч}}(v) - i. \quad (21)$$

4.2. На листе миллиметровой бумаги размером примерно 800x300 мм приготовить координатные оси: а) абсцисс -  $s$ , взяв масштаб 200 м/см; б) ось ординат -  $v$  с масштабом 5 км/ч на см;

в) ось ординат -  $t$  с масштабом 1 мин./см; г) ось ординат -  $I_3$  с масштабом, выбранным так, чтобы максимальный ток электровоза (по токовым характеристикам) составлял от 10 до 20 см.

4.3. Под осью абсцисс обозначить границы элементов профиля, величины и направления уклонов на них, в соответствии с заданием. На элементах, имеющих ограничения скорости, показать эти ограничения в виде горизонтальных линий, расположенных на уровне соответствующих  $v_{\text{огр}}$ .

4.4. Во время лабораторной сессии рассчитать на ЭВМ зависимости  $v(s)$ ,  $t(s)$  и  $I_3(s)$  для номинального напряжения, построить их в осях координат, приготовленных в п.4.2. Распечатку результатов с ЭВМ вклеить в пояснительную записку. Сравнить результаты, полученные на ЭВМ, с расчетом п.4.1.

4.5. Рассчитать на ЭВМ зависимости  $v(s)$ ,  $t(s)$  и  $I_3(s)$  для заданного напряжения, построить их в тех же осях координат (другим цветом или другим видом линий), приложить распечатку.

## 5. Расчет обобщенных параметров

В результате расчета на ЭВМ получают величины времени хода по участку  $t_{\text{уч}}$  (последнее значение функции  $t$ ) и расхода электроэнергии на тягу поезда по участку  $A_T$  (последнее его значение). Эти данные позволяют рассчитать обобщенные параметры, отдельно для тягового расчета при номинальном и при заданном напряжениях:

5.1. Техническая скорость  $v_{\text{техн}}$  [км/ч] определяется по формуле:

$$v_{\text{техн}} = 60 \cdot s_{\text{уч}} / t_{\text{уч}} \quad (22)$$

где  $s_{\text{уч}} = 15$  км - длина участка.

5.2. Удельный расход электроэнергии [Вт·ч/(т·км)], то есть расход электроэнергии на перемещение 1 т массы состава на расстояние 1 км:

$$a_{\text{уд}} = A_T \cdot 10^3 / (m_c \cdot s_{\text{уч}}) \quad (23)$$

## 6. Оценка влияния уровня напряжения на движение поезда

По данным задания и результатам расчетов дать ответы на следующие вопросы:

6.1. На сколько процентов отличается заданное напряжение от номинального (увеличение считать положительным, уменьшение отрицательным)?

6.2. На сколько процентов изменилась техническая скорость при изменении напряжения? Чем объяснить отсутствие пропорциональности между напряжением и технической скоростью, в отличие от (17)?

6.3. На сколько процентов изменился удельный расход энергии при изменении напряжения? Как объяснить полученный результат?

Контрольные вопросы к курсовой работе

1. Каков физический смысл проверки массы состава?
2. Какие физические явления создают основное сопротивление движению поезда? дополнительное сопротивление?
3. Какие силы воздействуют на поезд: а) в режиме тяги? б) на выбеге? в) при торможении?
4. Из каких участков формируется расчетная тяговая характеристика электровоза?
5. Как влияет напряжение в тяговой сети на установившуюся скорость движения поезда?
6. Определите по одной из имеющихся в работе характеристик установившуюся скорость движения поезда в тяге: а) на горизонтальном участке пути; б) на подъеме с заданным уклоном  $i$ . Какой характеристикой удобнее всего воспользоваться?
7. Каков должен быть уклон пути, чтобы Ваш поезд развил максимальную для его электровоза установившуюся скорость?



### **Рекомендуемая литература**

1. Электрические железные дороги: Учеб. для вузов ж.-д. трансп. / Под ред. А. В. Плакса и В. Н. Пушнина, - М.: Транспорт. 1993. - 280 с.
2. О с и п о в С. И. Основы электрической и тепловозной тяги. - М.: Транспорт. 1985. - 408 с.
3. Правила тяговых расчетов для поездной работы. - М.: Транспорт. 1985. - 287 с.



Ст. преп. З.А. Фомина

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЖЕЛЕЗНЫЕ ДОРОГИ

*Задание на курсовую работу № 1  
с методическими указаниями*

Редактор Г.В. Тимченко  
Компьютерная верстка Е.В. Старшинова

ЛР № 020307 от 28.11.91

Тип. зак. 318

Подписано в печать 31.01.2003. Гарнитура Times.

Усл. печ. л.

2,0 *допечатка.*

Тираж 300 экз.

Офсет

Формат 60×90<sup>1/16</sup>

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