

**12/5/4**

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

## **ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ**

**Задание на курсовой проект  
с методическими указаниями  
для студентов V курса**

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



**Москва — 2007**

Составители: канд. техн. наук, проф. С.И. Осипов  
ст. преп. Е.С. Гирина

Рецензент – канд. техн. наук, доц. С.И. Баташов

---

## ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ

Задание на курсовой проект с  
методическими указаниями

Редактор *Д.Н. Тихоньчев*  
Компьютерная верстка *Г.Д. Волкова*

---

Тип.зак.	Изд.зак. 87	Тираж 800 экз.
Подписано в печать 26.02.07	Гарнитура Newton	Формат 60 × 90 <sup>1</sup> / <sub>16</sub>
Усл.печ.л. 3,5		

---

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**

# ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

## СОДЕРЖАНИЕ

В курсовом проекте студент должен выполнить тяговые расчеты для грузового поезда с электровозом переменного или постоянного тока. Система электрической тяги — постоянного или переменного тока — выбирается по желанию студента с учетом системы, на которой он работает или предполагает работать.

По запросам студентов кафедры выдает отдельные задания на выполнение тяговых расчетов для моторвагонных электропоездов и для реальных участков пути длиной не менее 30 км.

В объем работ по выполнению курсового проекта входят:

1. Подготовка тяговых характеристик.
2. Выбор расчетного подъема и определение массы поезда для заданного типа электровоза и профиля звеньевоего пути с последующей проверкой прохождения его по наиболее крутому подъему.
3. Расчет и построение кривых удельных ускоряющих и замедляющих сил.
4. Решение тормозной задачи.
5. Расчет и построение кривых  $\vartheta(s)$  и  $t(s)$  для движения по участку в одном направлении от ст. А до ст. В с остановкой на промежуточной станции и без остановки на ней с учетом подхода к элементу, на котором задано ограничение скорости в разных режимах (с торможением и на выбеге).
6. Определение времени хода поезда по каждому перегону и участку в целом при всех вариантах движения поезда (с остановкой на промежуточной станции и без остановки; с подходом к месту ограничения скорости в режиме торможения и на выбеге).
7. Построение кривых токов  $I_3(s)$  для электровоза постоянного тока,  $I_{da}(s)$  для электровозов переменного тока при всех вариантах движения поезда. Построение кривой тока  $I_d(s)$  для электровоза переменного тока только для без-

остановочного движения и подхода к месту ограничения скорости с торможением поезда..

8. Расчет расхода электрической энергии на тягу поезда с учетом собственных нужд и удельного расхода по каждому перегону и участку в целом при всех вариантах движения поезда.
9. Расчет снижения расхода электрической энергии при движении поезда без остановки по сравнению с движением с остановками, а также при разных режимах подхода поезда к месту ограничения скорости.
10. Расчет использования мощности (нагревания) тяговых двигателей при движении поезда без остановок на промежуточных станциях.

## **Исходные данные**

1. Вариант задания студент выбирает из табл. 1 по двум последним цифрам учебного шифра и из табл.2 — по третьей от конца цифре шифра. В табл.1 две последние цифры шифра указаны в правой нижней части таблицы.

В табл.1 заданы:

по вертикали (в колонках 5 – 9):

- тип заданного электровоза переменного или постоянного тока;
- № варианта уклонов приведенного профиля пути, по которому студент находит в табл. 3 сами уклоны элементов;
- среднее потребление электроэнергии вспомогательными цепями электровоза (переменного или постоянного тока);

по горизонтали:

- № варианта длин элементов профиля пути, по которому студент находит в табл.4 сами длины элементов;
- процентное соотношение вагонов разных типов (по массе).

В табл. 2 приведены средняя масса груженых вагонов (брутто) и длины тормозных путей.

2. Скоростные  $\vartheta (I_d)$  и электротяговые  $F_{\text{кд}} (I_d)$  характеристики тяговых двигателей приведены на рис. 1, 2, 3. Нужный график студент может вырезать из методических указаний и вклеить в пояснительную записку.

3. Тепловые характеристики тяговых двигателей приведены на рис. 4, 5, 6. Их также можно вырезать из методических указаний и вклеить в пояснительную записку.

4. Максимальная скорость электровозов ВЛ80<sup>с</sup>  $\vartheta_{\text{max}} = 110$  км/ч, для остальных — 100 км/ч. В курсовом проекте  $\vartheta_{\text{max}}$  для всех электровозов можно принять равной 100 км/ч.

5. При расчетах коэффициентов трансформации тягового трансформатора напряжения холостого хода преобразователей установки электровозов переменного тока принимать:

- для электровоза ВЛ80<sup>с</sup> на 33-й позиции  $U_{\text{вон}} = 1100$  В, на 9-й позиции  $U_{\text{во}} = 319$  В;
- для электровоза ВЛ60<sup>к</sup> на 33-й позиции  $U_{\text{вон}} = 1855$  В, на 9-й позиции  $U_{\text{во}} = 493$  В;

При расчетах активной составляющей потребляемого тока принимать:

а) эквивалентное сопротивление цепи преобразовательной установки, приведенной к одному двигателю:

- для электровоза ВЛ80<sup>с</sup> на 33-й позиции  $R'_{\text{э1}} = 0,095$  Ом, на 9-й позиции  $R'_{\text{э2}} = 0,06$  Ом;
- для электровоза ВЛ60<sup>к</sup> на 33-й позиции  $R'_{\text{э1}} = 0,4$  Ом, на 9-й позиции  $R'_{\text{э2}} = 0,23$  Ом;

б) общее активное сопротивление цепи преобразовательной установки, приведенной к одному двигателю:

- для электровоза ВЛ80<sup>с</sup> на 33-й позиции  $R'_{\text{об1}} = 0,02$  Ом, на 9-й позиции  $R'_{\text{об2}} = 0,014$  Ом;
- для электровоза ВЛ60<sup>к</sup> на 33-й позиции  $R'_{\text{об1}} = 0,09$  Ом, на 9-й позиции  $R'_{\text{об2}} = 0,06$  Ом;

Коэффициент эффективности переменного тока можно принять равным единице ( $k_{\text{эф}} = 1$ ).

6. Напряжение на токоприемнике принять 3 кВ в системе постоянного тока, 25 кВ — в системе переменного тока.

Исходные данные по электровозам, составам и вариантам профиля пути

Другие данные	Тип заданного электровоза, количество и тип тяговых двигателей					
	ВЛ11 1 секция 4 тяговых двигателя ТЛ-2К или ВЛ80° 1 секция 4 тяговых двигателя НБ-418К	ВЛ10 8 тяговых двигателей ТЛ-2К или ВЛ80° 2 секции 8 тяговых двигателей НБ-418К	ВЛ10 <sup>У</sup> 8 тяговых двигателей ТЛ-2К или ВЛ60° 6 тя- говых двигателей НБ-412К	ВЛ11 3 секции 1 2 тяговых двигателей ТЛ-2К или ВЛ80° 3 секции 12 тяго- вых двигателей НБ-418К	2ВЛ10 16 тяговых двигателей ТЛ-2К или 2ВЛ60° 12 тяговых двигателей НБ-412К	
1	5	6	7	8	9	
Номер варианта для определения величин приведенных уклонов элементов профиля пути (см. табл. 3)	1	2	3	4	5	
Масса, проходящая на одну колесную пару электровоза, $m_{30}$ , т	23	23	25	23	23	
Постоянного тока	24	24	23	24	23	
Переменного тока						
Среднее потребление электроэнергии вспомогательными цепями за 1 мин., кВт · ч/мин:	1,04	2,08	2,08	3,12	4,16	
Электровоз постоянного тока	2,75	5,5	3,33	8,25	6,66	
Электровоз переменного тока						

Окончание табл. 1

Номер варианта для определения длины элементов профиля пути (см. табл. 4)	Последние две цифры учебного шифра				Последние две цифры учебного шифра студента				
	4-осные на роликовых подшипниках	6-осные на роликовых под- шипниках	8-осные на ро- ликовых по- дшипниках	4	5	6	7	8	9
1	2	3	4		5	6	7	8	9
1	80	10	10		01	02	03	04	05
2	55	10	35		06	07	08	09	10
3	80	5	15		11	12	– 13	14	15
4	85	5	10		16	17	18	19	20
5	60	20	20		21	22	23	24	25
6	70	15	15		26	27	28	29	30
7	55	10	35		31	32	33	34	35
8	65	10	25		36	37	38	39	40
9	75	15	10		41	42	43	44	45
0	70	20	10		46	47	48	49	50
0	60	15	25		51	52	53	54	55
9	75	10	15		56	57	58	59	60
8	90	5	5		61	62	63	64	65
7	85	5	10		66	67	68	69	70
6	60	10	30		71	72	73	74	75
5	75	5	20		76	77	78	79	80
4	85	10	5		81	82	83	84	85
3	80	10	10		86	87	88	89	90
2	70	10	20		91	92	93	94	95
1	75	5	20		96	97	98	99	00



Таблица 3

## Данные о спрямленном и приведенном профиле пути

№ элементов приведенного профиля пути	Величина приведенного уклона элемента профиля пути (по варианту первой строки табл.1) $i$ , ‰				
	1	2	3	4	5
Ст. А 1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	+3,4	+3,3	-4,2	-2,9	-5,0
3	-2,8	+6,8	+11,6	+7,8	+6,5
4	+4,8	+10,6	+3,0	+12,6	-3,5
5	-8,0	-7,4	+9,2	+4,2	+15,4
6	+ 8,7	-1,5	+4,8	-2,0	-3,2
Ст. Б 7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	+1,2	+4,6	+2,6	1,7	+3,6
9	+6,0	-2,0	+7,2	+6,3	+7,6
10	+ 8,3	+2,5	+11,3	+2,3	+14,8 -
11	+3,6	+10,9	+3,7	+5,3	-2,3
12	0,0	+3,0	-2,0	-1,2	+0,9
-13	-3,2	-1,4	+4,8	-7,6	-5,7
14	+4,3	+1,2	-9,6	+13,0	+3,1
15	+6,6	+5,1	+1,0	+3,6	-7,8
16	-6,8	-3,3	-2,3	-9,3	+6,3
Ст. В 17	0,0	0,0	0,0	00	0,0
Ограничение скорости, км/ч	50	50	40	50	40
На элементе профиля пути $N$	12	14	13	11	3

Длины элементов профиля пути

№ элементов профиля пути	Станция	Длина элементов профиля пути по варианту колонки 1 (табл.1)									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Станция А	1000	1200	1050	1100	1150	1250	1200	1000	1050	1300
2		1600	1000	1200	1650	1300	1700	1050	1800	1100	1050
3		1100	700	650	1200	650	950	750	1100	900	900
4		5900	5750	6050	5850	6250	6500	6100	6000	5200	5700
5		1450	1700	1150	1550	1650	1400	600	1200	1300	1500
6		950	1150	1400	1700	1400	1200	750	1300	1200	850
7	Станция Б	1500	1050	1400	1250	1500	1350	1200	1150	1100	1000
8		850	900	750	800	950	500	650	850	650	650
9		1500	1550	1600	1500	1650	1750	1600	1500	1800	1650
10		6150	6250	6050	5200	5300	5050	6450	5900	6100	5900
11		700	650	850	650	750	1150	800	850	1350	1050
12		1200	1050	1100	1200	1150	450	950	1150	800	900
13	1200	1250	1900	1100	1300	1300	1150	800	1050	1100	
14	850	850	650	900	850	1100	1500	500	700	1550	
15	1450	1200	950	1000	1150	1100	1250	1200	1800	1500	
16	900	950	700	850	750	600	750	800	1050	650	
17	Станция В	950	1100	1050	1400	1150	1000	1150	1100	1050	1150

Примечание. Ось станции А считать в начале первого элемента. Ось станции Б располагать посередине длины соответствующего элемента (№ 7). Ось станции В считать в конце элемента №17.

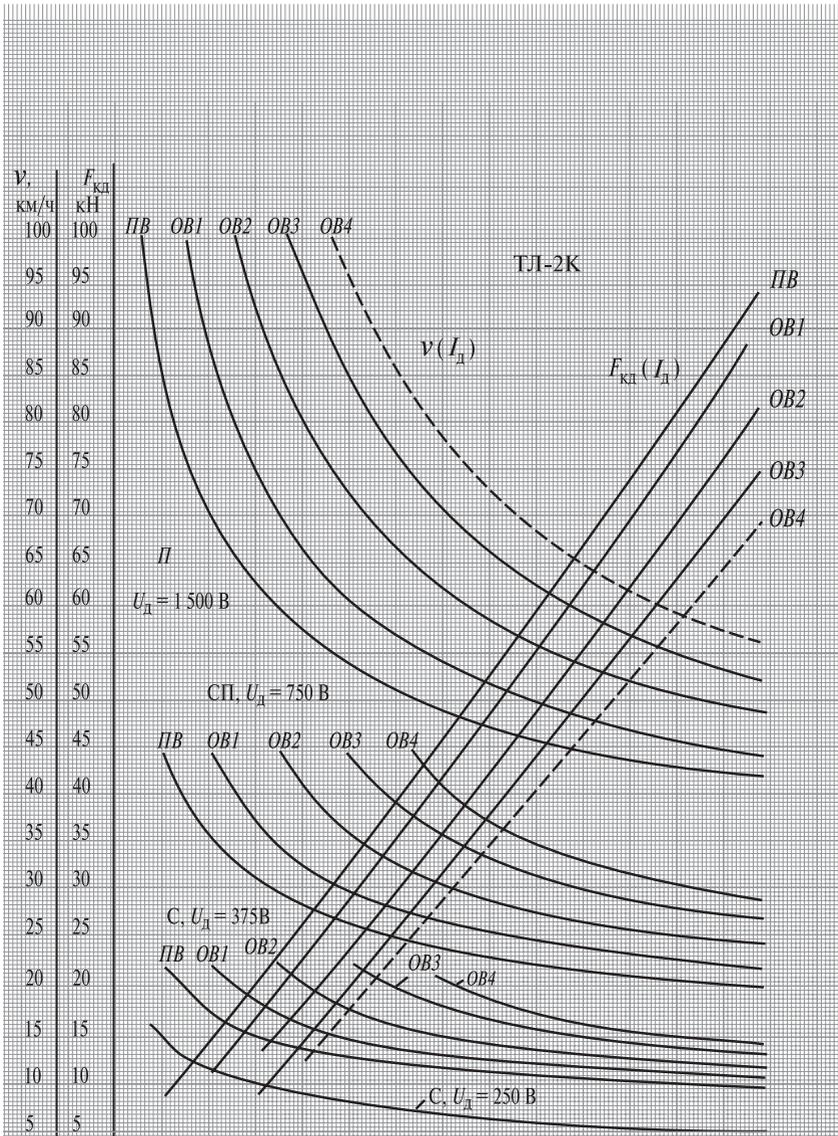


Рис. 1

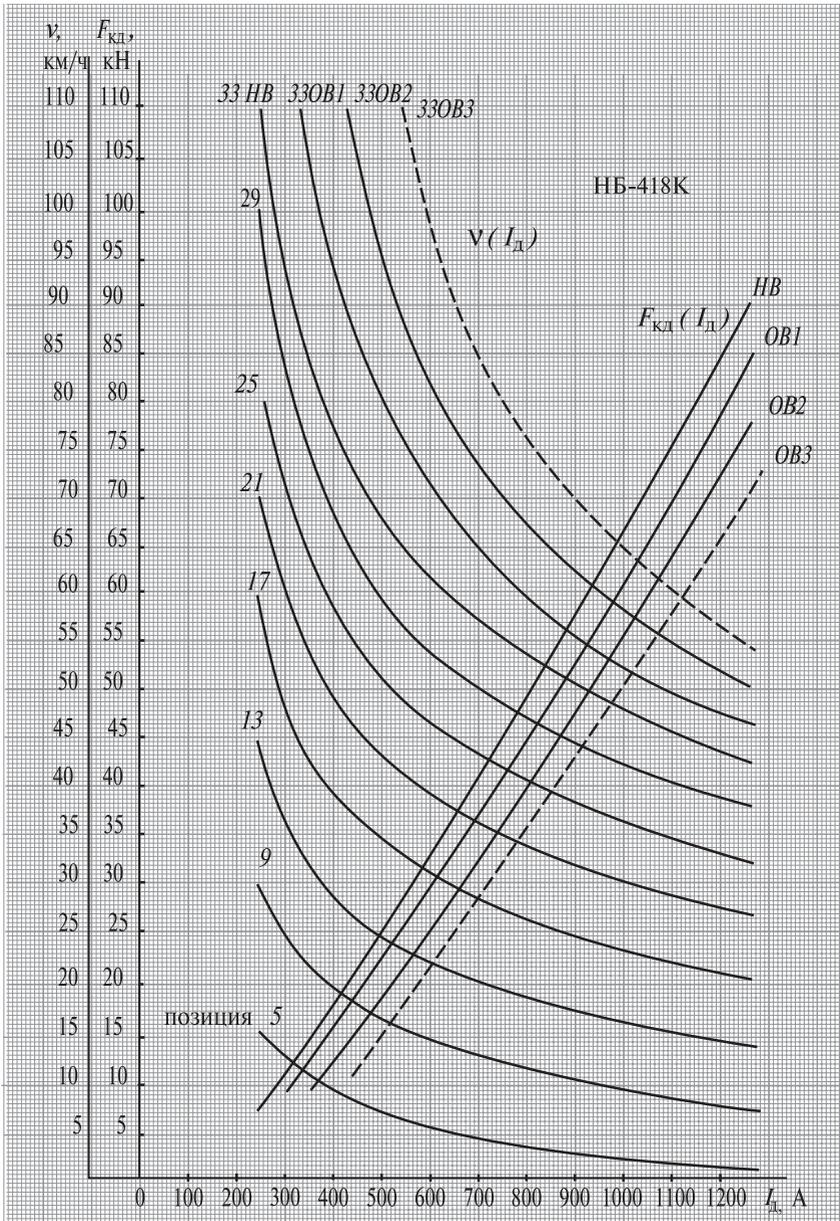


Рис. 2

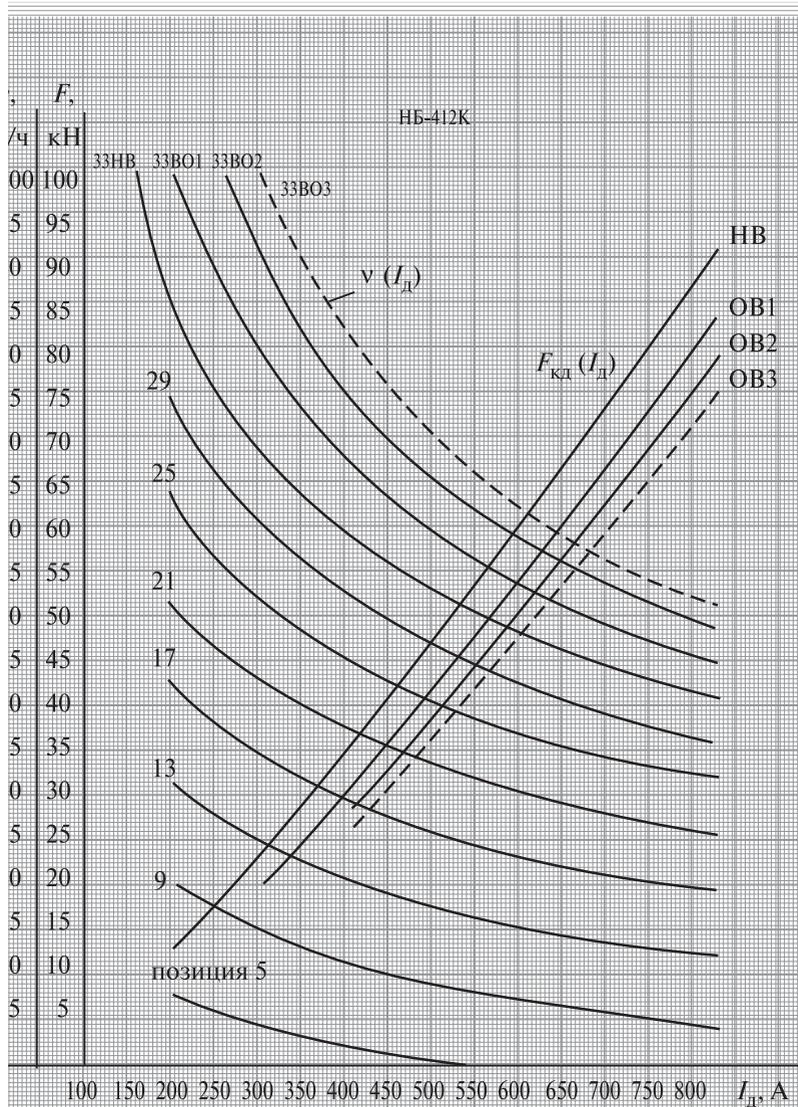


Рис. 3

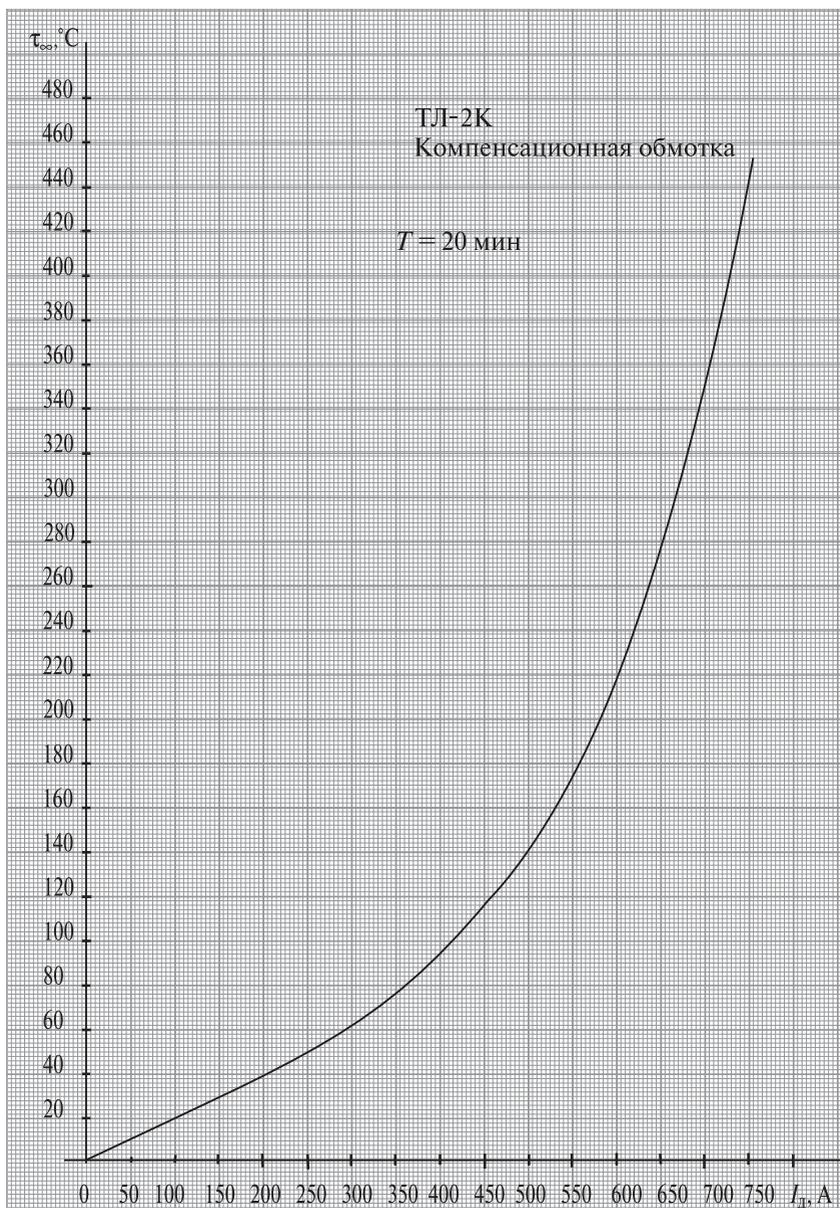


Рис. 4

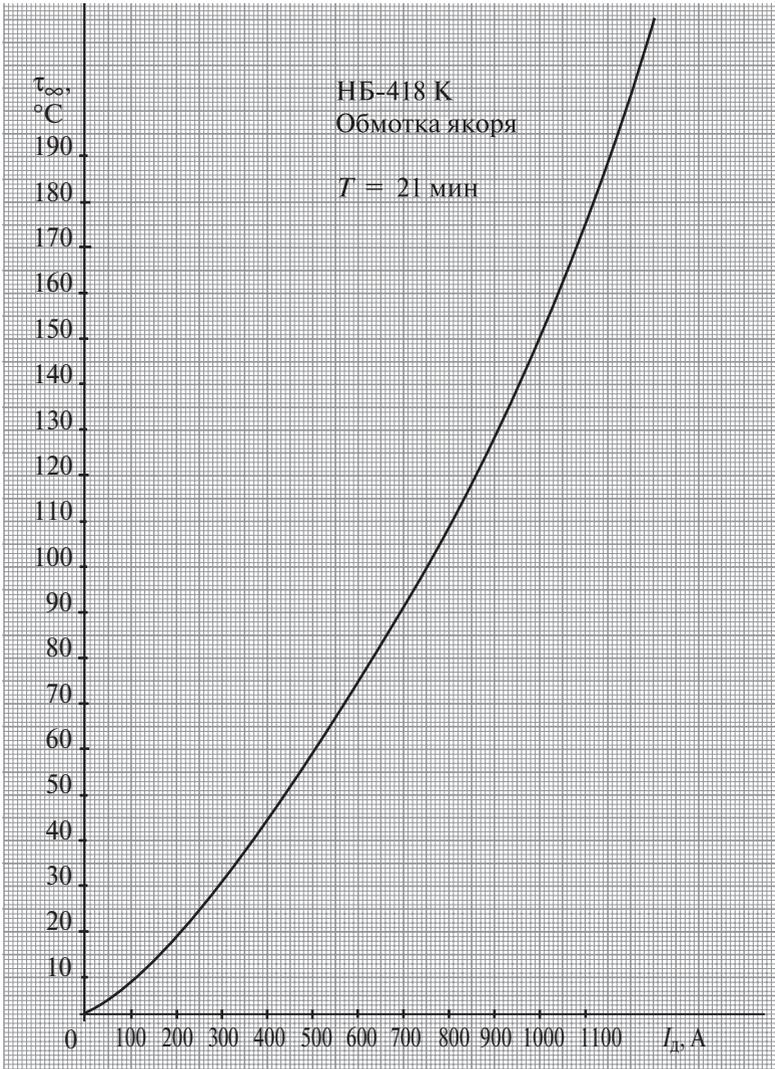


Рис. 5

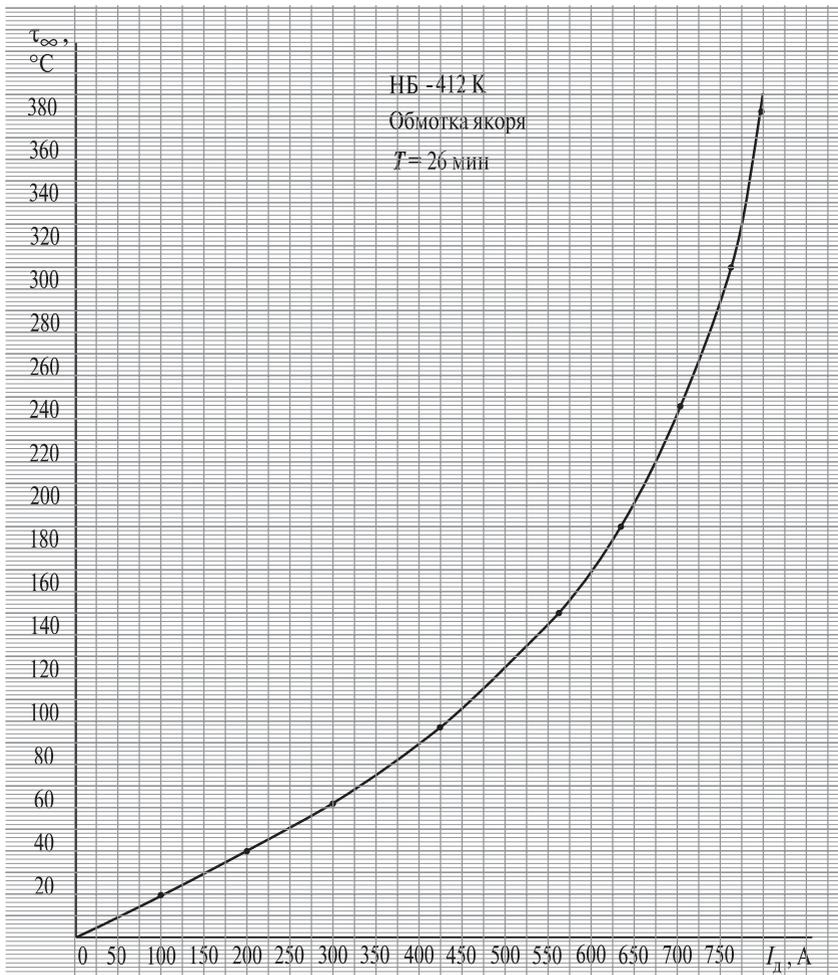


Рис. 6

## **ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА**

1. Чтобы грамотно выполнить и успешно защитить курсовой проект, студент должен глубоко изучить материал курса «Теория электрической тяги», четко представлять себе теоретические основы, физическую сущность и порядок проведения расчетов, осмысленно использовать расчетные формулы и анализировать получаемые результаты.

2. Проект состоит из расчетной записки и графиков к ней, оформленных с учетом требований ЕСКД (ГОСТ 2.105-79).

3. Расчетная записка пишется на одной стороне каждого листа. С правой стороны листа оставляются поля шириной 25–30 мм, с левой стороны поля для подшивки (15–20 мм).

На обложке записки нужно указать название учебной дисциплины, курс, специальность, по которым учится студент, фамилию, инициалы, учебный шифр и адрес студента

В начале расчетной записки указывают наименование курсового проекта, отражающее ее содержание, и выписывают из табл. 1–4 исходные данные в соответствии с цифрами шифра.

Проект выполняется в последовательности, указанной в методических указаниях, в которых весь материал разбит на разделы и шаги, имеющие сквозную нумерацию соответственно римскими и арабскими цифрами. В работе после приведения исходных данных достаточно указать номер раздела и его заголовки, а затем номер шага (без слова шаг) и его заголовок и проводить требуемые расчеты. При работе должны быть использованы рекомендуемая литература и материалы методических указаний.

В каждом шаге должны соблюдаться формы таблиц, графиков и требования к оформлению, изложенные в конце каждого шага методических указаний.

4. Записка должна быть написана аккуратно, разборчивым почерком, без сокращения слов.

5. В каждом разделе записки приводятся необходимые обоснования к выбору расчетных величин, рассуждения и расчетные формулы. Формулы пишутся в общем виде, после чего через

знак равенства численные выражения входящих в нее величин и результат.

6. Если на основании расчетной формулы заполняется таблица или графа (строка) таблицы, то записывается формула в общем виде и затем один раз приводится ее численное выражение и результат с указанием значения параметра, для которого результат получен. Например: расчетный коэффициент сцепления

$$\psi_{\kappa} = 0,28 + \frac{4}{50 + 6\vartheta} - 0,0006\vartheta.$$

При  $\vartheta = 50$  км/ч

$$\psi_{\kappa} = 0,28 + \frac{4}{50 + 6 \cdot 50} - 0,0006 \cdot 50 = 0,261.$$

7. К расчетной записке должны быть приложены следующие графики:

- а) скоростные  $\vartheta (I_{\text{д}})$  и электротяговые  $F_{\text{кд}} (I_{\text{д}})$  характеристики тягового двигателя. Эти характеристики разрешается взять из задания и вклеить в расчетную записку;
- б) тяговые характеристики электровоза;
- в) кривые удельных ускоряющих и замедляющих сил;
- г) графики решения тормозной задачи;
- д) токовые характеристики электровоза  $I_{\vartheta}$  для электровозов постоянного тока или  $I_{\text{да}}(\vartheta)$  для электровозов переменного тока;
- е) кривые скорости движения по участку  $\vartheta (s)$ , времени  $t (s)$  и токов  $I_{\vartheta} (s)$  для электровозов постоянного тока или  $I_{\text{да}} (s)$  и  $I_{\text{д}} (s)$  для электровозов переменного тока.

8. Все графики нужно выполнять карандашом на миллиметровой бумаге тонкими линиями. Для удобства построения и пользования графиками координатные оси нужно проводить по жирным линиям миллиметровой сетки. Расчетные точки, через которые проводятся линии графика, должны быть выделены в кривых.

9. При построении кривых удельных ускоряющих и замедляющих сил и графиков  $\vartheta (s)$  и  $t (s)$  необходимо строго соблюдать правильные соотношения масштабов. Остальные графики рекомендуется выполнять, используя нормальный ряд масштабов: 0,1; 0,2; 0,4; 0,5; 1,0; 2,0; 4,0; 5,0; 10,0 ед/мм и т.д.

10. Все таблицы и графики должны иметь сквозную нумерацию и размещаться после ссылки на них в тексте или на следующей странице (если выполнены на отдельных листах).

11. Все расчеты выполняются с точностью до четырех значащих цифр.

12. При выполнении расчетов необходимо использовать вычислительную технику — персональные компьютеры (ПК). При этом, кроме результатов расчета должны быть приложены необходимые пояснения, из которых было бы видно, что студент понял каждое действие при расчетах.

13. Все расчеты рекомендуется выполнять в Международной системе единиц (СИ), которая использована в рекомендуемой литературе [2; 3]. Однако в Правилах тяговых расчетов для поездной работы [1] формулы приведены в технической системе единиц, которая широко применялась в расчетах до конца 70-х годов. В этой системе за единицу силы принимают килограмм-силу — кгс (сила, сообщающая телу массой 1 кг ускорение  $9,81 \text{ м/с}^2$ ). В системе СИ используется единица силы 1 Н (сила, сообщающая телу массой 1 кг ускорение  $1 \text{ м/с}^2$ ). Для перевода силы из технической системы единиц в систему СИ необходимо учитывать соотношения:  $1 \text{ кгс} = 9,81 \text{ Н}$  и  $1 \text{ Н} = 0,102 \text{ кгс}$ .

14. Правильно выполненный проект возвращается студенту с указанием «Допущен к защите» и при необходимости — с перечнем замечаний, которые студент должен исправить к защите. Одновременно студенту выдается индивидуальное задание по анализу или критической оценке полученных результатов, определению более экономичных режимов работы электровоза на каком-либо перегоне, выявлению резервов по улучшению использования мощности электровоза и т.п. для более глубокой проработки основных вопросов теории электрической тяги поездов.

15. После получения отрецензированного проекта студент должен аккуратно исправить все ошибки и сделать требуемые дополнения. Для исправлений можно использовать обратную (чистую) сторону предыдущего листа.

При большом количестве исправлений на одной странице (или графике) ее нужно переписать (или переделать) и подклеить к странице с замечаниями рецензента. Первоначальный текст или график должен быть перечеркнут.

16. Выполнение перечисленных требований к оформлению является обязательным условием для допуска проекта к защите.

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА**

### **Раздел I**

#### **Расчет и построение тяговых характеристик и расчет ограничений**

##### ***Шаг 1. Пересчет тяговых характеристик***

Тяговые характеристики рассчитывают на основании скоростных  $\vartheta$  ( $I_d$ ) и электротяговых характеристик  $F_{кд}$  ( $I_d$ ), приведенных на рис. 1–3 [2, § 4.5, 3, § 2.6]. Студент выбирает тип электровоза (постоянного или переменного тока) и характеристики тягового двигателя в соответствии с учебным шифром; задаваясь различными токами, определяет для них из графика скорость движения  $\vartheta$ , силу тяги  $F_{кд}$ , развиваемую каждой колесной парой, и рассчитывает силу тяги электровоза  $F_k$  по формуле

$$F_k = F_{кд} n_{сц.осей}, \text{ кН}, \quad (1)$$

где  $n_{сц.осей}$  — число сцепных осей электровоза.

Для всех электровозов постоянного тока расчет проводится для характеристик параллельного соединения групп тяговых

двигателей ( $U_d = 1500$  В) при полном ПВ и трех ступенях ослабленного возбуждения ОВ1, ОВ2 и ОВ3 (характеристику ОВ3 называют расчетной). При более низких напряжениях на тяговых двигателях (СП и С) расчет ведут только для характеристик при полном возбуждении. У электровозов с четырьмя тяговыми двигателями ТЛ-2К на С – 750 В, с 8 и 16 двигателями: на СП 750 В и С 375 В, с 12 двигателями на СП 750 В и С – 250 В (на рис. 1 для этого напряжения показана одна нижняя характеристика  $\vartheta (I_d)$ ).

На электровозах переменного тока расчет тяговых характеристик выполняют для 33-й позиции при нормальном НВ и двух ступенях ослабленного возбуждения ОВ1 и ОВ2 (характеристику ОВ2 называют расчетной), а также на 9-й позиции нормального возбуждения. На высшей ступени регулирования напряжения наиболее высокая характеристика (ОП4 — на электровозах постоянного тока и ОП3 — на 33-й позиции электровозов переменного тока) в тяговых расчетах не используется и

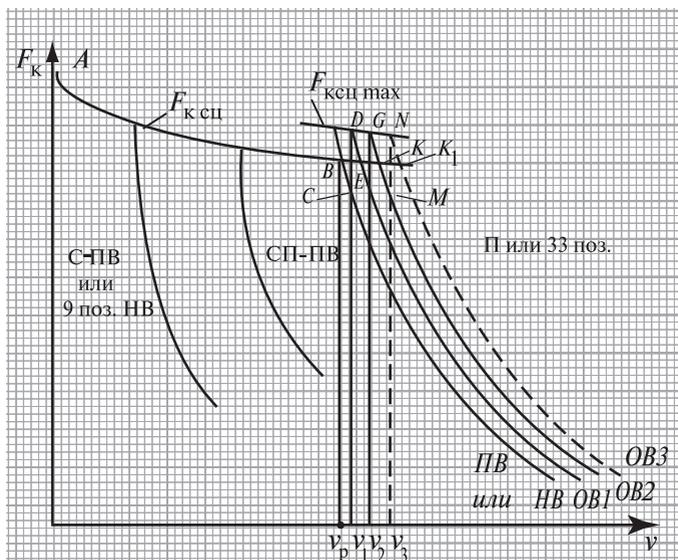


Рис. 7



## Шаг 2. Расчет ограничивающих линий на тяговых и скоростных характеристиках

На тяговых и скоростных характеристиках необходимо указать наибольшие силы тяги, которые может реализовать электровоз. Эти силы ограничиваются на грузовых электровозах, как правило, по сцеплению колес с рельсами [3, § 1.6]. При ступенчатом выводе секций пускового реостата на электровозах постоянного тока или при ступенчатом изменении напряжения на тяговых двигателях электровозов переменного тока появляются броски тока, а значит, и силы тяги от минимального значения, например, из точки *C* на рис. 7 на предыдущей позиции до максимального — на следующей (точка *D*). Обычно при разгоне в расчетах берут среднее между ними значение сил тяги ( $F_{к\text{сц}}$  — по сцеплению) и токов ( $I_{\text{дп}}$  — по коммутации). При ограничении наибольшей силы тяги сцеплением колес с рельсами значения  $F_{к\text{сц}}$ ,  $H$ , определяют по формуле

$$F_{к\text{сц}} = 1000 m_{\text{э}} g \psi_{к},$$

где  $m_{\text{э}}$  — масса электровоза, т;

$m_{\text{э}} g$  — вес локомотива, кН,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;

$\psi_{к}$  — расчетный коэффициент сцепления электровоза, определяемый по следующим эмпирическим формулам:

- для электровозов постоянного тока ВЛ10, ВЛ10у, ВЛ11:

$$\psi_{к} = 0,28 + \frac{3}{50 + 20\vartheta} - 0,0007\vartheta;$$

- для электровозов переменного тока ВЛ80с, ВЛ60к:

$$\psi_{к} = 0,28 + \frac{4}{50 + 6\vartheta} - 0,0006\vartheta;$$

Расчет проводят для скоростей  $\vartheta = 0, 5, 10, 20, 30, 40, 50$  и  $60$  км/ч. При длительной работе на какой-либо позиции можно

без потери сцепления выходить за пределы линии  $F_{к\text{сц}}$  и реализовать силы тяги до  $F_{к\text{сц max}}$ . В расчетах такая длительная работа предусматривается на параллельном соединении тяговых двигателей электровозов постоянного тока или на высшей ступени регулирования напряжения — на 33-й позиции электровозов переменного тока с использованием силы тяги при переходах на  $OB1$ , на  $OB2$ , а на электровозах постоянного тока также на  $OB3$  (см. рис. 7). Напомним, что для расчета обычно берут предпоследнюю характеристику, так как последняя является резервной на случай работы при повышенных скоростях движения, например, при нагоне опозданий.

Таким образом, для расчетов силы тяги при разгоне используют линию  $AB$ , далее отрезок  $BC$  характеристики  $HB$  или  $PB$  в зоне скорости от  $\vartheta_p$  до  $\vartheta_1$ , из точки  $C$  при скорости  $\vartheta_1$  переходят на характеристику  $OB1$  в точку  $D$  и используют отрезок  $DE$  этой характеристики при скоростях от  $\vartheta_1$  до  $\vartheta_2$ , из точки  $E$  при скорости  $\vartheta_2$  переходят в точку  $G$  на характеристике  $OB2$ , а на электровозах постоянного тока используют отрезок  $GM$  и переходят на характеристику  $OB3$  в точку  $N$ . При более высоких скоростях используют характеристики  $OB3$  на электровозах постоянного тока и  $OB2$  — переменного тока.

Для наших электровозов сила тяги  $F_{к\text{сц max}}$  превышает силу  $F_{к\text{сц}}$  в зоне переходов на  $OB$  в среднем на 10 %. Поэтому при скоростях 40, 50 и 60 км /ч рассчитывают максимальные значения сил тяги по сцеплению колес с рельсами  $F_{к\text{сц max}}$  по формуле

$$F_{к\text{сц max}} = 1,1 F_{к\text{сц}} \quad (5)$$

Точки пересечения линии  $F_{к\text{сц max}}$  с характеристиками  $OB1$ ,  $OB2$  ( $D$ ,  $G$ ), а при электровозах постоянного тока и  $OB3$  ( $N$ ) показывают скорости ( $\vartheta_1$ ,  $\vartheta_2$  и  $\vartheta_3$ ) при которых для более полного использования мощности электровоза нужно переходить на следующую характеристику.

Результаты расчетов сводят в табл. 6.

Полученные ограничивающие линии наносят на тяговые характеристики.

**Оформление шага.** Пример расчета. Заполненная табл. 6 и ограничивающие линии на тяговых характеристиках.

Таблица 6

**Расчет ограничений силы тяги по сцеплению**

$\vartheta$ , км/ч	0	5	10	20	30	40	50	60
$\Psi_k$								
$F_{k\text{ сц}}$ , кН								
$F_{k\text{ сц max}} = 1,1 F_{k\text{ сц}}$ , кН	—	—	—	—	—	—	—	—

### Шаг 3. Нанесение ограничивающих линий на скоростные характеристики

Ограничивающая линия на скоростных характеристиках по сцеплению колес с рельсами показывает допустимые токи  $I_d$  при разных скоростях движения на характеристиках ПВ (или НВ) и ступенях ОВ. Ограничение по сцеплению определяют на основании ограничивающей линии, рассчитанной для тяговых характеристик следующим образом § 3.9]. Силу тяги  $F_{k\text{ сц}}$  для  $\vartheta = 0, 5, 10, 20$  и т.д. км/ч, а также для точек В, С, D, E, G, а для электровозов постоянного тока также и точек М и N (см. рис. 7) делят на количество сцепных осей (тяговых

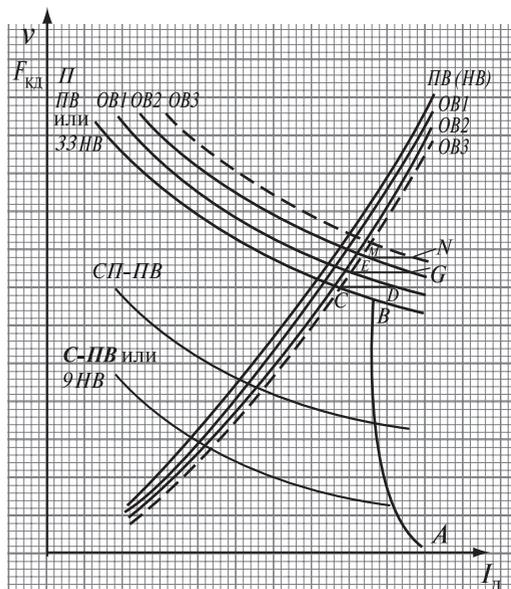


Рис. 8

двигателей) электровоза и получают силы тяги  $F_{\text{кд сц}}$ . Затем по кривым  $F_{\text{кд}}(I_{\text{д}})$  определяют ток  $I_{\text{д}}$ , соответствующий силе тяги  $F_{\text{к сц}}$  при каждой скорости и режиме. Результаты сводят в табл. 7 и наносят на график  $\vartheta(I_{\text{д}})$ , как показано на рис. 8.

*Оформление шага.* Заполненная табл. 7 и ограничивающие линии на рис. 1–3 с указанием скоростей перехода на характеристики *OB* (см. рис. 8).

Таблица 7

**Расчет токов тяговых двигателей**

Точка	$\vartheta$ , км/ч	$F_{\text{к сц}}$ , кН	$F_{\text{кд сц}}$ , кН	$I_{\text{д}}$ , А
<i>A</i>	0			
	5			
	10			
	.			
	.			
<i>B</i>	$\vartheta_{\text{p}}$			
<i>C</i>	$\vartheta_1 \text{ ПВ(НВ)}$			
<i>D</i>	$\vartheta_1 \text{ OBI}$			
<i>E</i>	$\vartheta_2 \text{ OBI}$			
и т.д.				

## Раздел II

### РАСЧЕТ МАССЫ СОСТАВА, УДЕЛЬНЫХ УСКОРЯЮЩИХ И ЗАМЕДЛЯЮЩИХ СИЛ

#### **Шаг 4. Выбор расчетного подъема и расчет массы состава**

Под *расчетным подъемом* понимают наиболее трудный для движения в выбранном направлении подъем, на котором локомотив развивает расчетную силу тяги при расчетной скорости движения. Наиболее крутой подъем при большой длине принимают за расчетный. Если же наиболее крутой подъем имеет наибольшую протяженность и перед ним расположены элементы с легким профилем пути, позволяющие поезду подойти к нему с большой скоростью, то такой подъем не может быть принят за расчетный, поскольку для его преодоления может быть использована запасенная ранее поездом кинетическая энергия. В этом случае за расчетный принимают меньший по крутизне подъем, но большей протяженности.

Студент анализирует заданный приведенный профиль пути и выбирает с соответствующими обоснованиями расчетный подъем  $i_p$  [2, § 10.1, 10.2; 3 § 9.1, 9.2].

Для снижения себестоимости перевозок в грузовом движении и повышения провозной способности участка нужно иметь возможно большую массу состава. Для этого электровоз должен развивать возможно большую допустимую силу тяги, называемую расчетной  $F_{кр}$ . Скорость электровоза при такой силе тяги называют расчетной скоростью  $v_p$ . Эти расчетные значения силы тяги и скорости берут обычно на характеристике полного возбуждения параллельного соединения групп тяговых двигателей электровозов постоянного тока или на характеристике нормального возбуждения одной из высших ступеней регулирования напряжения на электровозах переменного тока при пересечении их с ограничивающей линией  $F_{к\text{сц}}$ , — точку  $a$  на

рис. 7 (в курсовом проекте студент берет характеристику  $HВ$  на 33-й позиции).

При установившейся скорости движения  $\vartheta_p$  на расчетном подъеме  $i_p$  масса состава  $m_c$ , т, в соответствии с [1, § 1.4.2.; § 1.4.3 и 3, § 9.2] определяют по формуле

$$m_c = \frac{F_{кр} - m_0 g (w'_0 + i_p)}{g (w''_0 + i_p)}, \quad (6)$$

где  $F_{кр}$  — расчетная сила тяги электровагона, Н;  
 $i_p$  — расчетный подъем, ‰;  
 $w'_0$  — удельное основное сопротивление движению электровагона под током, определяемое в соответствии с [1, § 1.2.3.; 3, § 6.2] по формуле, Н/кН,

$$w'_0 = 1,9 + 0,01\vartheta + 0,0003\vartheta^2; \quad (7)$$

$w''_0$  — удельное основное сопротивление движению состава, рассчитываемое при заданном процентном соотношении вагонов различных типов по формуле

$$w''_0 = \frac{p_4 w''_{04} + p_6 w''_{06} + p_8 w''_{08}}{100}. \quad (8)$$

Здесь  $p_4$ ,  $p_6$  и  $p_8$  — процент (по массе) соответственно четырехосных, шестиосных и восьмиосных вагонов на роликовых подшипниках (берется из табл. 1);

$w''_{04}$ ,  $w''_{06}$  и  $w''_{08}$  — удельное основное сопротивление движению груженых соответственно четырехосных, шестиосных и восьмиосных вагонов на роликовых подшипниках, Н/кН, рассчитываемое по следующим формулам, приведенным в [3, § 6.2.] при  $\vartheta_p$

$$w''_{04} = 0,7 + \frac{3 + 0,19 + 0,00259^2}{m_{B04}}, \quad (9)$$

где  $m_{B04} = m_{B04}/4$  — масса, приходящаяся на ось четырехосного вагона, т,

$$w''_{06} = 0,7 + \frac{8 + 0,19 + 0,00259^2}{m_{B06}}, \quad (10)$$

где  $m_{B06} = m_{B06}/6$  — масса, приходящаяся на ось шестиосного вагона, т,

$$w''_{08} = 0,7 + \frac{6 + 0,0389 + 0,00219^2}{m_{B08}}, \quad (11)$$

где  $m_{B08} = m_{B08}/8$  — масса, приходящаяся на ось восьмиосного вагона, т, рассчитываемая из средней массы вагона брутто.

Рассчитанную массу состава необходимо проверить на возможность проследования наиболее крутого, но короткого подъема с учетом кинетической энергии, запасенной в поезде. В связи с тем, что перед таким подъемом в каждом варианте находятся элементы с легким профилем, можно принять скорость, с которой подходит поезд к этому подъему, не менее 60 км/ч. Конечная скорость в курсовом проекте должна быть не ниже  $\vartheta_p$ . Расчет обычно выполняют аналитическим методом [1, § 1.4.3.; 3, § 9.2].

В связи с тем, что в зоне скоростей 60 км/ч  $\div \vartheta_p$  придется использовать расчетную тяговую характеристику (до точки  $K$  на электровазах переменного тока или  $K_1$  на электровазах постоянного тока), (см. рис. 7) а затем ограничивающую линию  $F_{к\text{сц}}$  (на отрезке  $KB$  или  $K_1B$ ), расчет выполняется для каждого из этих диапазонов скоростей. Путь  $S_{\text{пр}}$ , м, определяют в каждом диапазоне скоростей по формуле

$$S_{\text{пр}} = \frac{4,17(\vartheta_k^2 - \vartheta_n^2)}{(f_k - w_k)_{\text{ср}}}, \quad (12)$$

где  $\vartheta_k$  — для первого расчета скорость точки пересечения расчетной характеристики с ограничивающей линией  $F_{к\text{сц}}$ , ( $K$  или  $K_1$ ) для второго расчета —  $N_p$ ;

$\vartheta_n$  — для первого расчета равна 60 км/ч, для второго — скорость в точках  $K$  или  $K_1$ ;

$(f_k - w_k)_{\text{ср}}$  — удельная сила, рассчитываемая для каждого из двух интервалов скорости при средней скорости с учетом крутизны проверяемого подъема  $i_{\text{пр}}$ ;

$$(f_k - w_k)_{\text{ср}} = \frac{F_k - (w'_0 + i_{\text{пр}}) m_{\text{э}} g - (w''_0 + i_{\text{пр}}) m_{\text{с}} g}{mg}, \quad (13)$$

здесь  $m = m_{\text{э}} + m_{\text{с}}$  — масса поезда;  
 $w'_0$  и  $w''_0$  — при средней скорости  $\vartheta_{\text{ср}}$  рассчитывают по формулам (7), (8).

$$\vartheta_{\text{ср}} = \frac{\vartheta_{\text{н}} + \vartheta_{\text{к}}}{2}.$$

Полученные расчетом пути в обоих интервалах скоростей складывают ( $\sum S_{\text{пр}}$ ) и после сравнения с длиной элемента делают вывод о возможности прохождения наиболее крутого элемента.

Если путь  $\sum S_{\text{пр}}$  окажется больше длины элемента или равен ему

( $\sum S_{\text{пр}} \geq S_{\text{эл}}$ ), то поезд массой  $m$  может преодолеть наиболее крутой подъем, если меньше ( $\sum S_{\text{пр}} < S_{\text{эл}}$ ) то поезд массой  $m$  провести по этому элементу не удастся.

**Оформление шага.** Все расчеты  $m_{\text{с}}$  и проверки на прохождение поезда (в каждом из двух диапазонов скоростей) по наиболее крутому подъему  $i_{\text{пр}}$ .

### **Шаг 5. Расчет и построение удельных ускоряющих сил поезда (при $i = 0$ ) в режиме тяги**

Для решения уравнения движения поезда нужно знать удельные ускоряющие и замедляющие силы, действующие на поезд в режимах тяги, выбега и торможения. Использование удельных

сил — сил, отнесенных к единице веса поезда, упрощает решение уравнения движения поезда.

Расчет удельного основного сопротивления движению различных типов вагонов и состава в целом при различных скоростях движения по прямолинейному горизонтальному пути приведен в [3, § 6.2, 6.3]. Этот расчет выполняют по формулам (8), (9), (10) и (11) методических указаний для следующих скоростей от  $\vartheta = 0$  до  $\vartheta_p$  — через 10 км/ч, от  $\vartheta_p$  до  $\vartheta_{\max}$  — через 5 км/ч, а также для скорости  $\vartheta_p$  и скоростей перехода на характеристики *ОВ* (см. точки *B, C, D, E, G, M, N* на рис. 7).

Удельные ускоряющие силы  $f_y$  в режиме тяги при движении поезда по прямолинейному горизонтальному пути определяют как разность между удельной силой тяги ( $F_k/mg$ ) и удельной силой основного сопротивления движению  $w_0$  по формуле (как показано в [2, § 9.1; 3, § 1.1 и 8.2])

$$f_y = f_k - w_0 = \frac{F_k}{mg} - w_0, \quad (14)$$

где  $w_0$  — основное удельное сопротивление движению поезда, которое в соответствии с [3, § 39] рассчитывают по формуле

$$w_0 = \frac{w'_0 m_{\text{э}} + w''_0 m_{\text{с}}}{m}. \quad (15)$$

Силы тяги  $F_k$  берут из тяговых характеристик при разгоне по ограничивающим линиям и при работе на параллельном соединении тяговых двигателей (*ПВ, ОВ1, ОВ2, ОВ3*) электровозов постоянного тока или на 33-й позиции (*НВ, ОВ1, ОВ2*) электровозов переменного тока.

В связи с тем, что удельное сопротивление движению поезда  $w_0$  и удельную ускоряющую силу поезда  $f_y$  нужно считать для нескольких скоростей, целесообразно использовать ЭВМ.

Результаты расчетов заносят в табл. 8.

По табл.8 строится диаграмма удельных ускоряющих сил  $f_y(\vartheta)$  на одном графике вместе с удельными замедляющими силами при выбеге и служебном торможении.

Для выполнения построений рекомендуются два типа масштабов (табл. 9), указанных также в [1, § 1.4.8.; 2 § 9.4 и 3 § 8.6]. При использовании вторых масштабов линейные размеры графиков получаются в два раза меньше, чем при первых, поэтому их можно брать только при тщательном построении графиков тонкими аккуратными линиями.

**Оформление шага.** Расчетные формулы, заполненная табл. 8 и диаграмма удельных ускоряющих сил при тяге. При использовании ПК – программа с пояснениями (см.п.12 требований, предъявляемых к выполнению курсового проекта).

Таблица 8

Удельные ускоряющие силы поезда  $m_c = \dots$ , т

Режим	$\vartheta$ , км/ч	$w_0$ , Н/кН	$F_k$ , Н	$f_y$ , Н/кН
Разгон	0			
	10			
	·			
	·			
	$\vartheta_p$			
ПВ (НВ)	$\vartheta_1$			
	$\vartheta_2$			
	·			
	·			
	100			
ОВ1	$\vartheta_1$			
	$\vartheta_2$			
	·			
	·			
и т.д.	100			

**Масштабы, рекомендованные для выполнения тяговых расчетов**

Величины	Для тяговых расчетов		Для тормозных задач	
	1	2	1	2
Силы: 1 — Н/кН или 1 кгс/тс к, мм	12	6	2	1
Скорости: 1 км/ч — $m$ , мм	2	1	2	1
Пути: 1 км — $y$ , мм	40	20	240	120
Постоянная: $\Delta$ , мм	30	30	—	—
Времени: 1 мин — $x$ , мм	10	10	—	—

**Шаг 6. Расчет и построение удельных замедляющих сил поезда в режимах выбега и торможения**

Удельные замедляющие силы при выбеге определяют по формуле, Н/кН, [2, § 9.1, 3, § 6.2, 6.3].

$$f_3 = -f_y = w_{ox} = \frac{w_x m_{\text{э}} + w_0'' m_{\text{с}}}{m},$$

где  $w_x$  — удельное основное сопротивление движению электровоза без тока, определяемое по формуле

$$w_x = 2,4 + 0,011 \vartheta + 0,00035 \vartheta^2 \quad (16)$$

Расчеты выполняются для скоростей 0, 10, 20, 30 и т.д. км/ч (через 10 км/ч).

Удельные тормозные силы при экстренном торможении (воздушными тормозами) определяют по формуле [3, § 7.3];

$$b_{\text{т}} = 1000 \varphi_{\text{кр}} \vartheta_{\text{р}}, \quad (17)$$

где  $\varphi_{кр}$  — расчетный коэффициент трения колодки о колесо, определяемый по формуле (для чугунных стандартных колодок):

$$\varphi_{кр} = 0,27 \frac{100 + \vartheta}{100 + 5\vartheta} ; \quad (18)$$

$\vartheta_p$  — расчетный тормозной коэффициент.

В соответствии с ПТР [1, § 1.3.1] в грузовых поездах на спусках до 20 %о тормозную силу электровоза и его массу в расчетах не принимают. Поэтому для нашего грузового поезда

$$\vartheta_p = \frac{\sum K_p}{m_c g}. \quad (19)$$

Сумму расчетных нажатий  $\sum K_p$  определяют, исходя из расчетного нажатия колодок на каждую колесную пару, равную 69 кН.

Количество осей в составе  $n_{осей}$  определяют, исходя из массы состава  $m_c$ , заданных масс вагонов разных типов  $m_{Bi}$  их процентного соотношения и количества  $n_i$ .

Число осей в составе

$$n_{осей} = \sum \frac{m_c p_i n_i}{100 m_{Bi}}.$$

В нашем случае

$$n_{осей} = \frac{m_c}{100} \left( \frac{4 p_4}{m_{B4}} + \frac{6 p_6}{m_{B6}} + \frac{8 p_8}{m_{B8}} \right). \quad (20)$$

Полученную величину округляют до ближайшего большего четного числа.

Удельная замедляющая сила при экстренном торможении равна  $f_{зэ} = b_T + w_{ох}$ . Экстренное торможение применяют в исключительных случаях для предупреждения несчастных случаев

и аварий, например при внезапном появлении препятствия на пути. В курсовом проекте его используют только при решении тормозной задачи.

При торможениях перед станциями и на уклонах в тяговых расчетах используют служебное торможение, при котором берут для грузовых поездов тормозную силу, равную  $0,5 b_T$ , и соответственно замедляющую силу

$$f_{зс} = 0,5 b_T + w_{ок}.$$

Замедляющие силы при экстренном и служебном торможении в проекте можно рассчитывать для скоростей от  $\vartheta = 0$  до  $\vartheta = 100$  км/ч с интервалом 10 км/ч.

Результаты расчетов сводят в табл. 10.

По данным табл. 10 строят кривые  $0,5 b_T + w_{ок} = f(\vartheta)$  в выбранных масштабах (см. табл. 9) на графике ускоряющих и замедляющих сил. Построенные диаграммы ускоряющих и замедляющих сил характеризуют удельные силы, действующие на поезд при любой скорости на прямолинейном горизонтальном пути при различных режимах; в тяге, на выбеге и при служебном торможении.

**Оформление шага.** Заполненные табл. 10 и диаграмма удельных замедляющих сил при выбеге и служебном торможении. При использовании ПК — программа с пояснениями.

Таблица 10

**Удельные замедляющие силы при выбеге и торможении**

$\vartheta$ , км/ч	$w_{ок}$ , Н/кН	$b_T$ , Н/кН	$0,5 b_T$ , Н/кН	$f_{зэ} = b_T + w_{ок}$ , Н/кН	$f_{зс} = 0,5 b_T + w_{ок}$ , Н/кН
0					
10					
20					
и т.д.					

## Раздел III

# РЕШЕНИЕ ТОРМОЗНОЙ ЗАДАЧИ И ПОСТРОЕНИЕ КРИВЫХ ДВИЖЕНИЯ

### *Шаг 7. Решение тормозной задачи*

В курсовом проекте решают тормозную задачу для определения допустимых скоростей движения на различных спусках по условиям безопасности движения поездов. При действии рассчитанных в предыдущем шаге замедляющих сил при экстренном торможении поезд на любом спуске должен быть остановлен в пределах заданного тормозного пути.

Порядок решения тормозной задачи изложен в [2, § 11.4 1, 11.2; 3, § 10.2].

Тормозной путь поезда  $s_T$  состоит из подготовительного  $s_{п}$  и действительного  $s_{д}$  тормозных путей.

Действительный тормозной путь  $s_{д}$  в проекте определяют графическим методом при экстренном торможении по кривой

$$b_T + w_{ох} = f(\vartheta) \text{ для } i = 0, \quad i = -6 \text{ ‰} \text{ и } i = -12 \text{ ‰}.$$

Так как начальная скорость торможения неизвестна, построение ведут на графиках, начиная с  $\vartheta = 0$ , обратным ходом с соблюдением масштабов, приведенных в табл. 9 для решения тормозных задач.

Тормозная сила поезда возникает не сразу после поворота рукоятки крана машиниста в тормозное положение. Нужно время на распространение воздушной волны по тормозной магистрали поезда, срабатывание воздухораспределителей, перемещение тормозной рычажной передачи и тормозных колодок к колесам и на увеличение нажатия колодок до установившейся величины. Причем тормоза вагонов передней части поезда срабатывают быстрее, чем хвостовых вагонов. Для упрощения расчетов принимают, что какое-то время  $t_{п}$  в период подготовки

тормозов поезд движется на выбеге, а затем сразу включаются тормоза всего поезда и начинается торможение.

В период подготовки тормозов поезд пройдет какой-то путь, зависящий от средней скорости движения и времени подготовки. Скорость движения поезда за время подготовки тормозов снижается при следовании по подъему или горизонтальному пути и возрастает при движении по крутому спуску. В расчетах же условно принимают эту скорость постоянной, равной скорости в начале торможения, а ее изменения компенсируют увеличением времени подготовки тормозов на спусках и уменьшением — на подъемах.

С учетом этого подготовительный (предтормозной) путь определяют при  $\vartheta = \vartheta_{\text{н}} = \text{const}$  по формуле

$$s_{\text{п}} = \frac{\vartheta_{\text{н}} t_{\text{п}}}{3,6}, \quad (21)$$

где  $\vartheta_{\text{н}}$  — любая выбранная скорость начала торможения в км/ч (обычно ее принимают равной максимальной скорости электровоза, в курсовом проекте  $\vartheta_{\text{н}} = 100$  км/ч);  
 $t_{\text{п}}$  — время подготовки, с, определяемое по эмпирическим формулам:

- для состава 200 осей и менее

$$t_{\text{п}} = 7 - \frac{10 \cdot i}{1000 \varphi_{\text{кр}} \vartheta_{\text{п}}}, \quad (22)$$

- для состава более 200 осей (до 300 осей)

$$t_{\text{п}} = 10 - \frac{15 i}{1000 \varphi_{\text{кр}} \vartheta_{\text{п}}}, \quad (23)$$

- для состава более 300 осей

$$t_{\text{п}} = 12 - \frac{18 i}{1000 \varphi_{\text{кр}} \vartheta_{\text{п}}}, \quad (24)$$

Здесь величины  $10 \text{ i}/1000 \varphi_{\text{кр}} \times \vartheta_p$ ,  $15 \text{ i}/1000 \varphi_{\text{кр}} \times \vartheta_p$ , и др. введены в формулы для компенсации изменения скорости движения в пределах предтормозного пути. В них:

$i$  — величина уклона в ‰ для которого рассчитывают  $s_{\text{п}}$  (для спусков величина берется со знаком минус);

$\vartheta_p$  — расчетный тормозной коэффициент (рассчитанный в предыдущем шаге);

$\varphi_{\text{кр}}$  — расчетный коэффициент трения колодки о бандаж, определяемый при выбранной скорости  $\vartheta_{\text{н}}$ .

По формулам (22), (23) или (24) определяют  $s_{\text{п}}$  для тех же трех значений  $i$  ( $i = 0$ ,  $i = -6 \text{ ‰}$  и  $i = -12 \text{ ‰}$ ). Их наносят на график  $\vartheta(s)$  и через них и точки  $\vartheta = 0$ , при  $s_{\text{п}} = 0$  проводят прямые  $\vartheta(s_{\text{п}})$ .

Пересечение прямых  $\vartheta(s_{\text{п}})$  и кривых  $\vartheta(s_{\text{д}})$  для каждого значения  $i$  дает искомую скорость  $\vartheta_{\text{доп}}$  на этом уклоне. По полученным трем точкам (при  $i = 0$ ,  $i = -6 \text{ ‰}$  и  $i = -12 \text{ ‰}$ ) строят кривую  $\vartheta_{\text{доп}}(i \text{ ‰})$  на диаграмме замедляющих сил (или на отдельном графике).

**Оформление шага.** Расчетные формулы, график решения тормозной задачи, кривая  $\vartheta_{\text{доп}}(i \text{ ‰})$ .

## **Шаг 8. Построение кривых движения**

Интегрирование уравнения движения поезда в курсовом проекте студент выполняет или аналитическим (с использованием ЭВМ), или графическим методом МПС. Порядок расчетов и построений кривых  $\vartheta(s)$  и  $t(s)$  изложен в рекомендуемой литературе [1, § 1.4.2; 2, § 9.3, 9.3.9.5, § 8.5, 8.6 и прил. 1 и 2].

Все расчеты или построения выполняют на основании диаграммы удельных ускоряющих и замедляющих сил с учетом заданного приведенного профиля пути, который указывают под осью абсцисс графика  $\vartheta(s)$ . После расчета аналитическим методом строятся графики движения поездов  $\vartheta(s)$  и  $t(s)$  в масштабах, приведенных в табл. 9.

При расчетах и построении кривых движения нужно иметь в виду следующие условия:

1. При интегрировании уравнения движения поезд рассматривается как материальная точка, в которой сосредоточена вся масса поезда. Она находится в середине поезда. В расчетах нужно стремиться к возможно более полному использованию тяговых свойств и мощности электровоза.

2. Скорость движения не должна превышать максимальную скорость электровоза, а также допустимую скорость по тормозам для каждого элемента профиля пути. Целесообразно на каждом спуске и горизонтальном участке показать допустимую скорость движения, чтобы при построении кривой  $\vartheta (s)$  случайно не превзойти ее.

3. При построении кривой  $\vartheta (s)$  на элементе с ограничением скорости движения 40 или 50 км/ч (см.табл. 3 задания) нужно учитывать, чтобы не только центр тяжести поезда, но и его головная и хвостовая части прошли по всему элементу без превышения заданной скорости. Для этого необходимо иметь допустимую скорость не в начале элемента, а на расстоянии, равном половине длины поезда, от него (здесь удобно использовать обратное построение) и увеличивать скорость не непосредственно после прохождения элемента, а на расстоянии половины длины поезда за ним.

Длину поезда  $L_{\text{п}}$  определяют, исходя из массы состава  $m_{\text{с}}$ , процентного соотношения вагонов в составе  $p_i$ , массы  $m_{Bi}$  и длин каждого типа вагонов  $\ell_{Bi}$  и электровоза  $\ell_{\text{э}}$ . Количество вагонов каждого типа  $n_i$  равно

$$n_i = \frac{m_{\text{с}}}{m_{Bi}} \frac{p_i}{100}.$$

Длину поезда рассчитывают по формуле

$$L_{\text{п}} = \sum n_i \ell_{Bi} + \ell_{\text{э}}$$

В курсовом проекте можно принять: длину восьми-осного вагона  $\ell_8 = 20$  м; шестиосного  $\ell_6 = 17$  м; четырех-осного вагона  $\ell_4 = 15$  м; одной четырех-осной секции электровоза  $\ell_{\text{с}} = 16,5$  м; одного шести-осного электровоза ВЛ60к  $\ell_{\text{э}} = 21$  м.

4. На промежуточной станции Б кривую скорости рассчитывают и строят дважды: при движении с остановкой и без нее. Соответственно на графике должно быть и две линии времени  $t(s)$ . На основании кривых времени для обоих режимов движения необходимо оценить потерю времени на разгон и замедление поезда по сравнению с безостановочным движением.

5. Кривую скорости при торможении поезда перед остановкой на станции строят в обратном порядке — от места остановки на оси станции при  $\vartheta = 0$  до пересечения с кривой движения перед торможением на выбеге. Если кривая скорости при торможении пересеклась с кривой перед торможением, построенной для режима тяги, необходимо за 400–500 м до пересечения перейти с тяги на выбег и строить отрезки линии до пересечения с кривой при торможении.

6. Подход к месту ограничения скорости нужно выполнить в двух вариантах: с использованием тормозов ((основной вариант) и на выбеге с обратным построением).

7. На кривой скорости в местах изменения режима ведения поезда (выход на характеристики *СП*, *ПВ* или *НВ*, *ОВ1*, *ОВ2* и т.д., переход на выбег, включение и отпуск тормозов) нужно делать отметки буквами. Эти отметки в дальнейшем будут использованы для определения режима работы электровоза в различных точках пути.

8. При расчетах и построении кривых  $\vartheta$  (s) интервалы скорости не должны превышать: в режиме тяги от  $\vartheta = 0$  до  $\vartheta_p$  — 10 км/ч, при более высоких скоростях — 5 км/ч; в режиме выбега и торможения можно принять 10 км/ч.

Величину удельной ускоряющей или замедляющей силы в каждом интервале скорости берут при средней скорости (от  $\vartheta = 0$  до  $\vartheta_p = 10$  км/ч при 5 км/ч и т.д.). При наличии подъема или спуска начало координат графика удельных ускоряющих и замедляющих сил смещается соответственно влево или вправо на величину удельной силы, численно равной величине подъема или спуска в ‰ (это допустимо в связи с тем, что удельное дополнительное сопротивление от подъема  $w_i$  Н/кН, численно равно величине подъема в ‰).

При подходе к границе элемента спрямленного профиля пути линия  $\vartheta (s)$  при выбранном значении  $\Delta\vartheta$  может выйти за пределы элемента, где за счет изменения уклона ускоряющая сила будет иметь другое значение, не учтенное при построении. Оставлять полученный отрезок линии  $\vartheta (s)$  в пределах элемента нельзя, так как при меньшей разнице между начальным и конечным значениями скорости средняя ускоряющая сила не будет равна той, которую приняли в интервале  $\Delta\vartheta$ . В этом случае необходимо подбором найти такое значение интервала  $\Delta\vartheta$ , при котором в конце элемента поезд будет иметь скорость, равную конечной скорости в выбранном интервале.

9. Аналогичные условия нужно соблюдать и при интегрировании уравнения движения поезда аналитическим методом. При этом необходимо уменьшать значения  $\Delta\vartheta$ , когда поезд подходит к границе элементов, с тем чтобы не выйти за пределы данного элемента.

10. При движении по затяжным спускам нужно применять режимы выбега и торможения, с тем, чтобы не превзойти допустимые скорости, полученные в результате решения тормозной задачи. Для увеличения запаса кинетической энергии в конце спуска и снижения расхода энергии на тягу поезда места отпуска тормозов нужно выбирать с таким расчетом, чтобы к концу спуска поезд подошел с допустимой скоростью. (Снижение скорости при торможении допускать на 10–15 км/ч).

11. По построенной кривой  $t (s)$  определяют времена хода (мин) по каждому перегону (длиной  $s$ , км) и участку в целом для безостановочного движения и движения с остановкой, а также для каждого варианта подхода к месту ограничения скорости, а затем определяют технические скорости по формуле.

$$\vartheta_{\text{тех}} = 60 S / t .$$

Студент анализирует потери времени и снижение технической скорости при движении к месту ограничения скорости на выбеге по сравнению с режимами торможения, а также при движении с остановкой по сравнению с безостановочным движением. Результаты анализа сводят в табл.11.



## Раздел IV

### РАСЧЕТ И ПОСТРОЕНИЕ КРИВЫХ ТОКА

#### **Шаг 9. Расчет и построение токовых характеристик**

По величине тока, потребляемого двигателем  $I_d$  и времени, в течение которого ток идет по его обмоткам, определяют температуру нагрева обмоток и по ней оценивают использование мощности электровоза.

Для расчета расхода электрической энергии на тягу поезда нужно знать величину тока  $I_3$  электровоза постоянного тока или активную составляющую полного тока  $I_{da}$ , потребляемого электровозом переменного тока, и время работы с каждым током.

Для этого на графиках движения поезда показывают кривые изменения тока  $I_3(s)$  при электровозах постоянного тока и кривые  $I_d(s)$  и  $I_{da}(s)$  — при электровозах переменного тока.

Чтобы построить эти графики, необходимо рассчитать и построить токовые характеристики  $I_3(\vartheta)$  электровоза постоянного тока и  $I_{da}(\vartheta)$  — электровоза переменного тока (ток  $I_d$  берется из скоростных характеристик) [2, § 12.1, 12.2, 3, § 11.1, 11.2].

**Для электровоза постоянного тока** токовые характеристики пересчитывают, используя скоростные характеристики и зависимость тока  $I_3$  от тока  $I_d$ . Как известно,  $I_3 = I_d \cdot a$ ,

где  $a$  — число параллельно включенных групп тяговых двигателей. Например, для восьмиосного электровоза  $a_{\text{п}} = 4$ ,  $a_{\text{сп}} = 2$ ,  $a_{\text{с}} = 1$ .

Пересчет ведется при параллельном соединении (П) — характеристик ПВ, ОВ1, ОВ2 и ОВ3, на последовательно-параллельном соединении (СП) и на последовательном (С) только для характеристик при полном возбуждении (ПВ) при токах, кратных 100 А. На токовые характеристики наносят ограничивающие линии по сцеплению колес с рельсами.

Например, для электровозов ВЛ10 токи  $I_3$  (рис. 9) при ограничении по сцеплению определяют, исходя из токов  $I_d$  (см.

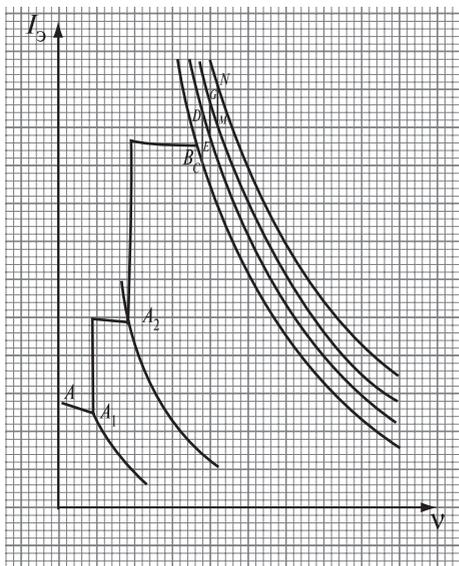


Рис. 9

рис. 8) с учетом числа параллельных цепей тяговых двигателей для точек  $A, A1, A2, B, C, D, E, G, M, N$ . Результаты расчета сводят в таблицу произвольной формы, по которым строят график, изображенный на рис. 9. Соответствующие точки на рис. 8 и 9 обозначены буквами. В точках  $A1$  и  $A2$  токи  $I_3$  возрастают скачком из-за увеличения числа параллельно включенных тяговых двигателей. Аналогично строят токовые характеристики при другом числе тяговых двигателей.

Для электровоза переменного тока — токи  $I_d$  берут из заданных скоростных характеристик с учетом ограничивающих линий по типу рис. 8.

Ток  $I_d$ , потребляемый электровозом из контактной сети для питания тяговых двигателей, определяют по формуле

$$I_d = \frac{I_B}{k_T} k_{\text{эф}}, \quad (25)$$

где  $k_{\text{эф}}$  — коэффициент эффективности переменного тока.

Для расчета в курсовом проекте можно принять  $k_{\text{эф}} = 1$ ;

$I_B$  — выпрямленный ток, равный сумме токов тяговых двигателей,

$$I_B = I_d a, \quad (26)$$

здесь  $a$  — число параллельно соединенных тяговых двигателей;

$k_T$  — коэффициент трансформации главного трансформатора, равный отношению напряжения первичной обмотки  $U_{10} = U_c = 25000$  В к напряжению холостого хода вторичной обмотки  $U_{20}$  с учетом выражения  $U_{BO} = 0,9 U_{20}$ ,

$$k_T = 0,9 \frac{U_c}{U_{BO}} . \quad (27)$$

В курсовом проекте  $k_T$  определяют для заданных напряжений  $U_{ВОН}$  на 33-й позиции и  $U_{BO}$  на 9-й позиции. На основании скоростных характеристик  $\vartheta (I_d)$  и уравнений (25), (26) и (27) определяют токи, потребляемые электровозом при различных скоростях движения. На характеристиках нормального возбуждения на 9-й и 33-й позициях и при ослабленных возбуждениях ОВ1 и ОВ2 на 33-й позиции. Полученные значения  $I_d$  для токов тяговых двигателей  $I_d$ , кратных 100 А, и скоростей  $\vartheta$  заносят в табл. 12.

Активная составляющая полного тока электровоза или просто активный ток  $I_{da}$  равен

$$I_{da} = I_d X , \quad (28)$$

где  $X$  — коэффициент мощности электровоза.

Без учета сравнительно малого тока холостого хода трансформатора, при  $k_{\text{эф}} = 1$  коэффициент мощности можно определить по формуле

$$X = 0,9 \frac{U_{BO} - (R'_3 - R'_{об}) I_d}{U_{BO}} , \quad (29)$$

где  $R'_3$  и  $R'_{об}$  — эквивалентное и общее активное сопротивление цепи преобразовательной установки, приведенное к одному тяговому двигателю (см. задание).

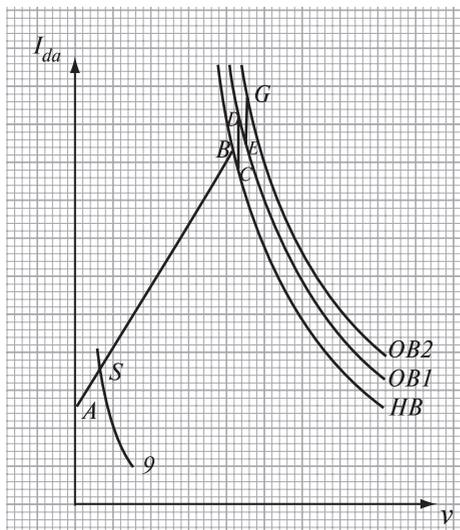


Рис. 10

На основании уравнений (28) и (29) рассчитывают  $X$  и  $I_{da}$  для токов  $I_d$  кратных 100 А, на 33 и 9 позиции при НВ, 33 позиции ОВ1 и ОВ2 и точек  $B, C, D, E, G$  на 33-й позиции и точки  $S$  на 9-й позиции, соответствующей току при пересечении характеристики с линией ограничения по сцеплению колес с рельсами.

Результаты расчетов заносят в табл. 12 и строят график  $I_{da}(\vartheta)$  (рис. 10).

Таблица 12

**Расчет активной составляющей полного тока, потребляемого электровозом**

Позиция и точки	$\vartheta$ , км/ч			$I_d$ , А	$I_B = I_d \cdot a$ , А	$I_d'$ , А	$X$	$I_{da}$ , А
	НВ	ОВ1	ОВ2					
33				200 300 и т.д.				
В								
С								
Д								
Е								
Г								
9		—	—	200 300 и т.д.				
С		—	—					

Ограничивающая линия по сцеплению колес с рельсами имеет вид кривой  $AB$  (см. рис. 8). Для упрощения расчетов ана-

логичную кривую на графике  $I_{da}(\vartheta)$  заменяют прямой, проходящей через точки  $B$  и  $S$  (рис. 10). Полученную линию  $AB$  используют для определения токов  $I_{da}$  при разгоне.

**Оформление шага.** Таблица с рассчитанными токами  $I_{\vartheta}$  или заполненная табл. 12, график токовых характеристик  $I_{\vartheta}(\vartheta)$  или  $I_{da}(\vartheta)$  с нанесенными ограничивающими линиями и линиями перехода на позиции  $OB$ .

### **Шаг 10. Построение кривых тока в функции пути**

Порядок построения кривых тока по кривой скорости  $\vartheta(s)$  изложен в [3, § 11.3 и прил. 1 и 2]. Кривые тока  $I_{\vartheta}(s)$  электровоза постоянного тока,  $I_d(s)$  и  $I_{da}(s)$  электровоза переменного тока наносят на график с кривыми  $\vartheta(s)$  и  $t(s)$ . Эти точки определяют по токовым характеристикам для скоростей, при которых на графике  $\vartheta(s)$  изменяется ускорение  $\vartheta = 0, 10, 20$  и т.д. км/ч,  $\vartheta_p$ , скоростей переходов на  $OB$  и далее для каждой точки излома линии  $\vartheta(s)$ . Масштаб построения кривых тока — произвольный, с учетом указанного в задании нормального ряда масштабов. Полученные точки соединяют прямыми линиями и нумеруют для удобства дальнейших расчетов 1-2, 2-3 и т.д. При выбеге и торможении токи равны нулю.

**Оформление шага.** Кривые  $I_{\vartheta}(s)$  для электровоза постоянного тока  $I_d$  и  $I_{da}(s)$  для электровоза переменного тока на общем графике с кривыми  $\vartheta(s)$  и  $t(s)$  с цифровыми отметками точек излома линий тока.

## Раздел V

### РАСЧЕТ РАСХОДА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ТЯГУ ПОЕЗДА И ТЕМПЕРАТУРЫ ОБМОТОК ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

#### **Шаг 11. Определение расхода элетрической энергии на тягу поезда**

На основании построенной кривой тока  $I_{\text{э}}(s)$  или активной составляющей тока  $I_{da}(s)$  и кривой времени  $t(s)$  определяют расход электрической энергии на тягу поезда  $A_{\text{т}}$ , кВт.ч, по кривым движения (графоаналитическим методом), изложенным в рекомендуемой литературе [2, § 14.2, 14.5; 3, § 13.2, 13.5 и прил. 1 и 2] (без учета расхода на вспомогательные цепи), по формуле

$$A_{\text{т}} = \frac{U_{\text{с}} \sum (I_{\text{ср}} \Delta t)}{60 \cdot 1000}, \quad (30)$$

где  $U_{\text{с}}$  — номинальное напряжение на токоприемнике, В;  
 $I_{\text{ср}}$  — средний ток  $I_{\text{э}}$  или  $I_{da}$ , за время  $\Delta t$ , равный полусумме токов в начале и конце времени  $\Delta t$ .

Данные из кривых тока и времени сводят в табл.13. Расход электрической энергии нужно рассчитать для каждого перегона и по участку в целом, отдельно при движении без остановок и с остановками на промежуточных станциях. Соответственно должны быть две табл.13. Кроме того, должна быть показана разница в расходе энергии при подходе к месту ограничения скорости с торможением поезда и на выбеге.

Кроме энергии, затрачиваемой на работу тяговых двигателей, электровоз потребляет электроэнергию на вспомогательные цепи  $A_{\text{вц}}$ . Эту энергию определяют как произведение среднего потребления электроэнергии вспомогательными цепями за 1 мин (см.табл. 1) на полное время работы электровозов.

Полный расход энергии  $A$  равен сумме расходов:

$$A = A_T + A_{вц}.$$

Таблица 13

**Расчет расхода электроэнергии**

Точки на кривой тока	Ток $I_{э}$ или $I_{da}$			Время $\Delta t$ , мин	$I_{cp}\Delta t$ , А мин	$\sum A_T$ , кВт.ч
	$I_{нач}$ , А	$I_{кон}$ , А	$I_{cp}$ , А			
1-2						
2-3						
....						
и т.д.						
Всего на перегоне А-Б					$\sum I_{cp}\Delta t =$	$\sum A_T =$
.....						
.....						
.....						
Всего на перегоне Б-В					$\sum I_{cp}\Delta t =$	$\sum A_T =$
Всего на участке А-В					$\sum I_{cp}\Delta t =$	$\sum A_T =$

Затем рассчитывают удельный расход электроэнергии по каждому перегону и участку в целом при движении с остановками и при безостановочном движении по промежуточной станции по формуле

$$a = \frac{1000 A}{m_c s}, \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{т} \cdot \text{км}}, \quad (31)$$

где  $m_c$  — масса состава, т;

$s$  — длина перегона ( или всего участка), на котором определяют удельный расход электроэнергии, км.

Результаты расчетов сводят в табл.14.

На основании расчетов определяют разницу в расходе электроэнергии при движении с остановкой и при безостановочном движении по промежуточной станции, а также при подходе к месту ограничения скорости с торможением и на выбеге.

**Оформление шага.** Таблицы расчетов расхода электроэнергии. Разница в расходе электроэнергии при движении с остановкой и при безостановочном движении, кВт · ч. Разница в расходе энергии при подходе к месту ограничения скорости с торможением и на выбеге, кВт · ч.

Таблица 14

**Расход энергии**

Перегон или участок	Длина $s$ , км	Движение без остановки		Движение с остановкой	
		$A$ , кВт·ч	$a$ , Вт·ч/т·км	$A$ , кВт·ч	$a$ , Вт·ч/т·км
АБ					
БВ					
АВ					

**Шаг 12. Определение превышения температуры обмоток тяговых двигателей над температурой окружающего воздуха при безостановочном движении**

Мощность тягового двигателя ограничивается нагреванием его обмоток. Установить ограничение по мощности тяговых двигателей в токовых или тяговых характеристиках нельзя, поскольку температура нагрева зависит не только от нагрузки, тепловых параметров обмоток и условий вентилиации, но и от времени, в течение которого двигатель работает с такими нагрузками. Это время можно знать только после решения уравнения движения поезда.

Длительная работа тяговых двигателей с большими токами может привести к нагреву обмоток до недопустимо высоких температур, что вызовет преждевременное старение изоляции и ее повреждение. Чтобы не допустить этого, необходимо после определения токов тяговых двигателей и времени работы с ними проверить, каково будет превышение температуры двигателей при работе с поездом по данному участку и не превысит ли она допустимых значений. Расчет проводят аналитическим методом.

Порядок расчета превышения температуры обмоток двигателя  $t$ , °С, приведен в [1, § 2.3.4.; 2, § 13.2; 3 § 12.1, 12.2, прил. 1 и 2]. Расчет проводят по формуле

$$\tau = \tau_{\infty} \frac{\Delta t}{T} + \tau_0 \left( 1 - \frac{\Delta t}{T} \right), \quad (32)$$

где  $\tau_{\infty}$  — установившееся превышение температуры тягового двигателя над температурой окружающей среды при работе двигателя с заданным средним током  $I_{д\text{ ср}}$  (см. рис. 4–6), °С;

$\Delta t$  — время, в течение которого идет ток,  $I_{д\text{ ср}}$  мин;

$T$  — тепловая постоянная времени, мин, указанная на рис. 4–6;

$\tau_0$  — начальное превышение температуры тягового двигателя в каждом промежутке времени. В курсовом проекте для первого расчета принять  $\tau_0 = 50$  °С, для каждого последующего расчета  $\tau_0$  берут, как  $\tau$  из предыдущего расчета.

В связи с тем, что формула (32) является приближенной, должно быть выдержано неравенство  $\Delta t / T \leq 0,1$ , при котором ошибка не превышает допустимой величины. В случае невыполнения этого условия интервал времени разбивают на 2 или несколько частей.

Результаты расчета сводят в табл.15.

Таблица 15

Расчет превышения температур тяговых двигателей  $T =$  , мин

№ строки	Ток $I_{д}$ , А			$\Delta t$ , мин	$\tau_{\infty}$ , °С	$\tau_{\infty} \frac{\Delta t}{T}$ , °С	$\tau_0 \left( 1 - \frac{\Delta t}{T} \right)$ , °С	$\tau$ , °С
	$I_{д\text{ нач}}$	$I_{д\text{ кон}}$	$I_{д\text{ ср}}$					

В первые пять граф таблицы заносят данные из графиков движения поезда и кривых токов. Значения  $\tau_{\infty}$  для каждого тока  $I_{д\text{ ср}}$  берут из графиков рис. 4–6.

В остальные графы заносят результаты расчетов. Нужно иметь в виду, что при  $I_{д} = 0$  значение  $\tau_{\infty}$  равно нулю тяговый двигатель охлаждается и  $\tau$  снижается.

Из полученных значений  $\tau$  выбирается наибольшее значение  $t_{\text{наиб}}$ . Она не должна превышать допустимые превышения температур  $120^{\circ}\text{C}$  для тяговых двигателей НБ-418К, НБ-412К с изоляцией обмотки якоря класса В и  $130^{\circ}\text{C}$  – для тяговых двигателей ТЛ-2К с изоляцией компенсационной обмотки класса В.

Если в результате расчета окажется, что  $\tau_{\text{наиб}}$  превышает допустимые температуры, то студент должен написать, какие меры нужно принять для ее снижения.

**Оформление шага.** Таблица расчета превышения температуры  $\tau$ . Наибольшее превышение температуры обмотки тягового двигателя ...  $^{\circ}\text{C}$ . Рассчитанная масса состава  $m_c = \dots$  т может быть установлена для участка АВ (или не может).

## Выводы

В выводах по курсовому проекту необходимо кратко обобщить этапы проделанной работы и отразить следующие результаты:

1. Оценить правильность выбранной массы состава.
2. Проанализировать режимы движения поезда с точки зрения скоростей и расхода электрической энергии на тягу поезда по каждому перегону и участку в целом.
3. Предложить другие режимы движения, которые позволили бы увеличить скорость движения или снизить расход энергии на тягу поезда по участку.

Объем выводов не должен превышать одной страницы.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ТЯГОВЫХ РАСЧЕТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭВМ

Для усвоения материала курса «Теория электрической тяги» и осмысленного выполнения расчетов необходимо использовать работу персонального компьютера в режиме диалога, при котором человек непосредственно участвует в процессе принятия решений, оставляя за машиной только расчетные функции.

Навыки работы на персональных компьютерах студенты получили при изучении информатики и вычислительной техники.

Пример схемы алгоритма тяговых расчетов (шаг 8 задания), позволяющего разработать программу и решить (интегрировать) уравнение движения поезда аналитическим методом в режиме диалога приведен на рис. 11.

В начале расчета по запросу ЭВМ вводятся исходные данные, характеризующие электровоз, состав и профиль пути:

- масса электровоза, т;
- масса состава, т;
- процентное соотношение и средняя масса груженых вагонов трех типов;
- варианты уклонов и длин элементов профиля пути;
- расчетный тормозной коэффициент;
- допустимые скорости на элементах профиля пути, км/ч;
- таблица тяговых характеристик электровоза: значения скорости  $\vartheta$ , км/ч, и через запятую соответствующее значение силы тяги  $F_k$ , кН;
- формулы для расчета параметров движения.

Перед расчетом необходимо подготовить на миллиметровой бумаге оси координат для графиков  $\vartheta(s)$  и  $t(s)$  в масштабах, приведенных в табл. 9. Под осью абсцисс надо показать элементы профиля пути: их уклоны, длины, а также километры от начала движения. На спусках должны быть показаны допустимые скорости движения.

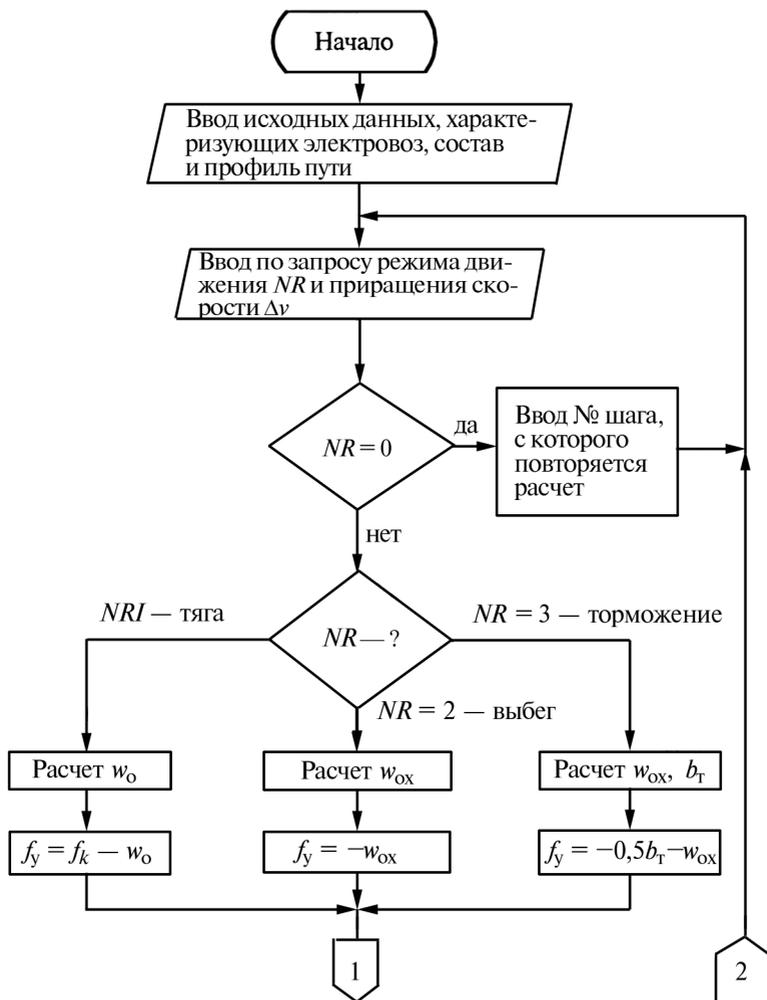


Рис. 11. Схема алгоритма тяговых расчетов

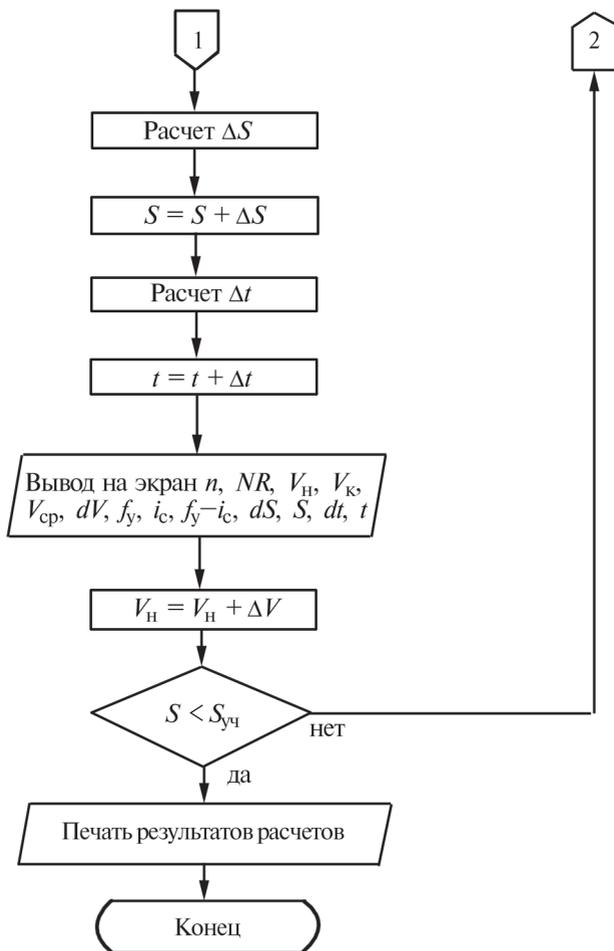


Рис. 11. Окончание

Интегрирование уравнения движения ведется по скорости (в машине —  $V$ ). На каждом шаге расчета вводятся номер режима движения  $NR$  и приращение скорости  $\Delta v$  (на экране дисплея и при печати  $dV$ ) с соответствующим знаком  $+$  или « $-$ ». Для режимов ведения поезда приняты следующие обозначения:  $NR = 1$  — тяга;  $NR = 2$  — выбег;  $NR = 3$  — торможение;  $NR = 0$  — возврат на несколько шагов назад и ввод номера шага, с которого расчет должен быть повторен.

После каждого шага расчета студент должен проанализировать полученные результаты и выбрать режим движения  $NR$  и приращение скорости  $dV$  на следующем шаге.

При расчете может оказаться, что из-за профиля пути при выбранном  $dV > 0$  поезд не может двигаться ускоренно (например, при движении на подъеме) или при  $dV < 0$  скорость поезда не снижается (например, при крутом спуске).

В этом случае студент может вернуться на один или несколько шагов назад и продолжить движение, изменив интервал скорости. Аналогично он поступает, если скорость в конце шага превышает допустимую.

Если рассчитанное значение  $s$  выходит за пределы элемента профиля пути, то следует уменьшить приращение  $dV$ .

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Правила тяговых расчетов для поездной работы (ПТР). — М.: Транспорт, 1985.
2. Теория электрической тяги. / Под ред. С.И. Осипова. — М.: Маршрут, 1995.
3. О с и п о в С . И . , О с и п о в С . С . Основы электрической тяги. — М.: 2006.

П р и м е ч а н и е. Литература [1] содержит основные официальные положения по тяговым расчетам и расчетные формулы; [2] — учебник для вузов железнодорожного транспорта — теоретические положения по электрической тяге, необходимые для изучения курса и защиты курсового проекта; [3] — учебник для техникумов и колледжей железнодорожного транспорта — основы теории, расчетные формулы и примеры выполнения тяговых расчетов.