

ич
й
ных
го
тета
спорта.

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ том II



Г. К. ГЕТЬМАН

Г. К. Гетьман

**ТЕОРИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ**

том II



МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И СВЯЗИ УКРАИНЫ

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
ИМЕНИ АКАДЕМИКА В. ЛАЗАРЯНА

Г. К. ГЕТЬМАН

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ

В двух томах

Том 2

ИЗДАТЕЛЬСТВО
ДНЕПРОПЕТРОВСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА ИМЕНИ АКАДЕМИКА В. ЛАЗАРЯНА
2010

УДК 621.33.01(075.8)

Г44

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. В. А. Браташ

д-р техн. наук, проф. В. Ф. Далека

д-р техн. наук, проф. Я. В. Щербак

Рекомендовано к печати ученым советом

Днепропетровского национального университета

железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна

(протокол № 9 от 06.05.2010)

Гетьман Г. К.

Г44 Теория электрической тяги: Монография: в 2 т. / Г. К. Гетьман. – Д.: Изд-во Днепропетр. нац. ун-та железн. трансп. им. акад. В. Лазаряна, 2010. – Т. 2. – 361 с.

Рос. мовою.

ISBN (полное собрание)

ISBN (том 2)

В Т. 2. монографии рассмотрены методы расчета и построения кривых движения поезда, расчет нагревания электрооборудования и энергетика движения поезда, расчет и нормирование расхода электроэнергии на тягу, решение задач тягового обеспечения и методика выбора рационального мощностного ряда тяговых средств.

Книга рассчитана на студентов, обучающихся по специальности «Электрический транспорт», а также инженерно-технических работников предприятий, осуществляющих разработку, создание и эксплуатацию тяговых средств электрического транспорта.

Ил. 162. Табл. 73. Библиогр.: 57 назв.

В Т. 2 монографії викладено методи розрахунку і побудови кривих руху поїзда, розрахунок нагрівання електрообладнання та енергетика руху поїзда, визначення і нормування витрат електроенергії на тягу, розв'язок задач тягового забезпечення і методика визначення раціонального ряду потужностей тягових засобів.

Книга розрахована на студентів спеціальності «Електричний транспорт», а також інженерно-технічних робітників підприємств, які здійснюють розробку, створення і експлуатацію тягових засобів електричного транспорту.

Іл. 162. Табл. 73. Бібліогр.: 57 назв.

Глава 11

ТЯГОВЫЕ РАСЧЕТЫ

11.1. Задачи тяговых расчетов

Под тяговыми расчетами понимают решение группы следующих задач:

- предварительное определение массы поезда применительно к конкретному участку обращения локомотивов, то есть при заданном типе электровоза и профиле железнодорожного участка;
- анализ возможных режимов ведения поезда по участку и основных показателей работы локомотива на линии (скорости движения, расхода электроэнергии, нагрева электрооборудования и др.);
- окончательный выбор массы поезда, рационального режима его ведения и основных показателей работы на линии – скорости движения и расхода электроэнергии на тягу поездов.

Основу решения названных выше задач тяговых расчетов составляют так называемые кривые движения поезда – зависимости скорости движения и времени хода от пройденного расстояния (пути), то есть кривая скорости $v(s)$, и кривая времени $t(s)$. К кривым движения условно можно отнести также кривые потребляемого тока $I_3(s)$.

Возможные пути определения кривых движения, а также вопросы, относящиеся к определению массы состава и решению тормозных задач, излагаются ниже. Методы определения расхода электроэнергии на тягу поездов и проверка массы состава по нагреву электрооборудования будут рассмотрены в последующих разделах работы.

Кривые движения определяют координаты состояния поезда (скорость и пройденный путь) в любой момент времени. Они дают исходные данные для разработки графика движения поездов и определения основных показателей работы поезда на линии (маршрутная и участковая скорости движения, время хода по перегонам, расход электроэнергии на тягу поездов и др.). По кривым движения разрабатываются рекомендации по рациональному управлению локомотивом (режимные карты) и определяются временные диаграммы изменения поездного тягового тока, позволяющего рассчитать затраты электроэнергии на тягу и установить приемлемость массы поездов по нагреву электрооборудования электровоза.

Следует добавить, что кривые движения используются также при составлении ряда разделов проектов строительства и электрификации железнодорожных линий. В частности на их основе решается задача расстановки сигналов автоблокировки, строятся кривые потребляемого тока и определяется нагрузка и основные параметры электрооборудования тяговых подстанций, сечение контактной сети и др. Кроме того, решаются так называемые тормозные задачи.

Из сказанного очевидно, что расчет кривых движения составляет основную часть тяговых расчетов.

Необходимо также отметить, что на результатах тяговых расчетов базируется решение вопросов, связанных с изысканием новых железнодорожных линий и проектированием их продольного профиля, а также решение задач тягового обеспечения, например, задач выбора параметров номинального режима тягового электроподвижного состава.

Обычно тяговые расчеты предусматривают:

- спрямление и приведение профиля пути заданного участка;
- расчет массы состава;
- расчет и построение диаграмм удельных сил, действующих на поезд в режимах тяги, выбега и торможения на площадке;
- решение тормозной задачи;
- расчет или построение кривых движения поезда;
- построение кривых потребляемого электровозом тока;
- проверка массы состава по нагреву электрооборудования (обычно – по нагреву обмоток тяговых двигателей);
- расчет расхода электроэнергии на движение поезда.

Ниже будут рассмотрены порядок и методика решения всех перечисленных выше задач тяговых расчетов за исключением двух последних, изложение которых приведено в главах 12 и 13.

Правила тяговых расчетов предписывают точность вычислений в тяговых расчетах, указанную в табл. 11.1.

Таблица 11.1

Единицы измерения и точность тяговых расчетов

Название величины		Буквенное обозначение	Единицы измерения	Точность (округление до:)
1		2	3	4
Масса состава	грузового поезда	m_c	т	50 т
	пассажирского поезда	m_c	т	25 т
Скорость движения		v	км/ч	Один знак после запятой
Уклон		i	промилле (‰)	Один знак после запятой
Сила тяги, тормозная сила и сила сопротивления движению		F_k, B_k, W_k	Н кгс	500 Н 50 кгс
Удельные силы		f_k, b_k, w_k	$\frac{Н}{кН}, \frac{кгс}{т}$	Два знака после запятой
Ток электровоза		I_3	А	5 А
Расход электроэнергии		A	кВт·ч	10 кВт·ч
Время хода расчетное		t	мин	0,1 мин
Время хода для графика движения: грузовых и пассажирских поездов при скоростях до 140 км/ч пригородных поездов и пассажирских поездов при скоростях свыше 140 км/ч		t	мин	1 мин
		t	мин	0,5 мин

1	2	3	4
Температура перегрева обмоток тяговых двигателей:			
на отдельном элементе расчета	τ	$^{\circ}\text{C}$	0,01
конечный результат	τ	$^{\circ}\text{C}$	1,0

11.2. Подготовка плана и профиля пути для тяговых расчетов

Различают подробный и сокращенный профиль железнодорожного пути.

Подробный профиль составляется при строительстве железной дороги. Он содержит (см. рис. 11.1):

- попикетные отметки высоты головки рельса и земли над уровнем моря или относительно другой отметки, принятой за нулевую;
- существующий уклон элементов профиля в ‰;
- план линии с указанием мест расположения кривых и их характеристик (длина $s_{\text{кр}}$, радиус кривизны $R_{\text{к}}$, центральный угол α , длина переходных кривых l_1 и l_2 , место расположения начала переходных кривых);

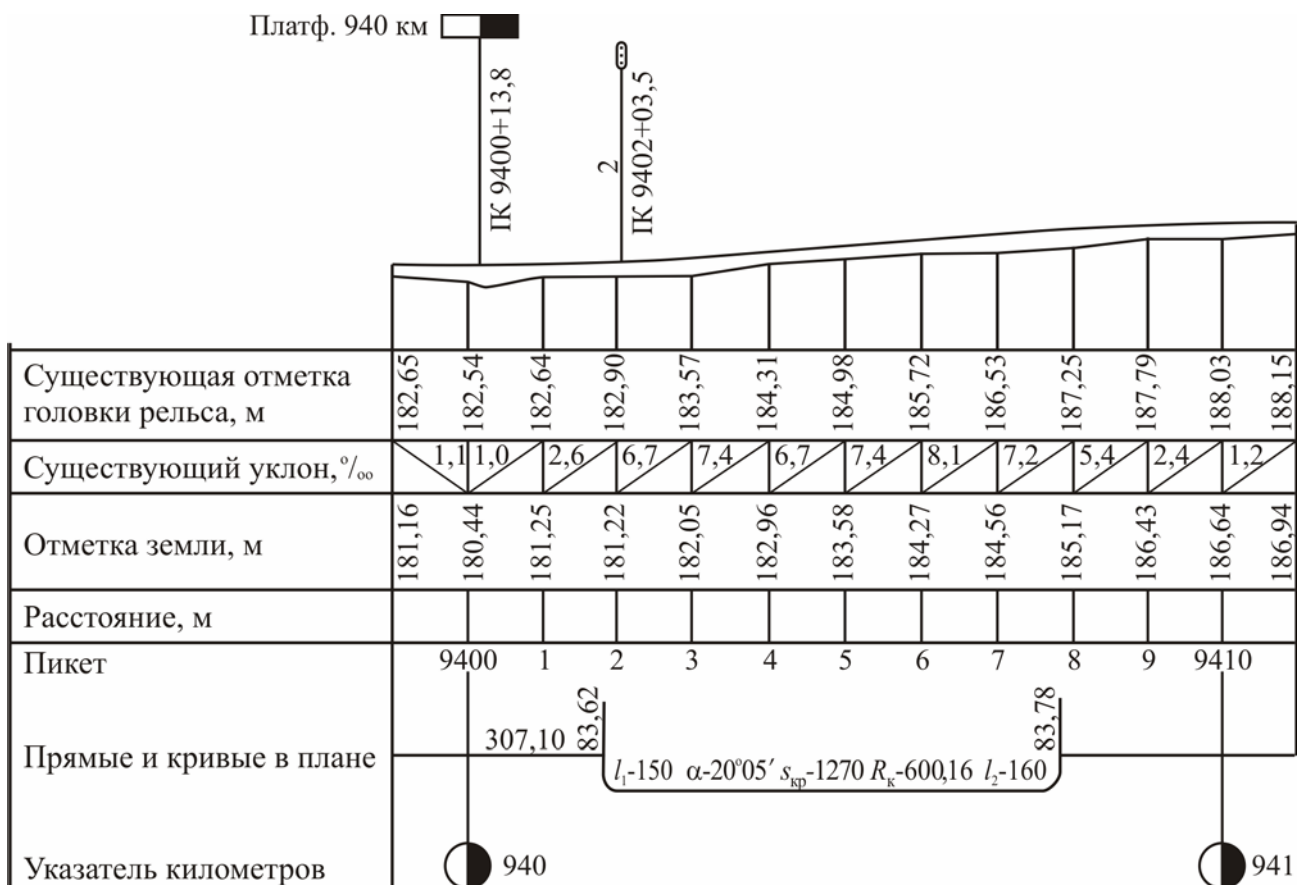


Рис. 11.1. Фрагмент профиля железнодорожного пути

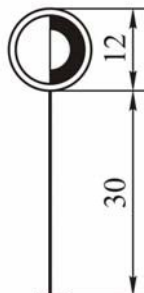
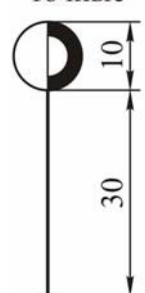
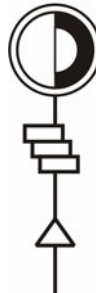
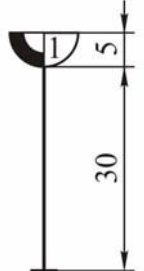
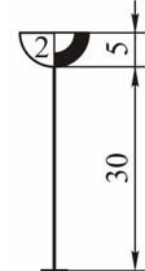
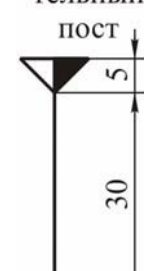
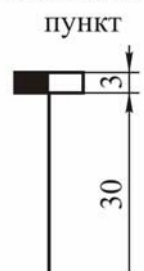
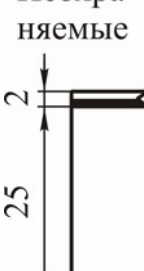
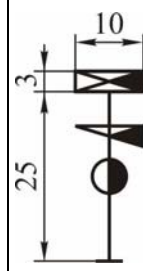
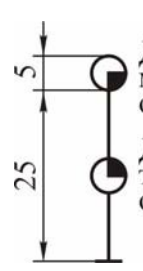
- места расположения отдельных пунктов, путевых знаков (километровых, пикетных и др.), искусственных сооружений, сигналов и т. п.;

– описание прилегающей полосы: рельеф, характеристика почвы, характер растительности и т. п. (на рис. 11.1 не показаны).

Для изображения профиля железнодорожного участка используют специальные условные обозначения [42], часть которых приведена в табл. 11.2.

Таблица 11.2

Условные обозначения на продольном профиле по ГОСТ 21.402-93

Объект	Обозначение	Объект	Обозначение
Станции	Участковые  Промежуточные 	Станции	С тяговым хозяйством  Локомотивное депо Пункт оборота С вагонным хозяйством  Вагонное депо Пункт технического обслуживания Проверка тормозов
Разъезды	1-й очереди  2-й очереди 	Другие объекты	Вспомогательный пост  Пассажирский остановочный пункт  Указатель километров 
Перезды	Неохраняемые  Охраняемые 1 категория 2 категория 3 категория 	Линейно-путевые здания	Пункт дорожного мастера Пункт бригадира Дом путевых обходчиков  Дом мостового обходчика Дом тоннельного обходчика 

Примечание. Сторона заливки знаков показывает местоположение здания по отношению к оси пути по счету километров.

Сокращенный профиль обычно содержит путевые километровые отметки, отдельные пункты, а также данные о параметрах отдельных элементов профиля, о местах расположения кривых пути и их характеристики (длина и центральный угол).

Участки профиля с однообразным уклоном называются элементами профиля. Границы элементов профиля, т. е. места расположения переломов (изменений величины уклонов) профиля отличаются вертикальными линиями.

В зависимости от характера уклона на данном элементе профиля их делят на подъемы, спуски и площадки (горизонтальные участки). Внутри изображения каждого элемента профиля приводятся его характеристики в виде дроби (см. рис. 11.2), числитель и знаменатель которой показывают соответственно величину уклона (число тысячных) и длину в метрах, а наклон черты дроби указывает направление уклона.

На сокращенном профиле указываются действительные места перелома продольного профиля пути. Как подробный, так и сокращенный профиль состоит из большого количества относительно коротких элементов. На каждом переломе профиля изменяются действующие на поезд силы сопротивления движению, поэтому в целях снижения трудоемкости построения кривых движения для тяговых расчетов выполняют так называемое спрямление и приведение профиля пути.

Спрямление профиля – это замена нескольких смежных элементов реального профиля одним элементом с однообразным уклоном и длиной, равной сумме длин объединяемых элементов.

Реальный профиль спрямленного участка представляет в профиле кусочно-линейную функцию пути (см. рис. 11.2), а спрямленный профиль – прямую линию. Поэтому рассматриваемое спрямление профиля называют также спрямлением в профиле.

Если через H_H и H_K обозначить соответственно отметки высот начала первого и конца последнего элементов профиля участка, то уклон спрямляемого участка (спрямленный уклон) определяется как

$$i'_c = \frac{H_K - H_H}{s_c}, \quad (11.1)$$

где s_c – длина спрямленного элемента.

Приведением профиля называют замену кривых пути фиктивным подъемом i'' , равноценным по величине работе сил сопротивления движению заменяемым кривым.

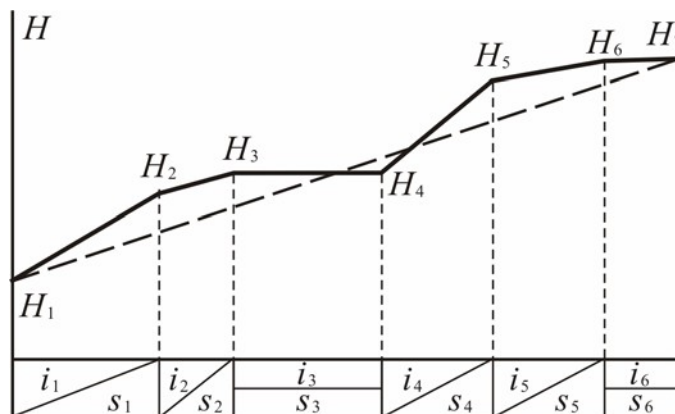


Рис. 11.2. Спрямление профиля пути

Сопротивление движению от кривых относят к элементам спрямленного профиля, на которых они расположены. После приведения профиля железнодорожная линия в плане представляется прямолинейной. В связи с этим приведение профиля называют также спрямлением профиля в плане или спрямлением кривых.

Результирующий уклон спрямленного участка определяется как

$$i_c = i'_c + i''_c. \quad (11.2)$$

Знак i'_c зависит от направления движения поезда. То есть, если элемент профиля в чётном направлении является подъемом, то в нечетном направлении движения этот элемент является спуском.

Фиктивные уклоны от кривых i'_c всегда положительны, то есть являются подъемами, поэтому при спрямлении кривых пути увеличивается кривизна подъемов и уменьшается крутизна спусков приведенного профиля. Следовательно, при наличии на участке кривых приведенные профили для разных направлений движения будут отличаться. Таким образом подготовка профиля для тяговых расчетов предусматривает его приведение для обоих направлений движения.

Теоретической основой спрямления является равенство механической работы на спрямленном и реальном профиле. То есть, спрямленный элемент профиля должен быть эквивалентным реальному профилю по работе локомотива на преодоление основного сопротивления движению и сил сопротивления движению от уклонов пути.

Работа по преодолению сил сопротивления движению от уклонов пути равна изменению потенциальной энергии поезда при проследовании им участка и в случае расчета спрямленного уклона по формуле (11.1) её значение одинаково для реального и спрямленного профиля.

На сокращенном профиле, используемом для тяговых расчетов, часто не указывают отметки высот на границах элементов профиля. Поэтому в Правилах тяговых расчетов рекомендуется формула, позволяющая выполнить спрямление профиля по заданной величине уклонов и протяженности элементов. Она выводится из следующих соображений.

Перепад высот на длине s_j каждого j -го элемента профиля составляет

$$\otimes H_j = i_j s_j, \quad (11.3)$$

и формулу (11.1) можно привести к виду

$$i'_c = \frac{i_1 s_1 + i_2 s_2 + i_3 s_3 + \dots + i_n s_n}{s_1 + s_2 + s_3 + \dots + s_n} \quad \text{или} \quad i'_c = \frac{\sum_{j=1}^n i_j s_j}{s_c}, \quad (11.4)$$

где n – число спрямляемых элементов профиля.

Аналогичный подход используется и при спрямлении кривых.

Работа сил сопротивления движению поезда от кривой пути

$$A_r = (P + Q) \sum_{i=1}^m w_{ri} s_{kpi}, \quad (11.5)$$

где $P + Q$ – вес поезда;

m – число кривых на отдельном спрямленном элементе профиля;

w_{ri} и s_{kpi} – соответственно сопротивление движению и длина i -ой кривой.

Работа по преодолению фиктивного уклона

$$A_\phi = (P + Q) i_c'. \quad (11.6)$$

Из условия $A_\phi = A_r$ получаем

$$i_c'' = \frac{\sum_{i=1}^m w_{ri} s_{kpi}}{s_c}. \quad (11.7)$$

Если в (11.7) подставить значение w_r по (3.28) и (3.29а), получим рекомендованные Правилами тяговых расчетов расчетные формулы:

$$i_c'' = \frac{700}{s_c} \sum_{i=1}^m \frac{s_{kpi}}{R_i}; \quad i_c'' = \frac{12,2}{s_c} \sum_{i=1}^m \frac{\alpha_i^0}{i}. \quad (11.8, a); (11.8, б)$$

Формулы (11.4) и (11.8) дают значения спрямленного уклона i_c'' , обеспечивающее равенство работы сил сопротивления движению от уклонов и кривых на реальном и спрямленном профиле.

Малое различие величины работы по преодолению сил основного сопротивления движению на реальном и спрямленном профиле будет иметь место только при реализации в обоих случаях близких по значению скоростей движения. Поэтому погрешность, вносимая в тяговые расчеты, становится ощутимой в случае значительного разброса величины уклонов и длин объединяемых при спрямлении профиля элементов. По этой причине Правилами тяговых расчетов при спрямлении профиля допускается:

– объединять только элементы профиля с уклонами одного знака (площадки могут объединяться как с подъемами, так и со спусками);

– объединение только таких элементов профиля, длина которых соответствует условию

$$s_j \leq \frac{2000}{[i_j]}, \quad (11.9)$$

где s_j – длина любого j -го элемента реального профиля пути, входящего в спрямленный элемент;

$[i_j] = i'_c - i_j$ – абсолютная величина разности между уклоном спрямленного элемента и проверяемого j -го элемента действительного профиля.

Проверке по (11.9) подлежит каждый элемент спрямляемого участка.

Не допускается спрямление профиля в границах отдельных пунктов. Кроме того, не следует спрямлять инерционные и расчетные подъемы. Это может привести к завышению расчетного веса поезда, вождение которого на реальном профиле окажется невозможным.

Характеристики исходного профиля и результаты его спрямления обычно представляют в виде табл. 11.3.

Таблица 11.3

Спрямление и приведение профиля пути

Исходный профиль					Спрямленный профиль					
№ элемента	Длина элемента s , м	Уклон i , ‰	Кривые		Длина спрямленного участка	Спрямленный уклон i'_c , ‰	Фиктивный подъем от i''_c , ‰	Приведенный уклон $i_c = i' + i''$, ‰	№ спрямленно	Расчеты и приме-
			радиус R , м, или угол α°	длина $s_{кр}$, м						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Исходный и спрямленный профиль изображают на планшете из миллиметровой бумаги, как показано на рис. 11.3. Если предполагается построение кривых движения графическим методом, то для изображения продольного профиля принимают один из масштабов пути, приведенных в табл. 11.4, а и 11.4, б.

Отметим, что приведенные в указанных выше таблицах масштабы для графических расчетов кривых движения выражены длиной отрезков, представляющих на чертеже единицы измерения изображаемых величин и соответствуют определенным значениям коэффициента инерции вращающихся масс $1 + \gamma$. Для других значений коэффициента $1 + \gamma$ масштабы можно пересчитать по формулам (11.51) и (11.52), которые будут получены в п. 11.5.3. Однако следует иметь в виду, что ошибки, возникающие при отклонении расчетного значения γ от действительного, даже до 10-20%, незначительны.

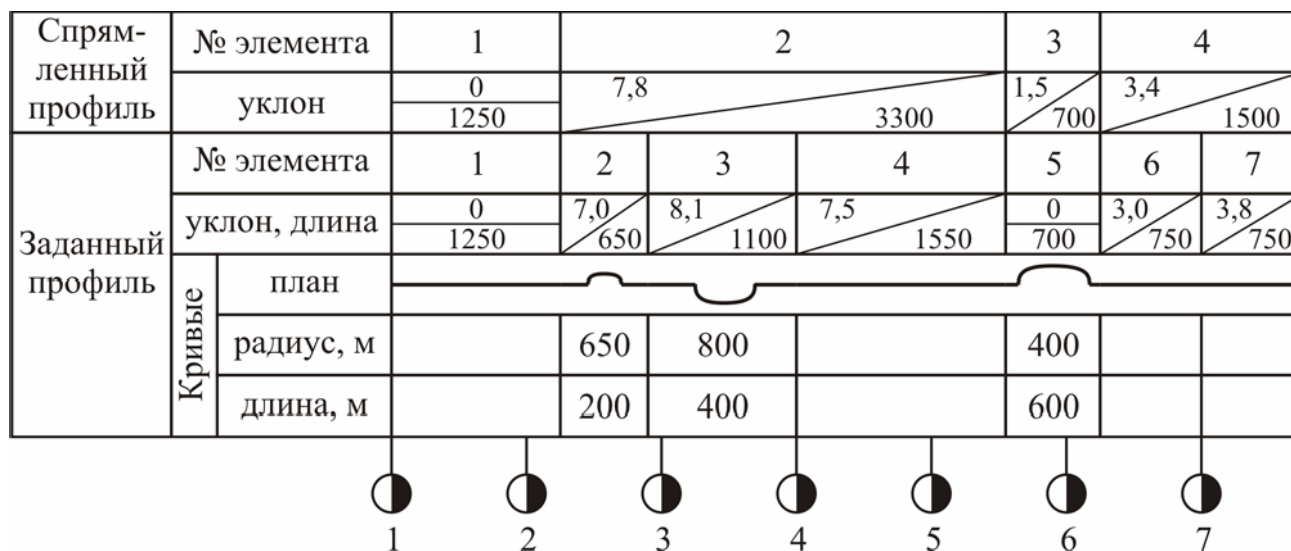


Рис. 11.3 Профиль пути для тяговых расчетов

Таблица 11.4, а

Масштабы для графических расчетов кривых движения, рекомендованные Правилами тяговых расчетов для магистральных железных дорог (при $1+\gamma=1,06$)

Изображае- мая величина	Обозначение и раз- мерность масштаба	Для грузовых и пасса- жирских поездов			Для электро- поездов		Для тормозных и специальных расчетов	
		1	2	3	1	2	1	2
Сила	m_f , мм/(Н/кН)	12	6	10	2	3	2	1
Скорость	m_v , мм/(км/ч)	2	1	2	1	1,5	2	1
Путь	m_s , мм/км	40	20	48	60	90	240	120
Постоянная	Δ , мм	30	30	25	50	50	—	—
Время	m_t , мм/ч	600	600	600	—	—	—	—
Время	m_t , мм/мин	10	10	10	50	50	—	—

Таблица 11.4, б

Масштабы для графических расчетов кривых движения городского и карьерного электротранспорта

Изображае- мая величина	Обозначение и размерность масштаба	Значение масштабов			
		карьерный электро- транспорт $(1 + \gamma) = 1,06$	трамвай и троллейбус $(1 + \gamma) = 1,1$	метрополитен $(1 + \gamma) = 1,1$	
				1	2
Сила	m_f , мм/(Н/кН)	4	2	2	3
Скорость	m_v , мм/(км/ч)	2	2,5	2	2
Путь	m_s , мм/км	120	360	230	160
Постоянная	$\otimes$, мм	10	41,5	31	45
Время	m_t , мм/с	10	5/3	1	1

11.3. Расчет массы грузовых поездов

11.3.1. Краткие сведения об определении массы и скорости движения поездов

Масса и скорость движения грузовых поездов являются основными параметрами, определяющими эффективность работы железнодорожного транспорта, поэтому в проблеме оптимизации перевозочного процесса определение массы поезда занимает центральное место.

Постановка и условия решения задачи определяют несколько аспектов в проблеме выбора массы поезда.

Так на дальнюю перспективу задача определения оптимальной массы обычно решается с определением ходовой скорости, целесообразной степени удлинения приемо-отправочных путей станций и с выбором параметров тяговых средств для освоения прогнозируемых объемов перевозок. В такой постановке проблема определения оптимальной массы поезда относится к задаче усиления провозной способности железных дорог и рассматривается в курсе «Эксплуатация железных дорог». Методику решения таких задач можно найти в [23].

В рамках же тяговых расчетов решается задача ближней перспективы – масса поезда определяется при заданных параметрах технических средств (длина приемо-отправочных путей, характеристики тяговых средств, допускаемые скорости движения и т. д.).

Действующими Правилами производства тяговых расчетов [4] предписывается определять массу состава и скорости движения грузовых поездов «исходя из условия полного использования мощности и тяговых качеств локомотивов, а также кинетической энергии поезда». Такой, утвержденный Правилами тяговых расчетов, принцип расчета массы и режимов ведения поезда, получивший название принципа максимума, является бесспорным в случае, когда в качестве основной цели ставится задача достижения максимальной провозной способности железных дорог. Его реализация способствует повышению эффективности железнодорожных перевозок и значительному упрощению решения задач тяговых расчетов за счет использования одновариантного способа расчета массы состава и существенного снижения степени неопределенности, имеющей место в задаче выбора оптимального управления поездом.

В зависимости от характеристик продольного профиля и условий пропуска поездов масса состава может определяться двумя способами:

- из условия обеспечения безостановочного движения поезда с установившейся скоростью по расчетному подъему;
- с учетом использования кинетической энергии поезда при ведении поезда на труднейших подъемах.

Оба названных способа рекомендуются Правилами тяговых расчетов. Их сущность и условия применимости будут освещены далее.

Определенная тем или другим способом масса поезда проверяется на приемлемость её для эксплуатации по возможности:

- трогания поезда с места;
- прохождения более крутых, чем расчетный, подъемов, если таковые есть на участке;
- размещения поезда в пределах полезной длины приемо-отправочных путей станций;
- вождения поездов расчетной массы без превышения допустимой температуры обмоток тяговых двигателей.

Для реализации принципа максимума *определяют так называемую критическую массу состава, то есть наибольшую массу, допустимую на данном поездо-участке по тяговым возможностям локомотива.*

Однако критическая масса не всегда принимается как норма массы. Норма массы определяется с учетом условий работы данного поездо-участка. В частности в ряде случаев выгодно установить унифицированную для данного направления норму. Кроме того, длина поезда в любом случае не должна превышать полезную длину приемо-отправочных путей. По этой причине при поездных погонных нагрузках, ниже некоторой величины, масса поезда, установленная по длине приемо-отправочных путей, будет ниже критической.

В конечном итоге норма массы определяется по результатам технико-экономических расчетов.

Возможность надежного вождения поездов установленной одним из рекомендованных Правилами тяговых расчетов способов не вызывает сомнений в том случае, если в реальных условиях действующие на поезд силы будут равны их значениям, принятым в ходе расчетов. Однако в условиях эксплуатации на режим работы электровоза оказывают влияние ряд не поддающихся учету факторов (колебания напряжения в сети, метеорологические условия, техническое состояние и др.). Кроме того, надежность тяги в определенной степени зависит от организации движения поездов (непредусмотренные графиком движения поезда остановки, неравномерность пропуска по участку и др.). Поэтому приемлемость расчетной массы поезда по надежности тяги в обязательном порядке подтверждается результатами опытных поездок, методика определения которых регламентируется специальными инструктивными указаниями.

Следует подчеркнуть, что длина поезда заданного веса зависит от статической нагрузки на ось вагона. Поэтому при высоких значениях нагрузки масса поезда определяется исключительно тяговыми свойствами электровоза и характеристиками продольного профиля (крутизной и продолжительностью подъемов). Такие поезда называются *полновесными*, а масса составов таких поездов равна критической.

При уменьшении статической нагрузки на ось вагона, начиная с некоторого её значения, расчетная масса состава снижается, так как длина поезда (или количество вагонов в составе) не может превышать полезную длину приемо-отправочных путей станций. Такие поезда, масса которых меньше критической, а количество вагонов в составе соответствует длине приемо-отправочных путей, называют *полносоставными*.

Статическая нагрузка на ось грузовых поездов есть величина случайная. Она характеризуется существенной вариацией как для каждого назначения плана формирования поездов, так и на любом направлении. В связи с этим на любом поездо-участке будет иметь место обращение как полносоставных, так и полновесных поездов. В целях максимального использования технических средств железнодорожного транспорта при формировании поездов следует соблюдать правило, согласно которому масса и длина поездов должна определяться условиями полновесности или полносоставности. Следует отметить, что по ряду причин на практике нередко случаи отступления от указанного выше правила формирования поездов.

Для каждого поездо-участка составляются и утверждаются начальником железной дороги так называемые нормативы к графику движения грузовых поездов. Ими, помимо критической массы состава, устанавливаются так называемые графиковые нормы массы поездов (составов). Графиковые нормы могут отличаться от критической нормы в зависимости от используемой технологии организации перевозок (применение кратной тяги или подталкивания, унификация массы маршрутных поездов, пропуск по отдельным ниткам графика ускоренных грузовых или рефрижераторных поездов и т. п.).

Для обеспечения надлежащей надежности тяги в условиях существенной зависимости климатических условий от времени года допускается определять массу состава для летнего и зимнего периода. На железных дорогах Украины устанавливаются всесезонные нормы массы поездов.

Составность пассажирских поездов, обращающихся по целым направлениям, устанавливается Укрзализницею, исходя из необходимости освоения существующего пассажиропотока. Составность пассажирских поездов, обращающихся в пределах одной дороги, утверждается начальником дороги.

11.3.2. Расчет массы состава из условия движения поезда с установившейся скоростью по расчетному подъему

При наличии на участке расчетного подъема масса состава определяется из условия движения поезда по этому подъему с установившейся скоростью, равной расчетной скорости, установленной нормативами Правил тяговых расчетов для электровоза данного типа.

При движении поезда по расчетному подъему запас кинетической энергии, созданный на предшествующих элементах профиля, исчерпывается на начальной части подъема и после достижения установившегося значения скорости движение поезда происходит под действием только двух сил – силы тяги электровоза и сопротивления движению.

Таким образом, *расчетный подъем – это наиболее тяжелый (крутой) в выбранном направлении движения подъем, протяженность которого достаточна для того, чтобы скорость поезда в режиме тяги достигла установившегося значения.*

Наиболее крутой подъем является расчетным только в случае, когда его протяженность достаточна для достижения установившейся скорости.

Если самый крутой подъем имеет сравнительно небольшую протяженность и расположен после легких элементов профиля, в силу чего возможен подход поезда к началу подъема с высокой скоростью, то он может быть преодолен за счет накопленной кинетической энергии. Такой подъем называют инерционным или скоростным и он не является расчетным. В подобных случаях в качестве расчетного следует принять менее крутой подъем большей протяженности, а расчетную массу проверить на возможность прохождения поездом наиболее крутого подъема с использованием живой силы поезда.

Расчетный режим электровоза – это режим нагружения, обеспечивающий движение поезда расчетной массы по расчетному подъему. Он характеризуется двумя параметрами – расчетной силой тяги $F_{кр}$ и расчетной скоростью v_p .

В начальный период электрификации техника электровозостроения не позволяла создать тяговый привод требуемой для эксплуатации мощности, поэтому расчетный режим для таких электровозов назначался из условия реализации на расчетном подъеме максимальной полезной мощности $P = F_{кр}v_p$.

В этом случае позиция регулирования, на которой выбран расчетный режим определяется однозначно, а именно:

- при ограничении силы тяги по условиям сцепления – на последней позиции ослабления возбуждения, поскольку переход на эти позиции сопровождается ростом расчетной скорости без заметного снижения силы тяги (массы поезда);

- при ограничении силы тяги допустимым током двигателей – на позиции полного возбуждения, ибо в этом случае переход на позиции ослабленного возбуждения не оправдан, поскольку сопровождается заметным снижением расчетной силы тяги и, следовательно, массы поезда.

С изложенных позиций расчетный режим определяется для электровозов ВЛ22^М, ВЛ23 и ВЛ8.

Для современных электровозов, характеризующихся достаточной степенью резервирования мощности, расчетный режим выбирается по предельно допустимому значению силы тяги на позициях регулирования, соответствующих номинальной или несколько меньшей мощности.

Параметры расчетного режима рекомендуются заводами-изготовителями или профильными научно-исследовательскими организациями и приводятся в Правилах тяговых расчетов в качестве нормативов. Их значения для современных грузовых электровозов приведены в табл. 11.5.

Снижение расчетной силы тяги против приведенных в табл. 11.5 значений допускается в случаях, когда Правилами тяговых расчетов предусматривается снижение расчетного коэффициента сцепления (наличие на подъеме кривых малого радиуса (менее 500 м); движение в тоннелях; сезонные изменения коэффициента сцепления).

Параметры расчетного режима и сила тяги электровозов при трогании

Электровоз	Расчетный режим			Сила тяги при трогании $F_{кр}$, кН (кгс)	Масса электро-воза, т
	Позиция ре-гулирования	Сила тяги $F_{кр}$, кН (кгс)	Скорость v_p , км/ч		
ВЛ8	П, ОВ1	456 (46500)	43,3	595 (60700)	184
ВЛ10, ВЛ11 (2 секции)	П, ПВ	451 (46000)	46,7	614 (62600)	184
ВЛ11 (3 секции)	П, ПВ	677 (69000)	46,7	902 (92000)	276
ВЛ10 ^у	П, ПВ	492 (50200)	45,8	673 (68600)	200
ДЭ1	П, ПВ	456 (46500)	50,8	640 (65200)	184
2ЕЛ4	П, ПВ	468 (47700)	51,5	637 (62500)	192
ВЛ60 ^к , ВЛ60 ^р	29п	361 (36800)	43,5	487 (49680)	138
	25п	369 (37600)	37,0*		
ВЛ80 ^к	29п	481 (49000)	44,2	649 (66200)	184
	25п	491 (50000)	38,0*		
ВЛ80 ^т , ВЛ80 ^с	29п	502 (51200)	43,5	678 (69100)	192
	25п	512 (52170)	37,5		
ВЛ80 ^р	0,5 зоны 4	502 (51200)	43,5	678 (69100)	192
	Зона 3	513 (52300)	37,0*		
ВЛ82	П, ПВ	465 (47400)	51,0**	628 (64000)	200
ВЛ82 ^м	П, ПВ	488 (49700)	50,5**	657 (67000)	200
2ЕЛ5	Зона 4, ПВ	535 (54500)	48,0	706 (72000)	192

* Применяется для эксплуатируемых дорог при необходимости увеличить массу состава и при движении поезда с использованием кинетической энергии.

** Для работы на постоянном и переменном токе.

Для условий железных дорог Украины вопросы целесообразности снижения расчетных сил сцепления и соответственно расчетной силы тяги электровозов возникают только при назначении критических масс поездов для перевальных участков Львовской железной дороги, характеризующихся сложным профилем пути (в плане).

Для обеспечения возможности движения поезда по расчетному подъему с расчетной скоростью, масса состава должна быть выбрана так, чтобы сила сопротивления движению поезда с расчетной скоростью на этом подъеме была равной расчетной силе тяги, то есть из условия

$$F_{кр} = W_{кр}, \quad (11.10)$$

где $F_{кр}$ – расчетная сила тяги электровоза (сила тяги, реализуемая на расчетном подъеме);

$W_{кр}$ – сопротивление движению поезда на расчетном подъеме.

Условие (11.10) следует из уравнения движения поезда (1.9) при $B_k = 0$ и $dv/dt = 0$.

Сопротивление движению поезда на расчетном подъеме представим

как
$$W_{кр} = P(w'_{ор} + i_p) + Q(w''_{ор} + i_p), \quad (11.11)$$

где P и Q – вес электровоза и состава соответственно, кН;

$w'_{ор}$ и $w''_{ор}$ – основное удельное сопротивление движению соответственно электровоза и состава при расчетной скорости Н/кН;

i_p – расчетный подъем ‰.

Подстановкой (11.11) в (11.10) и путем несложных преобразований получаем выражения для определения критического веса и критической массы состава в виде:

$$Q = \frac{F_{кр} - P(w'_{ор} + i_p)}{w''_{ор} + i_p}, \text{ кН}; \quad (11.12, a)$$

$$m_c = \frac{0,102 F_{кр} - m_{л}(w'_{ор} + i_p)}{w''_{ор} + i_p}, \text{ т}, \quad (11.12, б)$$

где $m_{л}$ – масса локомотива (электровоза) в т.

Сопротивление движению грузовых вагонов зависит от статической нагрузки на ось вагона, поэтому последняя при расчете массы состава устанавливается на основе статистических данных.

Согласно Правилам тяговых расчетов масса состава округляется до 50 т.

11.3.3. Проверка массы состава на трогание

Проверка массы состава на трогание с места обусловлена увеличением сопротивления движению поезда после стоянки по сравнению с основным сопротивлением движению, которое принимается в расчет при определении массы состава.

Обозначим через $Q_{тр}$ и $m_{тр}$ предельные значения веса и массы состава поезда, который может быть взят с места. Сопротивление движению такого поезда при трогании

$$W_{тр} = (P + Q_{тр})(w_{тр} + i_{тр}), \quad (11.13)$$

где $w_{тр}$ – удельное сопротивление движению поезда при трогании;

$i_{тр}$ – уклон участка, для которого проводится проверка на возможность трогания.

Значение $Q_{тр}$ определим из условия

$$F_{\text{ктр}} = W_{\text{тр}}, \quad (11.14)$$

где $F_{\text{ктр}}$ – сила тяги электровоза при трогании, определяемая как максимальная сила тяги, которая с учетом существующих ограничений может быть реализована при скорости $v = 0$. Значение $F_{\text{ктр}}$ нормируется Правилами тяговых расчетов для всех типов тягового подвижного состава (см. табл. 11.5).

Представив $W_{\text{тр}}$ в выражении (11.14) согласно (11.13), получим

$$Q_{\text{тр}} = \frac{F_{\text{ктр}}}{w_{\text{тр}} + i_{\text{тр}}} - P, \text{ кН}; \quad m_{\text{тр}} = \frac{0,102 F_{\text{ктр}}}{w_{\text{тр}} + i_{\text{тр}}} - m_{\text{л}}, \text{ т.} \quad (11.15, a); (11.15, б)$$

Трогание поезда при массе состава $m_{\text{с}}$ возможно в случае выполнения условия

$$m_{\text{тр}} > m_{\text{с}}. \quad (11.16)$$

Отметим несколько вопросов, относящихся к проверке массы поезда на трогание.

Сопротивление движению при трогании электровоза и отличающихся нагрузкой на ось вагонов рассчитывается по формулам (3.32) и (3.33), а поезда – с помощью формул (3.41) и (3.43).

Расчетная масса состава должна удовлетворять условиям трогания на отдельных пунктах. Этим положением Правил тяговых расчетов определяется правило выбора уклона $i_{\text{тр}}$.

В настоящее время на железных дорогах Украины эксплуатируются только вагоны на роликовых подшипниках, для которых, как следует из выражений (3.32) и (3.33), сопротивление при трогании приблизительно в пять раз ниже, чем подвижного состава на подшипниках скольжения. По этой причине масса состава в настоящее время практически не ограничивается условиями трогания.

Правила тяговых расчетов не требуют проверки массы поезда на трогание на труднейших подъемах. На практике такая проверка всегда производится (см. приложение П). Однако отрицательный результат проверки не является поводом для снижения расчетной массы, а лишь указывает на необходимость исключения возможности остановки поезда на элементах профиля, на которых он не может быть взят с места.

11.3.4. Проверка массы состава по длине приемо-отправочных путей

Проверка массы состава по длине приемо-отправочных путей станций сводится к проверке выполнимости условия

$$l_{\text{п}} \leq l_{\text{поп}}, \quad (11.17)$$

где $l_{\text{п}}$ – длина поезда;

$l_{\text{поп}}$ – полезная длина приемо-отправочных путей станций на участках обращения рассматриваемого поезда (в странах СНГ в настоящее время используют четыре стандарта длины станционных путей: 720, 850, 1050 и 1250 м).

Длина поезда определяется как

$$l_{\text{п}} = l_{\text{с}} + n_{\text{л}} l_{\text{л}} + 10, \quad (11.18)$$

где $l_{\text{с}}$ – длина состава, м;

$l_{\text{л}}$ – длина локомотива по осям автосцепок, м;

$n_{\text{л}}$ – число локомотивов в поезде.

Для существующего подвижного состава значения $l_{\text{с}}$ и $l_{\text{л}}$ приведены в табл. 11.6.

Таблица 11.6

Длина подвижного состава

Род подвижного состава	Длина, м
Вагоны грузового парка	
Восьмиосные цистерны	21
Четырехосные крытые и изотермические	15
Четырехосные крытые для перевозки скота (специальные)	18
Четырехосные полувагоны и платформы	14
Четырехосные цистерны, цементовозы и думпкары	12
Электровозы:	
ВЛ8	28
ВЛ10, ВЛ10 ^у , ВЛ11 (две секции), ДЕ1, ВЛ80 (всех индексов), ВЛ82, 2ЕЛ5, 2ЕЛ4	33
ВЛ60 ^к , ВЛ60 ^р , ВЛ60 ^{пк}	21
ЧС2, ЧС2 ¹ , ЧС4, ЧС4 ¹	19

Длина состава

$$l_{\text{с}} = \sum_{i=1}^k l_i n_i, \quad (11.19)$$

где l_i – длина i -го типа вагона по осям автосцепок, м;

n_i – количество вагонов i -го типа в составе;

k – количество типов вагонов в составе, отличающихся длиной.

Количество вагонов i -го типа

$$n_i = \frac{\alpha_i m_{\text{с}}}{m_{\text{в}i}},$$

где α_i – доля (по массе) вагонов i -го типа в составе;

$m_{\text{в}i}$ – масса вагона i -го типа.

Если условие проверки (11.17) не выполняется, то масса поезда снижается в необходимой степени. В отдельных случаях могут назначаться особые условия пропуска таких поездов.

Чтобы обеспечить выполнимость условия (11.17) в условиях эксплуатации, в нормативах к графику движения поездов наряду с критической массой состава указывается допустимая на каждом поездо-участке длина состава, измеренная в условных вагонах.

11.3.5. Проверка возможности преодоления труднейших подъемов

Проверка массы состава на возможность преодоления труднейших инерционных подъемов базируется на том, что согласно Правилам тяговых расчетов скорость движения на участке не должна быть ниже скорости расчетного режима v_p (не считая элементов профиля, для которых по каким-либо причинам установлена допустимая скорость движения ниже расчетной).

Стало быть, рассчитанную по (11.15) массу поезда после проверки по длине приемо-отправочных путей можно считать приемлемой, если на всех элементах профиля, в том числе и на труднейших подъемах, возможна реализация скорости поезда, большей или равной расчетной.

На рис. 11.4 показана кривая скорости $v(s)$ для фрагмента профиля, содержащего инерционный подъем $i_{\max}$ на элементе протяженностью $s_{\max}$. Для изображенного на рис. 11.4 случая при подходе к подъему скорость движения v_0 была выше расчетной v_p . При дальнейшем движении на отрезке пути $\otimes s$ скорость движения снизилась до скорости расчетного режима v_p . В случае, показанном на рис. 11.4, протяженность инерционного подъема $s_{\max} > \otimes s$, поэтому на его части $s_{\max} - \otimes s$ скорость движения поезда будет ниже расчетной. Это есть свидетельство тому, что в рассматриваемом случае труднейший подъем не может быть преодолен за счет использования живой силы поезда.

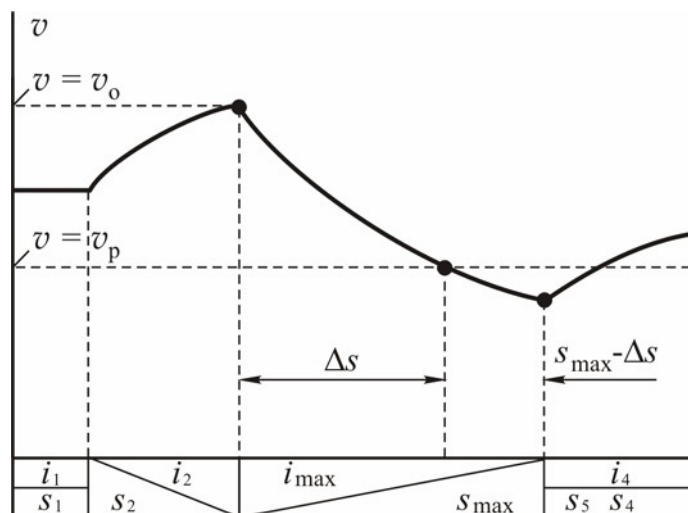


Рис. 11.4 Проверка возможности прохождения поездом скоростных подъемов

Изложенное выше позволяет заключить, что возможность прохождения поездом труднейших инерционных подъемов можно считать подтвержденной при выполнении условия

$$s_{\max} \geq \otimes s. \quad (11.20)$$

Величина $\otimes$ определяется путем построения кривой скорости $v(s)$ на фрагменте профиля, содержащем проверяемый подъем. Причем построение желательно начать с такого элемента, для которого можно сравнительно точно определить скорость движения.

Однако выполнение проверки таким способом сопряжено с трудоемкой подготовительной работой – расчетом и построением диаграмм действующих на поезд сил. Поэтому Правила тяговых расчетов предусматривают проверку выполнимости условия (11.20) путем расчетного определения расстояния $\otimes s$ по формуле

$$\otimes^s = \frac{4,17(v^2 - v_0^2)}{f_k - (w_0 + i_{\max})}, \quad (11.21)$$

где v_0 – скорость движения поезда в начале инерционного уклона;

v_p – расчетная скорость электровоза;

f_k и w_0 – средние значения удельной силы тяги и удельного основного сопротивления движению, действующих на поезд на интервале скорости $[v_0, v_p]$.

Выражение (11.21), как будет показано в разделе 11.5, является решением уравнения движения методом малых отклонений.

Для повышения точности определения величины $\otimes$ Правила тяговых расчетов рекомендуют разбивать интервал скорости $[v_0, v_p]$ на несколько меньших интервалов, не превышающих 10 км/ч. Для каждого i -го интервала определяется расстояние

$$\otimes s_i = \frac{4,17(v_{ki}^2 - v_{0i}^2)}{f_{ki} - (w_{0i} + i_{\max})} \quad (11.22)$$

и затем рассчитывается расстояние

$$\otimes s = \sum_{i=1}^n \otimes s_i, \quad (11.23)$$

фигурирующее в выражении (11.20).

В отдельных случаях, указанных в Правилах тяговых расчетов, на эксплуатируемых железных дорогах допускается движение на части скоростного подъема со скоростью, ниже расчетной. Однако во всех случаях протяженность пути, проходимого с пониженной скоростью, не должна превышать 500 м.

11.3.6. Определение массы состава с учетом использования кинетической энергии на труднейших подъемах

Масса состава с учетом использования кинетической энергии на труднейших подъемах определяется в случаях, когда характер продольного профиля, расположение отдельных пунктов и ограничения скорости по состоянию пути не позволяют надежно определить расчетный подъем. Расчеты выполняются по следующей схеме.

Задаются расчетным подъемом по значению несколько меньшим, чем наиболее крутой на участке. По формуле (11.15) рассчитывают массу состава и проверяют ее на возможность прохождения поездом более крутых подъемов. Если проверка показывает, что рассматриваемая масса является заниженной или завышенной, то её величину корректируют в соответствующую сторону и повторяют проверку. Масса поезда считается установленной, если в конце труднейшего подъема скорость движения поезда равна или близка к расчетной.

11.4. Расчет и построение диаграмм удельных равнодействующих сил

Как следует из уравнения (1.23), ускорение поезда в каждый момент времени, то есть при заданных параметрах начального состояния (v_0, s_0), определяется значением сил, действующих на поезд (сопротивление от уклонов и кривых пути, сила тяги, основное сопротивление движению и тормозная сила). Поэтому для расчета кривых движения $v(s)$ и $f(s)$ предварительно необходимо рассчитать и в том или ином виде представить равнодействующие (резльтирующие) силы для используемых режимов движения поезда (тяга, выбег и торможение). Указанные силы определяются для горизонтального участка пути ($i = 0$), а силы сопротивления движению от приведенных уклонов $i_c(s)$ учитываются непосредственно в ходе интегрирования уравнения движения.

Как видно из выражений (1.25)–(1.27), для расчета кривых движения необходимо предварительно определить и в той или иной форме представить зависимости равнодействующих удельных сил от скорости

$$f_D(v)|_{i=0} = \begin{matrix} \clubsuit f_k(v) - w_0(v) & \text{— тяга;} \\ \spadesuit - w_{0x}(v) & \text{— выбег;} \\ \heartsuit - (mb + w_{0x}) & \text{— торможение.} \end{matrix} \quad (11.24)$$

Перечисленные выше зависимости должны быть определены на интервале скорости движения $[0, v_{\max}]$, где $v_{\max}$ – максимальная допустимая на участке скорость движения (принимается равной конструкционной скорости подвижного состава или допустимой скорости движения по состоянию пути).

Рассмотрим подробнее порядок расчета равнодействующих сил.

Режим выбега. Расчет ведется в форме табл. 11.7. Приводятся следующие данные.

Таблица 11.7

Удельное основное сопротивление движению поезда в режиме выбега

v	w'_{04}	w'_{08}	w'_0	w_x	w_{0x}
1	2	3	4	5	6

Графа 1. Выбранные для построения $w_{0x}(v)$ значения скорости движения. Интервал скорости принимается равным 10 км/ч при $v \leq 50$ км/ч и до 5 км/ч при $v > 50$ км/ч.

Графы 2 и 3. Рассчитанные по приведенным в табл. 3.2 формулам значения основного удельного сопротивления движению вагонов при заданной статической нагрузке на ось.

Графа 4. Основное сопротивление движению состава w''_0 , рассчитанное по формулам (3.41).

Графа 5. Основное сопротивление движению электровоза на выбеге, рассчитанное по соответствующим формулам из табл. 3.2.

Графа 6. Результаты расчета основного удельного сопротивления движению поезда в режиме выбега w_{0x} (формула (3.44)).

По данным граф 1 и 6 строится зависимость $w_{0x}(v)$, как показано на рис. 11.5. Масштабы удельной силы и скорости движения должны соответствовать приведенным в табл. 11.4.

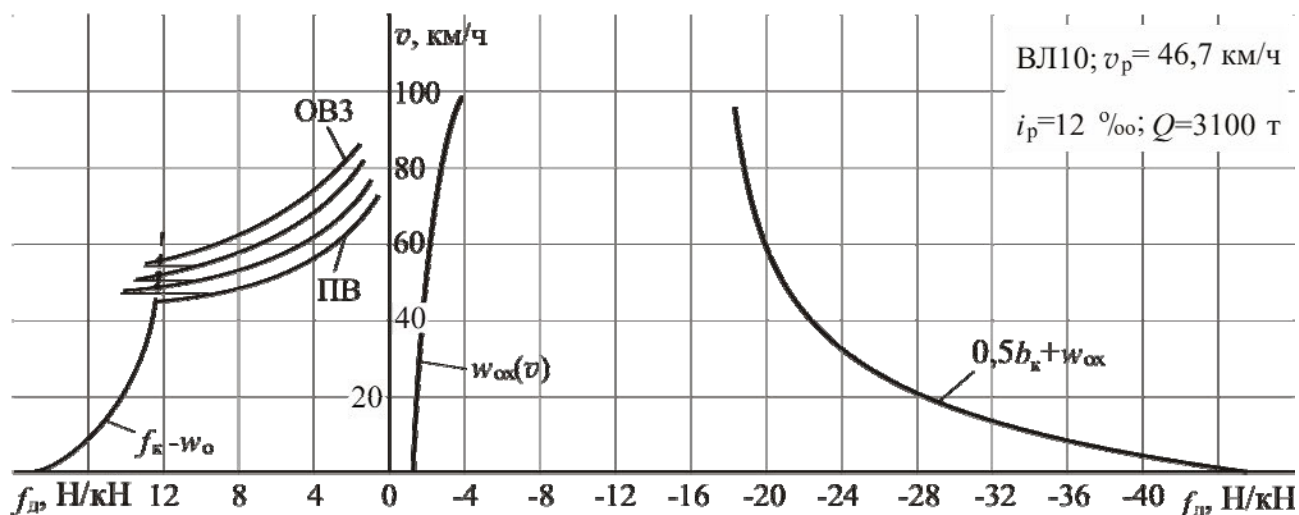


Рис. 11.5. Диаграмма удельных равнодействующих сил

Режим тяги. Расчет ведется в форме табл. 11.8.

Таблица 11.8

Удельные равнодействующие силы в режиме тяги

v	w''_0	w'_0	w_0	ПВ (НВ)			ОВ1			ОВ2			ОВ3		
				F_k	f_k	$f_k - w_0$	F_k	f_k	$f_k - w_0$	F_k	f_k	$f_k - w_0$	F_k	f_k	$f_k - w_0$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16

В графе 1 указываются скорости движения, для которых рассчитываются значения равнодействующей силы $f_k - w_0$. Шаг расчета при скоростях, меньших пусковой, не должен превышать 10 км/ч, а для скоростей запусковых –

5 км/ч. Кроме того, в графу 1 следует обязательно внести значения пусковой и расчетной скорости (в ряде случаев пусковая и расчетная скорости совпадают), а также скорости переходов на позиции регулирования возбуждения.

Графа 2. Сопротивление движению состава (его можно рассчитать по (3.41)) или взять из таблицы 11.7.

Графы 3 и 4. Сопротивление движению локомотива w'_0 и сопротивление движению поезда w_0 в режиме тяги, рассчитанные соответственно по формулам табл. 3.2 и (3.43).

Графа 5. Сила тяги, реализуемая в период пуска ($v \leq v_{\Pi}$) и при работе на автоматической характеристике режима полного (или нормального) возбуждения. Определяется по тяговой характеристике. В области допусковых скоростей ($0 < v \leq v_{\Pi}$) в расчет принимается максимальная допустимая по существующим ограничениям сила тяги, а для скорости $v > v_{\Pi}$ – в соответствии с характеристикой полного (или нормального) возбуждения.

Графы 8, 11 и 14. Сила тяги на позициях ослабленного возбуждения. Определяется на основании тяговых характеристик для соответствующей позиции регулирования возбуждения. Поскольку работа на каждой позиции ослабления возбуждения допустима только при скорости, большей скорости перехода на эту характеристику, то в графах для F_K на позициях ОВ при скоростях, меньших соответствующей скорости перехода, сила тяги не приводится, так как её значения будут выходить за пределы допустимых.

Графы 9, 10, 12, 13, 15, 16. Результаты расчета f_K и $f_K - w_0$ для позиций ослабленного возбуждения. Удельная сила тяги f_K определяется по формуле (1.19).

На основании приведенных в графе 1 табл. 11.8 значений скорости и соответствующих им значений $f_K - w_0$ (графы 7, 10, 13, 16) строятся диаграммы удельных равнодействующих сил для режима тяги, которые имеют вид графиков, показанных в левой части рисунка 11.5.

Тонкими горизонтальными линиями на графиках рис. 11.5 обычно показывают соответствующие скоростям переходов скачки $f_K - w_0$, обусловленные постановкой или снятием позиций ослабления возбуждения тяговых двигателей. Кроме того, на характеристиках ослабленного возбуждения отмечают скорости движения, соответствующие предельным по ограничивающим параметрам значения $f_K - w_0$ (на рис. 11.5 показаны точками). Они (далее – скорости обратных переходов) определяют наименьшие скорости движения, при которых допустимо некратковременное использование данной позиции регулирования мощности тяги.

Отметим, что расчетный режим электровозов однофазно-постоянного тока, как следует из табл. 11.5, соответствует не высшей (33-й) позиции регулирования напряжения, а 29-й или даже 25-й. Поэтому здесь расчетная скорость ниже скорости выхода на характеристику номинального напряжения (пусковой скорости), то есть $v_p < v_{\Pi}$. Сказанное в равной степени относится и к электровозам

с плавным регулированием напряжения (ВЛ80^Р, ВЛ85, 2ЕЛ5), так как для них Правила тяговых расчетов определяют расчетный режим не на характеристике, соответствующей номинальному напряжению на зажимах тяговых двигателей (4-я зона регулирования), а на характеристике 0,5 зоны 4.

В связи с изложенным для электровозов переменного тока с коллекторными тяговыми двигателями целесообразно определить и построить зависимость $f_k(v) - w_0(v)$ для характеристики, на которой реализуется расчетный режим. С этой целью в табл. 11.8 следует предусмотреть соответствующие графы.

Чтобы при выполнении тяговых расчетов была возможность применения всех имеющихся позиций регулирования мощности электровоза, зависимости $f_k(v) - w_0(v)$ следует рассчитать и построить для каждой из них.

Однако на практике при построении кривых движения обычно бывает достаточно диаграммы удельных сил в период разгона и при работе на позициях номинального напряжения. Исходя из этого, диаграммы удельных сил в режиме тяги для электровозов постоянного тока определяют только для параллельного соединения, а для электровозов переменного тока с коллекторными тяговыми двигателями – для характеристик расчетного режима и характеристик на высшей ступени регулирования напряжения с учетом всех ступеней ослабления возбуждения.

Режим торможения. Равнодействующие силы рассчитываются в форме табл. 11.9 на интервале скорости $[0, v_{\max}]$.

Таблица 11.9

Удельные равнодействующие силы в режиме торможения

v	w_{ox}	$\varphi_{кр}$	b_k	mb_k	$mb_k + w_{ox}$	$b_k + w_{ox}$
1	2	3	4	5	6	7

Графа 1. Скорость движения. При скоростях движения до 50 км/ч шаг расчета по скорости принимается равным 5 км/ч, а при больших 50 км/ч – 10 км/ч.

Графа 2. Основное удельное сопротивление движению поезда w_{ox} принимается по данным табл. 11.7.

Графа 3. Расчетный коэффициент трения. Рассчитывается по формулам (4.18)-(4.20).

Графа 4. Удельная сила при экстренном торможении. Определяется по формуле (4.26). Расчетный тормозной коэффициент ϑ рассчитывается предварительно по (4.27). Соответствие его величины требованиям действующих тормозных нормативов устанавливается на основании данных, приведенных ранее в табл. 4.5. Расчетные тормозные нажатия принимаются по данным табл. 4.4.

Графа 5. Удельная тормозная сила при остановочном торможении. Для грузовых поездов принимают коэффициент $m = 0,5$; для электропоездов, дизельпоездов и пассажирских поездов – $m = 0,6$.

В графе 6 приводятся значения удельных равнодействующих сил для режима остановочного торможения.

По данным граф 1 и 6 строят зависимость удельной равнодействующей силы $mb_k + w_{0x}$ от скорости для режима остановочного торможения. Она имеет вид графика, показанного на рис. 11.5.

Графа 7. Равнодействующая сила в режиме экстренного торможения. В дальнейшем будет использована для решения тормозной задачи (см. п. 11.6).

11.5. Расчет кривых движения

11.5.1. Постановка задачи расчета кривых движения

Расчет кривых движения – центральная задача тяговых расчетов – основан на решении уравнения движения.

Рассмотрим задачу о перемещении поезда заданной массы на конкретном участке пути. Будем считать известным тип локомотива и продольный профиль в виде функции $i(s)$ для $s \in [s_H, s_K]$, где s_H и s_K – координаты начала и конца участка.

Уравнения движения (1.25) – (1.27) запишем в виде

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\xi}{1+\gamma} (u(s) - w_{0x}(s) - i(s)) \quad (11.25)$$

где для режима тяги w_{0x} следует заменить на w_0 .

Функцию

$$u(s) = \begin{cases} \clubsuit f_k(v) & \text{— режим тяги;} \\ \diamond 0 & \text{— режим выбега;} \\ \spadesuit b_k(v) & \text{— режим торможения} \end{cases} \quad (11.26)$$

будем рассматривать как параметр управления.

На значения управляющих параметров накладываются ограничения:

– для режима тяги

$$0 < u \leq f_{km}(v),$$

где $f_{km}(v)$ – предельное значение удельной силы тяги, определяемое ограничениями тяговой характеристики для скорости движения v ;

– для режима торможения

$$-b_{km}(v) \leq u < 0,$$

где $b_{km}(v)$ – максимальная удельная тормозная сила, которая может быть реализована при скорости движения v .

Выбирая те или иные режимы ведения поезда, на заданном участке можно реализовать бесконечное множество кривых движения $v(s)$, каждая из которых будет соответствовать определенному управлению $u(s)$. Среди множества допустимых управлений следует выделить наиболее эффективное управление, а соответствующие ему кривые движения $v(s)$ и $t(s)$ рассматривать в качестве решения задачи.

Таким образом, приходим к задаче оптимизации тяговых расчетов. Её суть состоит в том, чтобы при заданных:

- профиле участка $i(s)$;
- типе электровоза, обладающего известными характеристиками;
- массе состава;
- типе вагонов и нагрузке от оси на рельсы

найти такое уравнение $u(s)$ из класса допустимых управлений, чтобы соответствующее ему решение уравнения движения (1.23) в виде кривой скорости $v(s)$ удовлетворяло граничным условиям и ограничениям по скорости

$$\underline{v}(s) \leq v(s) \leq \bar{v}(s), \quad s \in [s_H, s_K],$$

где $\underline{v}$ и $\bar{v}$ – допустимые значения соответственно минимальной и максимальной скорости движения на участке, и удовлетворяло бы принятому критерию оптимальности.

Следует уточнить такие понятия, как допустимое управление, граничные условия и критерий оптимальности.

Под допустимыми управлениями будем понимать такую функцию $u(s)$, на значения которой накладываются ограничения

$$-b_{km}(v) \leq u(s) \leq f_{km}(v). \quad (11.27)$$

Вид функции $u(s)$ определяется с учетом возможности их технической реализуемости. Обычно $u(s)$ представляется кусочно-постоянной или кусочно-линейной функцией.

Граничные условия на левом и правом концах траектории $v(s)$ в общем случае имеют вид:

$$v(s) \Big|_{s=s_H} \in v_H; \quad v(s) \Big|_{s=s_K} \in v_K, \quad (11.28)$$

где v_H и v_K представляют собою некоторые интервалы, из которых могут выбираться значения скорости при $s = s_H$ и $s = s_K$.

Критерием оптимальности называют показатель, числовое значение которого определяет предельно достижимую меру эффективности управления.

В рассматриваемой задаче в качестве критериев оптимальности можно принять: максимум провозной способности, минимум времени хода и затрат электроэнергии на тягу, минимум себестоимости перевозок, максимум производительности локомотива и некоторые другие. Таким образом, мы имеем дело с задачей выбора решения, когда установлено несколько правил отбора. Такие задачи часто называют многокритериальными [24].

В задачах многокритериальной оптимизации при числе показателей два и более существенно усложняется процедура алгоритмизации решения, анализа и интерпретация полученных результатов. Поэтому среди известных показателей эффективности перевозочного процесса выбирают главный. Другие критерии отбора решений, как правило, не совпадают с главным критерием и называются локальными.

Идейной основой выбора оптимального управления при определении кривых движения поезда согласно Правилам тяговых расчетов есть принцип максимума. Согласно этому принципу при заданной массе поезда задача сводится к поиску управления $u(s)$, которое обеспечивает минимальное время хода по участку. Совершенно очевидно, что таковым управлением является управление по быстродействию.

Управление по быстродействию однозначно определяется ограничениями управляющих воздействий (11.27) и допустимой скоростью движения $\bar{v}(i)$. Такой подход существенно упрощает решение задачи, поскольку расчет кривых движения поезда $v(s)$ и $t(s)$ в этом случае сводится к производству одновариантного тягового расчета.

Как уже отмечалось выше, локальные критерии, как правило, не совпадают с главным. Добавим, что в ряде случаев отбор решения по главному критерию часто входит в противоречие с правилами отбора решения по другим критериям. Поэтому на практике приходится несколько отступать от оптимального по главному критерию решения, чтобы избежать существенного ухудшения локальных показателей.

Управление по быстродействию соответствует максимуму технически реализуемой скорости движения, что согласуется с принципом максимума. Однако, реализация максимально возможной скорости соответствует, как будет показано далее, наибольшему расходу электроэнергии на тягу. Сказанное в первую очередь относится к электроподвижному составу, не оборудованному системами рекуперативного торможения. Стало быть, управление по быстродействию находится в противоречии с требованием максимального использования кинетической энергии для преодоления сил сопротивления движению.

В условиях эксплуатации неизбежны отклонения от графика движения поездов из-за сложившейся неграфиковой поездной ситуации, кратковременных отказов электрооборудования электроподвижного состава, отклонения от номинального напряжения в контактной сети и др. Поэтому график движения

$v(s)$ составляется так, чтобы в условиях эксплуатации обеспечивалась возможность ликвидации отставаний от графика движения за счет нагонов. Если график движения составить из условия реализации минимально возможных (технически) времён хода по участкам для номинального напряжения в контактной сети, то любое отклонение от графика не может быть компенсировано.

В силу выше названных причин режим движения поезда обычно устанавливается на базе расчетов кривых движения, соответствующих управлению по быстродействию, но с его корректировкой в сторону снижения скорости движения, чтобы при необходимости обеспечить возможность осуществления нагонов, а также использовать на ряде участков режимы ведения, обеспечивающие снижение расхода электроэнергии на тягу без заметного увеличения времени хода. Например, целесообразно обеспечить возможность выбора рациональной с позиции экономии электроэнергии скорости начала торможения перед остановочными пунктами и в местах ограничения скорости, выбора скорости на подходах к спускам для прохождения его без подтормаживания и другие.

11.5.2. Аналитический метод расчета кривых движения

Расчет кривых движения поезда базируется на решении уравнения движения поезда аналитическими, графическими или численными методами.

Согласно Правилам тяговых расчетов скорость движения и время хода поезда определяется путем построения кривой скорости и кривой времени графическим способом или с помощью ЭВМ.

При построении кривой скорости в качестве независимой переменной может быть принята или скорость движения, или пройденный путь. В первом случае имеет место интегрирование уравнения движения по скорости, а во втором случае – интегрирование по пройденному пути. В связи с изложенным далее будут оговорены условия, когда применение каждого из названных подходов является более предпочтительным.

Интегрирование уравнения движения поезда по скорости.

Ради упрощения выкладок введем обозначения:

$$\zeta = \frac{\xi}{1+\gamma}; \quad \zeta' = \frac{\xi'}{1+\gamma} \quad (11.29)$$

и с учетом (11.26) представим уравнения движения (1.23) и (1.24) в виде:

$$\frac{dv}{dt} = \zeta f_y(v); \quad \frac{v dv}{ds} = \zeta f_y(v), \quad (11.30), (11.31)$$

где удельная ускоряющая сила $f_y(v)$ в общем случае определяется как

$$f_y(v) = f_k(v) - w_{ox}(v) - b_k(v) - i(s),$$

причем для режима тяги $w_{\text{ох}}$ заменяется на w_0 .

Принимая в качестве аргумента скорость движения, из (11.31) найдем уравнение

$$ds = \frac{v dv}{\zeta f_y(v)}, \quad (11.32)$$

которое решается интегрированием

$$\int ds = \frac{1}{\zeta} \int \frac{v dv}{f_y(v)}. \quad (11.33)$$

Отметим два важных обстоятельства.

Во-первых, неопределенный интеграл (11.33) дает множество решений. Чтобы найти отвечающее условиям решаемой задачи частное решение, нужно задать начальные условия и вести расчет в виде задачи Коши.

Так как уравнение (11.33) является обыкновенным уравнением первого порядка, то начальные условия – это значения фазовых координат в момент начала движения, то есть $v = v_0$ и $s = s_0$. Иначе говоря, решение задачи сводится к определению кривой скорости $v(s)$, проходящей через точку с координатами v_0 и s_0 , которые по смыслу сформулированной в п. 11.5.1 задачи являются известными.

Во-вторых, решение неопределенного интеграла (11.33) можно получить для случая, когда величина $1/f_y(v)$ есть линейная функция скорости или может быть представлена функциями, от которых можно взять интеграл. Зависимости $f_y(v)$ являются нелинейными функциями скорости и их можно представить аналитическими зависимостями. Однако даже в случае использования простейших функций, например, степенных полиномов второй степени и гиперболических зависимостей, интегрирование (11.33) приводит к сложным выражениям, неудобным для производства практических расчетов.

По изложенным причинам для интегрирования уравнения движения используют приемы приближенных решений, в частности, приемы, основанные на принципе малых приращений. Его суть состоит в том, что движение поезда рассматривается в пределах следующих друг за другом интервалов скорости, на которых делится диапазон её изменения. На каждом интервале скорости ускоряющая сила принимается неизменной.

Таким образом, метод малых приращений основан на аппроксимации кривых равнодействующих сил кусочно-постоянными (ступенчатыми) функциями, как показано на рис. 11.6.

Рассмотрим фрагмент кривой скорости, показанной на рис. 11.7, а.

Интервалу скорости движения

$$\otimes v_i = v_{ki} - v_{hi}$$

соответствует отрезок пути

$$\otimes s_i = s_{ki} - s_{hi} ,$$

где индексами «н» и «к» обозначены величины, соответствующие началу и концу i -го интервала скорости движения.

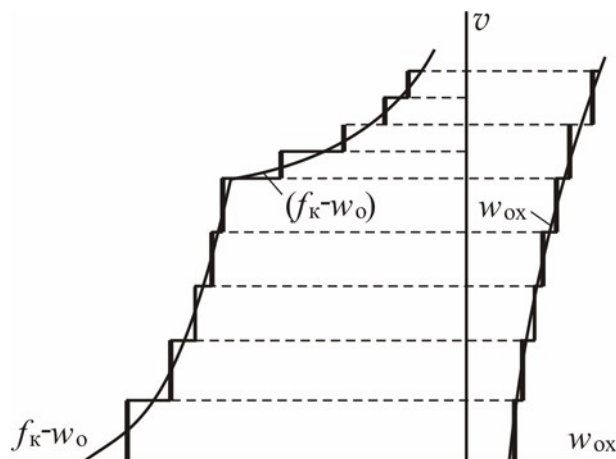


Рис. 11.6. Аппроксимация зависимостей $f_y(v)$ кусочно-постоянными функциями

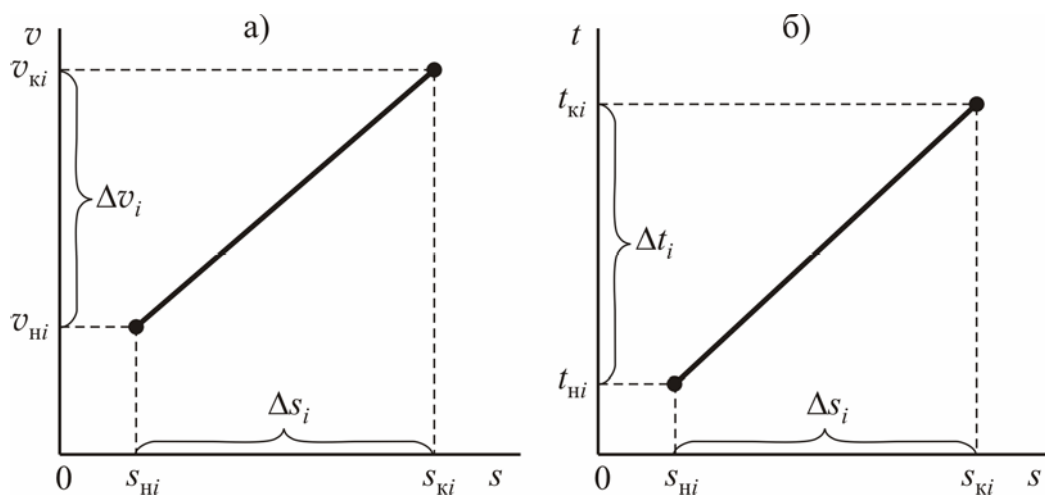


Рис. 11.7. Фрагмент кривой скорости (а) и кривой времени (б)

Согласно постановке задачи будем считать известными начальные условия v_{hi} , s_{hi} (заданы), интервал $\otimes v$ (выбран) и скорость на правой границе интер-

вала $v_{ki} = v_{hi} + \otimes v_i$. Таким образом, для определения кривой скорости на принятом интервале $\otimes v$ необходимо рассчитать отрезок пути

$$\otimes s_i = s_{ki} - s_{hi} ,$$

который проходит поезд за время изменения скорости на $\otimes v_i$.

Примем ускоряющую силу, действующую на поезд на интервале скорости $[v_{hi}, v_{ki}]$, постоянной и равной f_{yi} (она может быть принята равной её действительному значению при средней на интервале скорости движения $v_c = v_{hi} + 0,5 \otimes v_i$). Заменим в (13) $f_y(v)$ на f_{yi} , вынесем последнюю за знак интеграла и возьмем определенный интеграл

$$\int_{s_{\text{Hi}}}^{s_{\text{Ki}}} ds = \frac{1}{\zeta f_{yi}} \int_{v_{\text{Hi}}}^{v_{\text{Ki}}} v dv ,$$

решение которого

$$s \Big|_{s_{\text{Hi}}}^{s_{\text{Ki}}} = \frac{1}{2\zeta f_{yi}} v^2 \Big|_{v_{\text{Hi}}}^{v_{\text{Ki}}}$$

дает отрезок пути

$$\otimes s_i = \frac{v_{\text{Ki}}^2 - v_{\text{Hi}}^2}{2\zeta f_{yi}} \quad (11.34)$$

и, следовательно, координату

$$s_{\text{Ki}} = s_{\text{Hi}} + \otimes s_i \quad (11.35)$$

Для расчета кривой времени $t(s)$ определим отрезок времени $\otimes t_i$, в течение которого происходит изменение скорости на $\otimes v$ (или перемещение поезда на расстояние $\otimes s_i$), как показано на рис. 11.7, б. Из уравнения (11.30) находим

$$dt = \frac{dv}{\zeta f_y(v)}.$$

Приняв $f_y(v) = f_{yi}$, возьмем определенный интеграл

$$\int_{t_{\text{Hi}}}^{t_{\text{Ki}}} dt = \frac{1}{\zeta f_{yi}} \int_{v_{\text{Hi}}}^{v_{\text{Ki}}} dv , \quad (11.36)$$

где t_{Ki} и t_{Hi} – моменты времени, соответствующие s_{Hi} и s_{Ki} , причем t_{Hi} входит в состав начальных условий.

Решение (11.36) имеет вид

$$t \Big|_{t_{\text{Hi}}}^{t_{\text{Ki}}} = \frac{v}{\zeta f_{yi}} \Big|_{v_{\text{Hi}}}^{v_{\text{Ki}}} ,$$

откуда

$$t_{\text{Ki}} - t_{\text{Hi}} = \frac{v_{\text{Ki}} - v_{\text{Hi}}}{\zeta f_{yi}} \quad \text{или} \quad \otimes t_i = \frac{\otimes v}{\zeta f_{yi}} \quad (11.37)$$

и

$$t_{\text{Ki}} = t_{\text{Hi}} + \otimes t_i. \quad (11.38)$$

Отметим, что представив (11.34) как

$$\otimes s_i = \frac{v_{ci} \otimes v_i}{\zeta f_{yi}}, \quad (11.39)$$

где v_{ci} – среднее значение скорости движения на интервале $\otimes v_i$, и сопоставив (11.39) и (11.37), получаем очевидное выражение

$$\otimes t_i = \frac{\otimes s_i}{v_{ci}}. \quad (11.40)$$

Используя изложенный подход и приведенные выше формулы, для конца любого n -го из конкретных интервалов скорости движения можно определить фазовые координаты:

$$v_{kn} = v_0 + \sum_{i=1}^n \otimes v_i; \quad s_{kn} = s_0 + \sum_{i=1}^n \otimes s_i; \quad t_{kn} = t_0 + \sum_{i=1}^n \otimes t_i \quad (11.41)$$

и, следовательно, рассчитать кривые движения для заданного участка.

В приведенных формулах значение ζ определяется принятыми единицами измерения физических величин. Так для $[v] = \text{км/ч}$, $[f_y] = \text{кгс/т}$ или $[f_y] = \text{Н/кН}$, $[s] = \text{км}$ и $[t] = \text{час}$, как видно из табл. 1.2, коэффициент $\xi = \xi' = 127$. Согласно рекомендациям Правил тяговых расчетов примем $1 + \gamma = 1,06$. Тогда, как следует из (11.29), $\zeta = \zeta' = 127/1,06 = 120$. Таким образом, при использовании перечисленных выше единиц измерения расчетные формулы для определения $\otimes s$ примут вид:

$$\otimes s_i = \frac{v_i^2 - v_{i-1}^2}{240 f_{yi}}; \quad \otimes s_i = \frac{v_{ci} \otimes v_i}{120 f_{yi}}. \quad (11.42)$$

Отметим, что в случае $[s] = \text{м}$, первая из формул (11.42) примет вид выражения (11.22), которое используется для проверки массы поезда на возможность прохождения скоростных уклонов.

Расчет кривой скорости может вестись в такой последовательности (см. табл. 11.10).

1. По смыслу задачи устанавливают начальные условия v_0 , s_0 и t_0 (первая строка табл. 11.10).

2. На первом шаге расчета для заданного приращения скорости $\otimes v$ определяют:

1) скорость движения на правой границе интервала $[v_0, v_1]$ как

$$v_1 = v_0 + \otimes v_1;$$

2) среднюю на интервале $[v_0, v_1]$ скорость

$$v_{c1} = v_0 + 0,5 \otimes v_1;$$

3) режим движения (тяга, торможение, выбег);

4) по диаграмме равнодействующих сил для выбранного режима движения определяют удельную равнодействующую силу, соответствующую скорости v_{c1} и затем с учетом характеристик профиля – результирующую ускоряющую силу

$$f_{y1} = \begin{cases} \clubsuit [f_k(v) - w_o(v)]|_{v=v_c} + i(s) - \text{тяга;} \\ \spadesuit [w_{ox}(v)]|_{v=v_c} + i(s) - \text{выбег;} \\ \heartsuit [b_k(v) + w_{ox}(v)]|_{v=v_c} + i(s) - \text{торможение;} \end{cases}$$

5) с помощью выражений (11.42) и (11.40) рассчитывают соответствующие приращению скорости $\otimes v$ приращение пути $\otimes s$ и времени $\otimes t_1$, а с помощью формул (11.41) – текущие координаты s_1 и t_1 .

3. На втором шаге выбирают $\otimes v = \otimes v_2$ и для него повторяют расчет согласно изложенной выше процедуре вычислений.

Таблица 11.10

Расчет кривых движения

№ шага	$\otimes v$	v_c	f_y	$\otimes t$	$\otimes s$	$v = v_0 + \sum \otimes v_i$	$t = t_0 + \sum \otimes t_i$	$s = s_0 + \sum \otimes s_i$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	—	—	—	—	—	v_0	t_0	s_0
1	$\otimes v_1$	v_{c1}	f_{y1}	$\otimes t_1$	$\otimes s_1$	$v_1 = v_0 + \otimes v_1$	$t_1 = t_0 + \otimes t_1$	$s_1 = s_0 + \otimes s_1$
2	$\otimes v_2$	v_{c2}	f_{y2}	$\otimes t_2$	$\otimes s_2$	$v_2 = v_1 + \otimes v_2$	$t_2 = t_1 + \otimes t_2$	$s_2 = s_1 + \otimes s_2$
...	...	...	...	...	...	...	...	...
n	$\otimes v_n$	v_{cn}	f_{yn}	$\otimes t_n$	$\otimes s_n$	$v_n = v_{n-1} + \otimes v_n$	$t_n = t_{n-1} + \otimes t_n$	$s_n = s_{n-1} + \otimes s_n$

По данным граф 7, 8 и 9 для наглядности по точкам с координатами (v_i, s_i) и (t_i, s_i) строят графики $v(s)$ и $t(s)$ в виде кусочно-линейных функций, как показано на рис. 11.12. Причем оба графика обычно совмещают, используя общую ось абсцисс.

Интегрирование уравнения движения по пути широко применяют при выполнении тяговых расчетов на ЭВМ (см. п. 11.9). В этом случае для расчета кривой скорости участок представляют в виде следующих друг за другом отрезков пути $\otimes_s$ и для правой границы каждого из них рассчитывают скорость

движения v_{ki} .

В качестве начальных условий, как и в предыдущем случае, выступают значения v_{hi} , s_{hi} и t_{hi} .

Ускоряющая сила f_{yi} принимается неизменной и равной её значению на выбранном режиме ведения при начальной скорости v_{hi} .

Формулу для определения v_{ki} получим, выполнив интегрирование уравнения

$$v dv = \zeta f_y ds$$

при указанных выше условиях или непосредственно из (11.34) в виде

$$v_{ki} = \sqrt{v_{hi}^2 + 2\zeta f_{yi} \otimes s_i}. \quad (11.43)$$

Приращение времени $\otimes t_i$ определяется, как и ранее, по формуле (11.40).

Фазовые координаты состояния поезда на конце любого n -го из выбранных отрезков пути рассчитывают по (11.41).

Величина отрезков $\otimes_s$ принимается равной длине элемента профиля или его части таким образом, чтобы обеспечить требуемую точность расчетов (см. п. 11.8).

11.5.3. Построение кривых движения графическим способом

Графические методы интегрирования уравнения движения, как и рассмотренные выше численные методы, базируются на принципе малых отклонений, но соответствующие заданному приращению скорости приращения времени $\otimes t$ и пути $\otimes s$ не рассчитывают, а определяют путем графических построений.

Графические способы определения кривых движения выигрывают наглядностью, возможностью анализа различных вариантов управления поездом и исправления допущенных ошибок, достаточной для эксплуатационной работы точностью расчетов.

При «ручном» счете графические методы менее трудоемки, чем расчетно-графические, потому до 60-х годов прошлого столетия они были основными в практике тяговых расчетов.

В настоящее время тяговые расчеты выполняются, в основном, путем интегрирования уравнения движения численными методами с помощью современных средств вычислительной техники. Вместе с тем графические методы

определения кривых движения и в настоящее время используются при решении задач, требующих расчета кривых движения для участков небольшой протя-

женности, например, при решении тормозных задач, задач по определению экономической целесообразности внедрения различных организационно-технических мероприятий для совершенствования эксплуатационной работы и др. И, кроме того, графические методы благодаря своей наглядности, возможности рассмотрения различных режимов ведения поезда и простоте интерпретации результатов расчетов находят широкое применение в процессе подготовки специалистов, работающих в области электрической тяги.

Графические методы построения кривых движения подробно исследованы многими специалистами (Ю. В. Ломоносов, Г. В. Лебедев, В. А. Шевалин, Л. Г. Абелишвили, А. И. Липец и др.).

В СССР наибольшее распространение получил способ построения кривой скорости $v(s)$ А. И. Липеца в сочетании с приемом графического построения кривой времени $t(s)$, предложенным Г. В. Лебедевым. В 40-х годах прошедшего столетия этот способ был рекомендован Министерством путей сообщения СССР для производства тяговых расчетов и стал известным как способ МПС.

Построение кривой скорости способом МПС осуществляется следующим образом.

1. На планшете для тяговых расчетов размещают диаграмму равнодействующих сил, как показано на рис. 11.8, и обозначают начальные условия (точка A с координатами v_0, s_0).

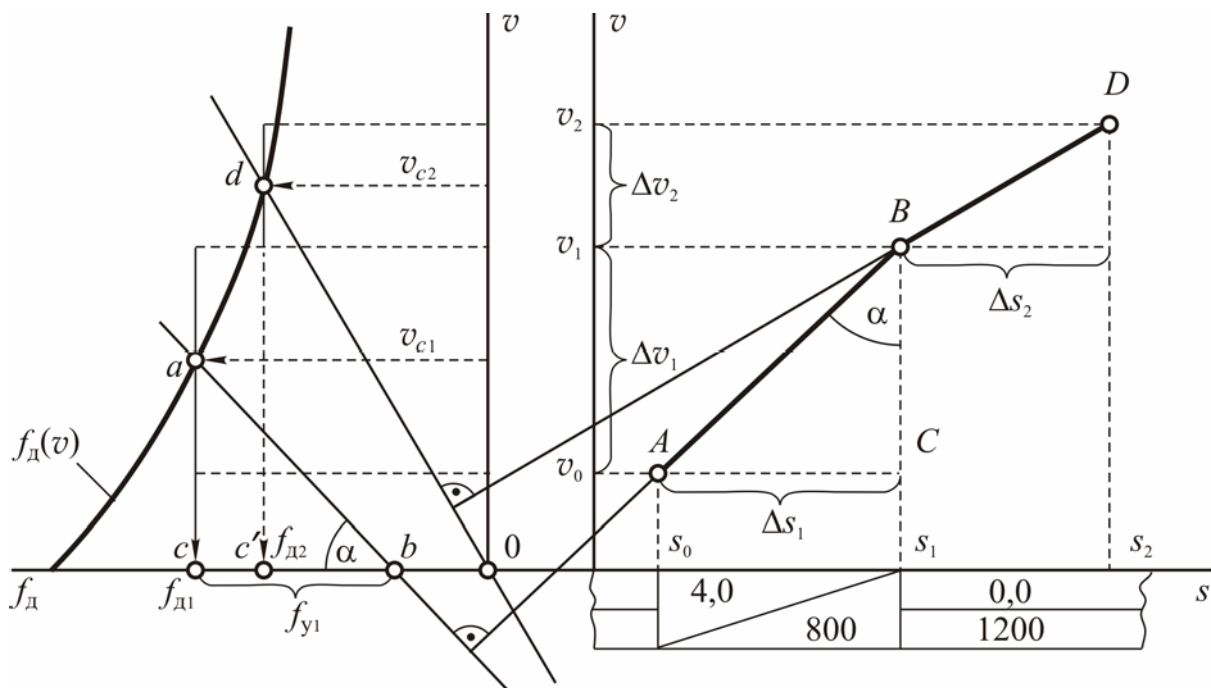


Рис. 11.8. Построение кривой скорости

2. Задается интервал скорости Δv и на планшете определяется значение средней скорости v_{c1} на этом интервале. Далее находится соответствующая скорости v_{c1} точка a на диаграмме удельных сил $f_d(v)$. Как можно видеть, абсцисса этой точки (отрезок $0c$) представляет среднюю величину равнодейст-

вующей силы $f_{д1}$ на интервале $\otimes v_1$, действующей на поезд на площадке, то есть при $i = 0$.

3. На оси абсцисс диаграммы $f_d(v)$ выбирается точка b , определяющая отрезок Ob , который соответствует величине уклона рассматриваемого элемента профиля. На рис. 11.8 эта точка соответствует $f_{д1} = 4 \text{ Н/кН}$, так как первый элемент профиля имеет подъем $i = 4 \text{ ‰}$.

Отрезок bc на рис. 11.8 изображает удельную ускоряющую силу $f_{y1} = f_{д1} - i$ (или $f_{y1} = f_{д1} - w_i$), определенную с учетом сопротивления движению от уклона. Следовательно, смещением начала координат диаграммы $f_d(v)$ по оси абсцисс на число делений, равное $\pm i(s)$, обеспечивается учет влияния на движение поезда сопротивления от уклонов пути.

4. На диаграмме равнодействующих сил через точки a и b мысленно проводят линию и перпендикуляр к ней, проходящий через точку A , заданную начальными условиями. Отрезок этого перпендикуляра AB , находящийся в границах интервала скорости $\otimes v_1$, вычерчивается на планшете. Он изображает линеаризованный участок кривой скорости $v(s)$ на интервале $\otimes v_1$, поскольку его проекция на ось абсцисс (отрезок AC на рис. 11.8) в определенном масштабе изображает отрезок пути, рассчитанный по (11.42).

В самом деле, из треугольника ABC следует, что

$$AC = BC \operatorname{tg} \alpha. \quad (11.44)$$

В треугольнике abc стороны bc и ab составляют угол, равный α , поскольку из условий построения отрезка AB следует, что $ab \perp AB$ и $bc \perp BC$. Поэтому

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{ac}{bc}. \quad (11.45)$$

Подстановка (11.45) в (11.44) даёт

$$AC = BC \frac{ac}{bc}. \quad (11.46)$$

Допустим, что для построения представленных на рис. 11.8 графиков приняты масштабы: пути — m_s ; удельной силы — m_f ; времени — m_t (в единицах длины отрезка на чертеже на единицу принятой единицы измерения изображаемой на чертеже физической величины, например: m_s — мм/км; m_t — мм/час и т.д.). Тогда отрезки BC , ac и bc , которыми на рис. 11.8 изображены соответственно интервал скорости $\otimes v_1$, среднее на этом интервале значение скорости движения $v_{с1}$ и соответствующее ей значение равнодействующей силы f_{y1} , будут равны:

$$BC = \otimes v_1 m_v; \quad ac = v_{c1} m_v; \quad bc = f_{y1} m_f. \quad (11.47)$$

Следовательно, отрезок

$$AC = \frac{\otimes v_1 v}{f_{y1}} \cdot \frac{m^2}{m_f} \quad (11.48)$$

или

$$AC = \frac{\otimes v_1 v}{120 f_{y1}} \cdot \frac{120 m^2}{m_f} \quad (11.49)$$

Так как в последнем выражении первый сомножитель определяет, как видно из формулы (11.39), приращение пути $\otimes s_1$, то его можно представить как

$$AC = \otimes s_1 m_s, \quad (11.50)$$

где m_s – масштаб пути, определяемый как

$$m_s = \frac{120 m^2}{m_f v}. \quad (11.51)$$

Таким образом, отрезок AB на рис. 11.8 есть фрагмент кривой $v(s)$, соответствующей расчету методом конечных приращений.

Принимая полученные на каждом шаге построения конечные значения v и s в качестве начальных условий для последующего шага, путем описанных выше графических построений можно определить интегральную кривую $v(s)$ для всего заданного участка в виде кусочно-линейной функции.

Так в ситуации, изображенной на рис. 11.8, после построения отрезка AB нужно выбрать следующий интервал скорости $\otimes v_2$ и на диаграмме $f_d(v)$ опре-

делить f_{d2} (точка c') при $v_{c2} = v_1 + 0,5 \otimes v_2$. Удельная ускоряющая сила $f_y = f_d - i(s)$ на этом шаге построения соответствует отрезку $0c'$, поскольку, как видно из рис. 11.8, при $v > v_1$ (то есть на интервале скорости $\otimes v_2$) движение поезда происходит на горизонтальном элементе профиля ($i = 0$).

Далее на перпендикуляре к линии, проходящей через точки 0 и d , в пределах интервала $\otimes v$ на планшете наносят линию BD – следующий участок кривой скорости. ²

Кривая скорости строится на миллиметровой бумаге, поэтому необходимые для построения отметки на диаграммах равнодействующих сил (например, точки a и b на рис. 11.8) легко определяются визуально. Благодаря этому построение сводится к нанесению на планшет непосредственно участков $v(s)$ (линия AB на рис. 11.8) с помощью линейки и треугольника, расположенных, как показано на рис. 11.9.

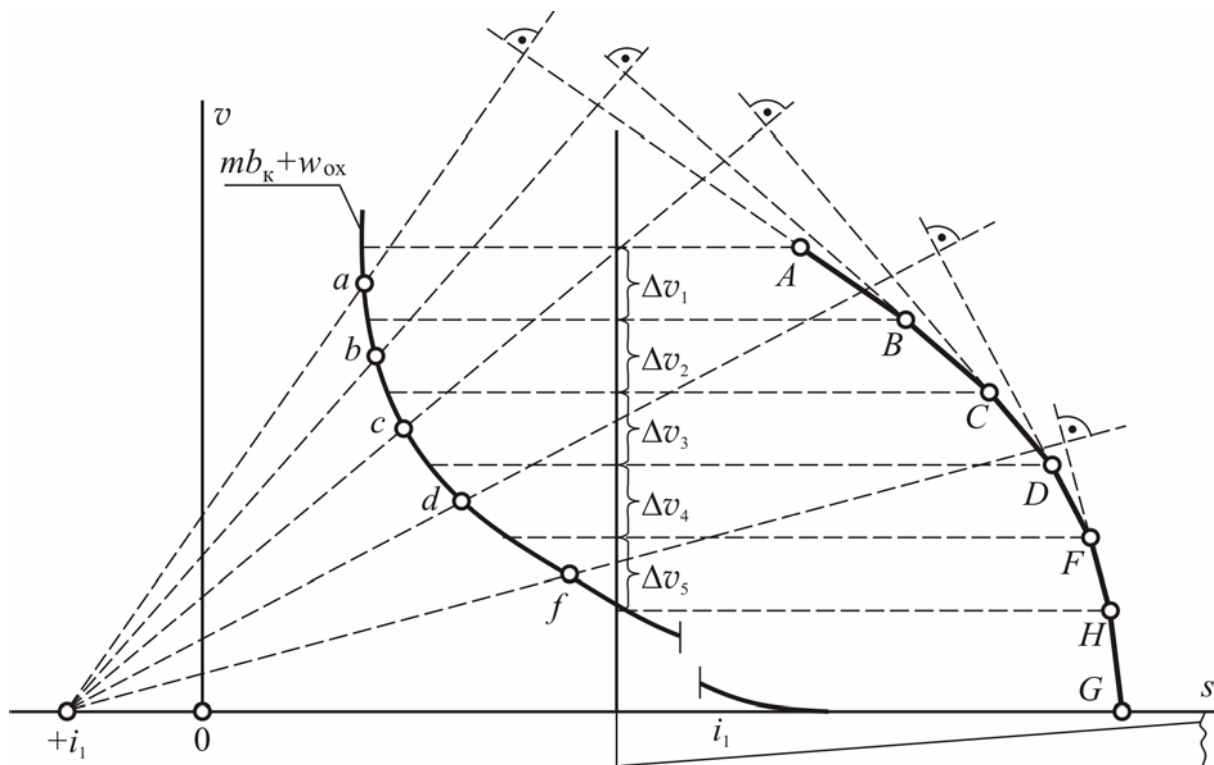


Рис. 11.11. Построения кривой скорости для режима торможения

При графическом построении кривых скорости масштабы m_f , m_s и m_v должны удовлетворять условию (11.51). Из него очевидно, что из перечисленных масштабов произвольно выбирать можно только два. Третий масштаб определяют по (11.51). Например, если принять $m_v = 1 \text{ мм/км/ч}$ и $m_f = 6 \text{ мм/Н/кН}$, то масштаб пути должен быть равным

$$m_s = \frac{120 \cdot 1^2}{6} = 20 \text{ мм/км}.$$

Для построения кривых движения и решения тормозных задач графическим способом для магистральных железных дорог Правила тяговых расчетов рекомендуют сочетания масштабов, приведенных в табл. 11.4, а и б.

Построение кривой времени способом МПС выполняют на основе кривой скорости.

Допустим, что начальные условия заданы в виде: $v_0 = 0$; $s_0 = 0$; $t_0 = 0$, а кривая скорости построена как кусочно-линейная функция, отдельные участки которой, как можно видеть на рис. 11.12, определены для следующих друг за другом интервалов скорости движения $\otimes v_1$, $\otimes v_2$ и $\otimes v$ и приращений пути $\otimes s_1$,

$\otimes s_2$ и $\otimes s_3$. Тогда кривая времени изображается кусочно-линейной функцией, причем такой, что каждому из указанных выше приращений пути $\otimes s$ соответствует приращение времени $\otimes t$, рассчитанное по формуле (11.40).

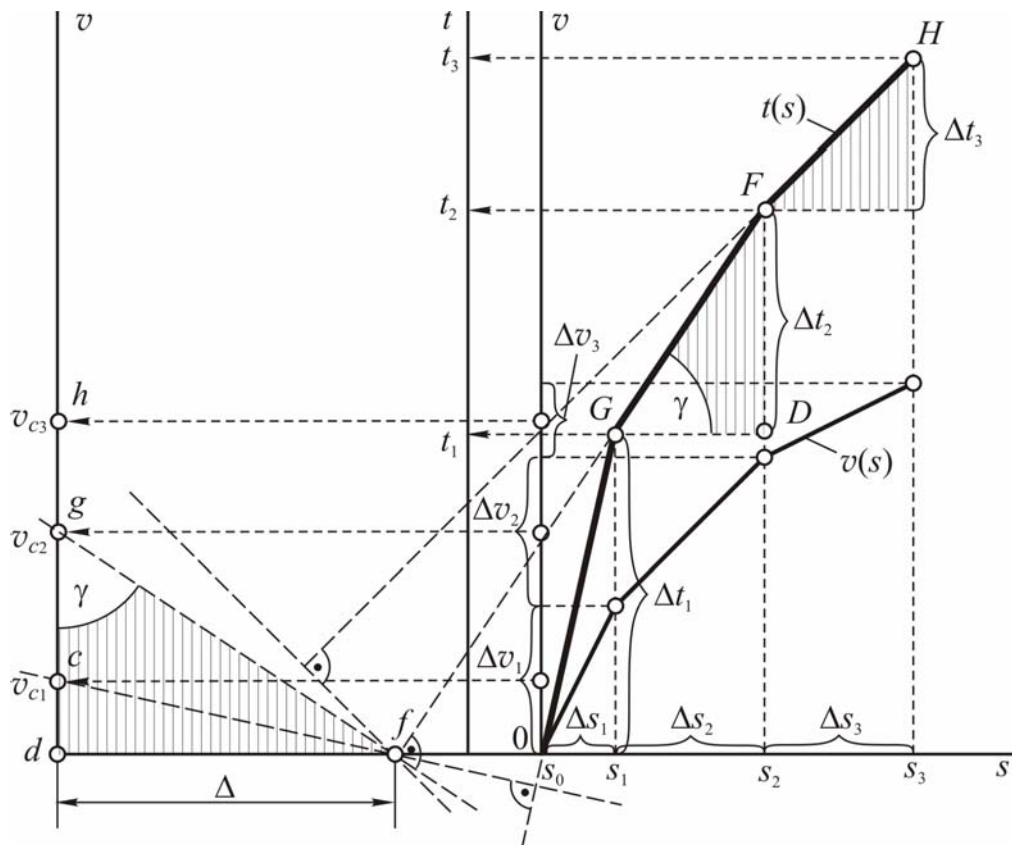


Рис. 11.12. Построение кривой времени

Строится кривая времени в такой последовательности.

На планшете для тяговых расчетов на оси абсцисс, то есть на оси s , как показано на рис. 11.12, в удобном для графических построений месте размещают отрезок $\otimes$, на левой границе которого располагают вспомогательную ось скорости. Отрезок $\otimes$ называют полюсным расстоянием, а его правую границу (точка f на рис. 11.12) – полюсом.

Линейные участки кривой времени обычно строятся в пределах тех же интервалов $\otimes v$, которые принимались при построении $v(s)$.

Так на первом шаге выбирают интервал $\otimes v_1$ и на вспомогательной оси v определяют точку c , соответствующую средней скорости v_{c1} на интервале $\otimes v_1$.

Далее к линии cf , проходящей через точку c и правую границу полюсного расстояния (точка f), восстанавливают перпендикуляр, проходящий через точку c с координатами $t = t_0$ и $s = s_0$. Часть этого перпендикуляра в виде отрезка OG наносят на чертеж. Правый конец этого отрезка соответствует правому концу отрезка $\otimes s_1$. Следовательно, точка G имеет

координаты

$$s_1 = \otimes s_1; t_1 = \otimes t_1.$$

Затем описанным выше образом выполняют построение для последующих интервалов скорости. Так на втором шаге (интервал $\otimes v_2$) по значению средней скорости v_{c2} определяют точку g на оси скорости, а соответствующий отрезок кривой времени GF вычерчивают на перпендикуляре к линии gf , как показано

на рис. 11.12. Координаты точки F : $s = s_2$; $t = t_2$, а приращение $\otimes t_2 = t_2 - t_1$ соответствует пути $\otimes s_2 = s_2 - s_1$.

Аналогично описанному выше на перпендикуляре к линии hf вычерчивают фрагмент кривой времени FH для интервала скорости $\otimes v$ и приращения пути $\otimes s_3$.

Применяя описанный выше прием последовательно для всех фрагментов кривой скорости, можно определить кривую времени для всего участка.

Определим масштаб, в котором изображена построенная рассмотренным способом кривая времени $0GFH$.

Рассмотрим прямоугольный треугольник GFD . Его катет FD представляет в определенном масштабе приращение времени $\otimes t_2$, соответствующее движению на участке пути от s_1 до s_2 . Обозначим угол, образованный сторонами GD и GF через γ . Тогда

$$FD = GD \cdot \operatorname{tg} \gamma.$$

В треугольнике gfd на левой части рис. 11.12 угол, равный γ , образуют стороны gd и gf , поскольку по условиям построения $gf \perp GF$ и $gd \perp GD$. Следовательно

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\otimes}{gd}.$$

Длины отрезков GD и gd , как видно из рис. 11.12, равны

$$CD = \otimes s_2 m_s; \quad gd = v_{c2} m_v.$$

Таким образом, отрезок

$$DF = \frac{\otimes s_2}{v_{c2}} \cdot \frac{\otimes m_s}{m_v}.$$

Поскольку

$$\frac{\otimes s}{v_{c2}} = \otimes t_2, \quad \text{то} \quad DF = \otimes t_2 m_t,$$

где

$$m_t = \frac{\otimes m_s}{m_v} \quad (11.52)$$

представляет масштаб времени для кривой времени, построенной способом МПС.

При заданных масштабах пути m_s и скорости m_v масштаб времени m_t , как видно из (11.52), определяется полюсным расстоянием $\otimes$. Его выбирают так,

чтобы получить удобный для практического использования масштаб времени. К примеру, если при $m_s = 20 \text{ мм/км}$ и $m_v = 1 \text{ мм/км/ч}$ принять $\otimes = 30 \text{ мм}$, то получим

$$m_t = \frac{20 \cdot 30}{1} = 600 \text{ мм/ч} \quad \text{или} \quad m_t = 10 \text{ мм/мин}.$$

Рекомендованные Правилами тяговых расчетов значения $\otimes$ приведены в табл. 11.4.

11.5.4. Техника построения кривой скорости

Укажем некоторые особенности интегрирования уравнения движения методом, основанным на принципе малых приращений.

1. Точность определения кривых движения зависит от величины приращений скорости $\otimes v$, принимаемых в ходе расчета или графических ~~при~~ При прочих равных условиях уменьшение величины $\otimes v$ повышает точность расчетов, но сопровождается ростом числа операций (расчетных или графических), необходимых для определения кривых движения.

Одной и той же погрешности расчетов соответствуют разные приращения скорости в зависимости от интенсивности изменения ускоряющей силы в функции скорости. Так, например, для режима тяги эта зависимость слабо выражена в период разгона (то есть в области допусковых скоростей) и существенна при работе на автоматических характеристиках. В связи с изложенным согласно Правилам тяговых расчетов при определении кривой $v(s)$ интервалы скорости не должны превышать:

- в режиме выбега 10 км/ч;
- в режиме тяги при $v \leq v_{\Pi}$ 10 км/ч;
- при $v > v_{\Pi}$ 5 км/ч;
- в режиме остановочного торможения
- при $v \leq 50 \text{ км/ч}$ 5 км/ч;
- при $v > 50 \text{ км/ч}$ 10 км/ч,

где v_{Π} – пусковая скорость.

2. Согласно условиям решения задачи на выбранном интервале скорости ускоряющее усилие принимается неизменным. Но поскольку величина этого усилия зависит от уклона пути $i(s)$, то интервал скорости должен выбираться так, чтобы определенный расчетом или построением отрезок пути $\otimes s$ находился в пределах одного элемента профиля. В связи с этим обычно при подходе к концу каждого элемента профиля, где изменяется величина уклона, приращение скорости подбирается так, чтобы правая граница отрезка $\otimes s$ совпала с концом элемента профиля.

3. В зависимости от профиля пути $i(s)$, величины и знака управляющего воздействия $u(s)$ движение поезда может быть ускоренным, замедленным или с установившейся (равновесной) скоростью. Поэтому на каждом шаге расчета

или построения кривой скорости нужно правильно выбрать знак приращения скорости $\otimes v$.

О неправильном выборе знака $\otimes v$ свидетельствует отрицательный результат расчета ($\otimes s < 0$) по формуле (11.42). При графическом построении $v(s)$ ошибка в выборе знака $\otimes v$ с неизбежностью выясняется в ходе построения кривой скорости.

Определить знак ускорения поезда можно по соотношению начальной и установившейся для заданного элемента профиля скорости движения. Рассмотрим этот вопрос подробнее.

Каждому значению уклона (сопротивлению движению от уклонов) при работе электровоза на любой зависимости из дискретного набора равнодействующих сил $f_d(v)$ соответствует равновесная скорость движения v_y . Как следует из уравнения движения, при равновесной скорости сила тяги равна полному сопротивлению движению поезда W_k , поэтому графически равновесная скорость определяется по пересечению кривых $F_k(v)$ и $W_k(v)$, как показано на рис. 11.13, а.

Можно показать, что если тяговые характеристики удовлетворяют требованию механической устойчивости режима тяги, то на профиле с уклоном любой, но постоянной величины движение поезда характеризуется тем, что

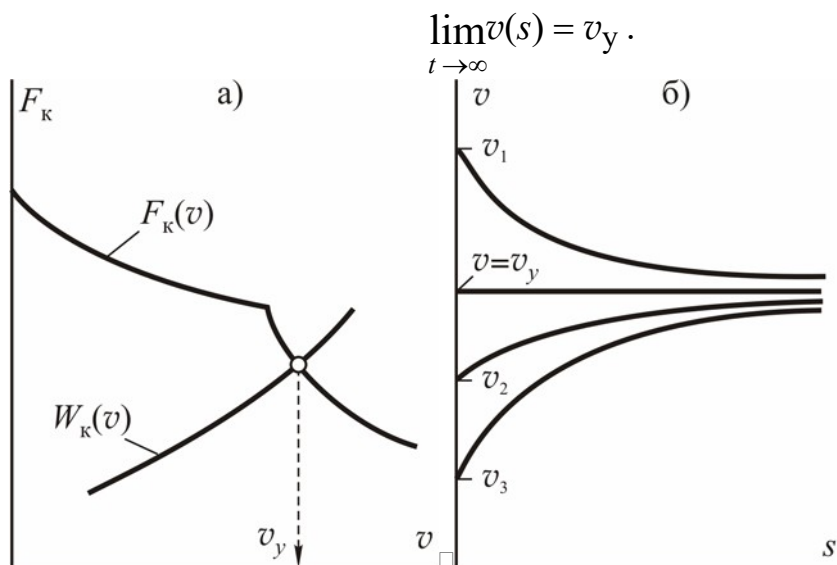


Рис. 11.13. Кривые скорости при $i = const$

Следовательно, зависимость $v(s)$ для этого случая однозначно определяется начальной скоростью движения и имеет вид одного из графиков, приведенных на рис. 11.13, б. Они показывают, что для любого шага построения кривой скорости справедливо одно из следующих соотношений:

$$v_H < v_y \rightarrow dv / dt > 0, \otimes v > 0 ;$$

$$v_H > v_y \rightarrow dv / dt < 0, \otimes v < 0; \quad (11.53)$$

$$v_H = v_y \rightarrow dv / dt = 0, v = v_H.$$

Соотношения (11.53) – это правило определения знака $\otimes v$ при построении кривой скорости $v(s)$.

4. Установившаяся скорость определяется из диаграммы равнодействующих сил по следующим соображениям.

Движению с установившейся скоростью соответствует равенство нулю результирующей ускоряющей силы. Для режима тяги это равнозначно равенству

$$f_K(v) - w_o(v) = i(s), \quad (11.54)$$

где i – алгебраическое значение уклона.

В режиме выбега и торможения движение с установившейся скоростью возможно только на спусках ($i < 0$), абсолютная величина которых удовлетворяет условиям:

$$'i' = w_{ox} \text{ – режим выбега;} \quad (11.55)$$

$$'i' = mb_K + w_{ox} \text{ – режим торможения.} \quad (11.56)$$

На основании изложенного ясно, что установившуюся скорость движения можно определить из диаграммы равнодействующих сил как скорость, соответствующую равенствам (11.54)-(11.56). На рис. 11.14 показан порядок определения установившейся скорости для подъемов i_p и i_1 , а также для спусков i_2 и i_3 .

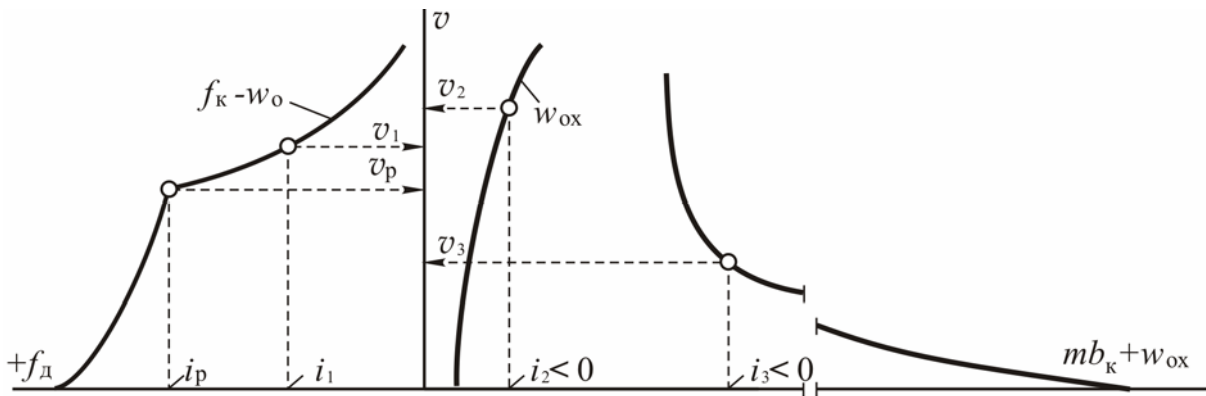


Рис. 11.14. Определение равновесной скорости движения

Отметим, что для случая, когда поезд с составом, масса которого определена по (11.12, б), следует по расчетному подъему i_p с расчетной скоростью v_p , выражение (11.54) приобретает вид равенства

$$f_k(v_p) - w_o(v_p) = i_p.$$

Из последнего следует, что при расчетной скорости v_p на характеристике расчетного режима ($F_k = F_{кр}$) удельная равнодействующая сила $f_k(v) - w_o(v)$ равна величине расчетного подъема i_p . Это обстоятельство используют для проверки правильности расчета массы состава и диаграммы удельных равнодействующих сил.

5. В процессе построения кривых движения графики $v(s)$ и $i(s)$ удаляются от диаграммы удельных сил или полюса построения, что приводит к некоторым неудобствам. Чтобы расположение диаграммы $f_d(v)$ и отрезка $\otimes$ было приемлемым, по мере необходимости их смещают вправо по оси пути s .

6. Режим ведения поезда и величина управляющего воздействия в режимах тяги и торможения определяются из анализа рассчитанной части кривой $v(s)$ и в равнении на последующую цель (реализация наибольшей скорости, остановка поезда, переход на режим рекуперативного торможения и т. д.).

7. Поскольку кривая движения отображает состояние координат центра тяжести поезда, кривую скорости следует строить с учетом реальной длины поезда. Так на станциях построение кривой $v(s)$ начинается и заканчивается обычно на середине приемо-отправочных путей. В местах ограничения скорости реальная скорость движения поезда должна не превышать допустимую на расстоянии, равном половине длины поезда ($0,5l_{п}$) до и после участка, на котором установлено ограничение, как показано на рис. 11.15.

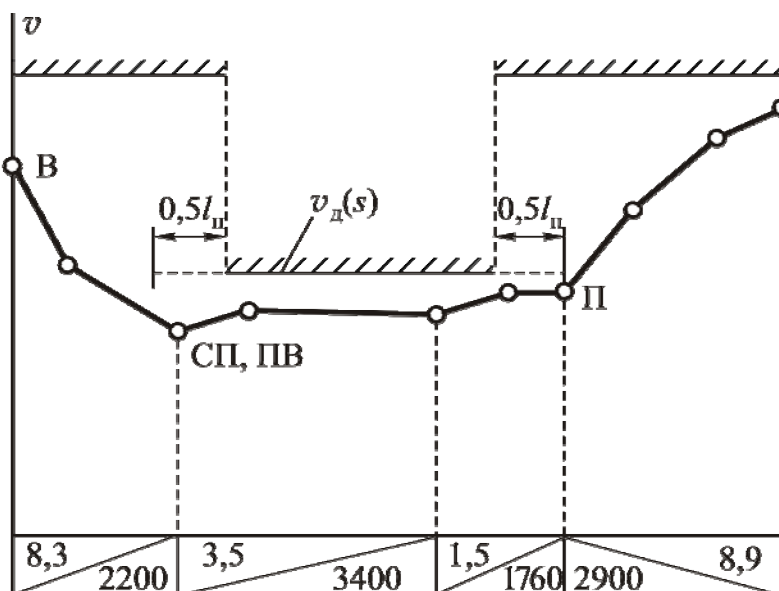


Рис. 11.15. Учет длины поезда в местах ограничения скорости движения

8. Как видно из графиков 11.13, б, при движении поезда по подъему, на котором $[f_k(v) - w_o(v)] < i(s)$, скорость движения постепенно снижается, асимпто-

тически стремясь к установившемуся значению при $s \rightarrow \infty$. Учитывая сказанное, при построении кривой скорости на таких подъемах после достижения установившейся скорости* кривую $v(s)$ до конца данного элемента профиля изображают горизонтальной линией $v = v_y$.

Сказанное выше относится, в первую очередь, к расчетному подъему, где кривая скорости обычно имеет вид диаграммы $v(s)$, показанной на рис. 11.16. Здесь при построении кривой $v(s)$ перед достижением расчетной скорости v_p последнее приращение скорости (на рис. 11.16 приращение Δv_3) необходимо выбрать равным $\Delta v = v_H - v_p$, где v_H — начальная скорость на последнем интервале перед достижением $v = v_y$.

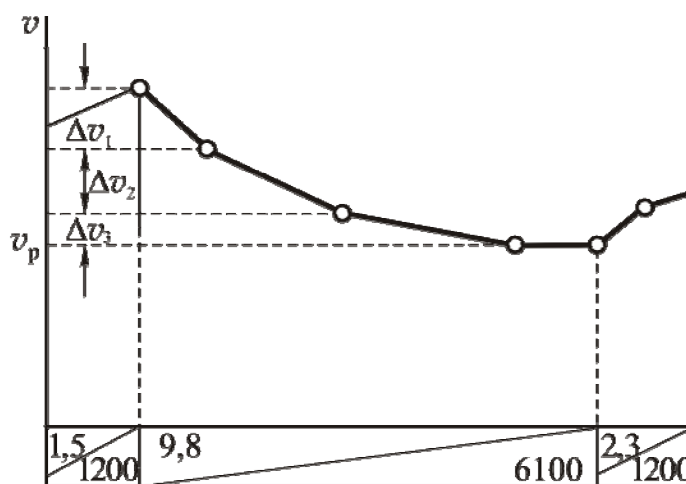


Рис. 11.16. Кривая скорости на расчетном подъеме

9. Переходы на позицию более глубокого ослабления возбуждения осуществляются при скоростях движения, равных или превышающих скорости переходов на соответствующие позиции. При этом может иметь место кратковременное превышение максимальных по ограничивающим параметрам значений сил тяги (см. рис. 6.11).

* Несмотря на то, что теоретически в упомянутом случае при $i = \text{const}$ установившемуся значению скорости v_y соответствует $s = \infty$, на практике из-за отклонения крутизны уклонов отдельных участков элемента профиля от расчетного значения уклона при достаточной протяженности подъемов скорость движения поезда стабилизируется относительно некоторого среднего значения.

При решении уравнения движения методом конечных приращений (например, при использовании рассматриваемого здесь графического способа) на подъемах достаточной длины скорость движения также может достигать равновесных значений v_y , ибо на всех предшествующих шагах расчета, включая последний, имеет место отношение $[f_k(v) + w_o(v)] < i_c$.

При снижении скорости движения поезда на крутых подъемах скорости вынужденных переходов на более низкие позиции ослабления возбуждения (с ОВ3 на ОВ2, с ОВ2 на ОВ1 и т. д.) следует выбирать так, чтобы не допустить выхода за пределы ограничений тяговой характеристики. На рис. 11.5 скорости обратных переходов показаны точками на графиках зависимостей $(f_k - w_o) = f(v)$.

10. Торможению с целью остановки поезда практически всегда предшествует фаза движения на выбеге. Поэтому при построении таких участков кривой скорости приходится определять момент начала торможения.

Обычно кривая скорости строится так, что в местах остановки её нули ($v = 0$) на оси пути s совпадают с осью станции.

Задача решается построением двух графиков $v(s)$, как показано на рис. 11.17:

– ABC – в направлении движения для режима, предшествующего торможению (обычно выбег);

– $FHEO$ – в режиме остановочного торможения, то есть с помощью диаграммы $mb_k + w_{ox}$, путем встречных построений, начиная с точки $v = 0$, расположенной на оси станции.

Точка пересечения указанных двух графиков (точка D) определяет момент начала торможения.

11. Характер изменения скорости движения на спусках зависит от их крутизны и протяженности.

В режиме тяги скорость движения поезда на спусках обычно увеличивается и для снижения темпа её нарастания переходят на выбег. При этом в случае $'i' = w_{ox}$ будет иметь место движение с постоянной скоростью. На более кру-

тых спусках ($'i' > w_{ox}$) скорость движения поезда на выбеге увеличивается. На спусках $i = 3 - 4 \text{ ‰}$ её можно стабилизировать на уровне, близком к допустимой скорости v_d , за счет торможения прямодействующим тормозом электрова.

Если спуск короткий, то место перехода на выбег выбирают так, чтобы без заметного снижения скорости избежать торможения и подойти к следующему элементу профиля (если он – не спуск) с максимальной скоростью.

Так при движении на участке, профиль которого изображен на рис. 11.18, переход на режим выбега (точка C) следует осуществить так, чтобы к началу подъема $5,3 \text{ ‰}$ подойти с наибольшей допустимой скоростью движения v_d .

Место перехода определяют путем построения кривой $v(s)$ по направлению движения (ABD_1) и встречно (FED_2) от скорости $v \cong v_d$ на правой границе

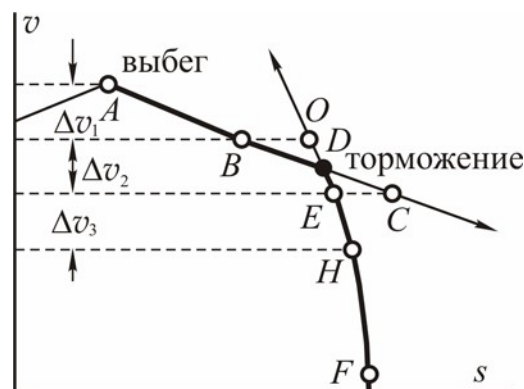


Рис. 11.17. Определение момента начала торможения

спуска. Пересечение графиков этих кривых определяет место перехода на выбег (точка C).

Если электровоз оборудован электрическим тормозом, то стабилизация скорости может быть обеспечена даже на более крутых спусках за счет подбора нужной позиции регулирования. Порядок расчета диаграмм удельных равнодействующих сил и построения кривых движения для режима электрического торможения изложен в приложениях П и Р.

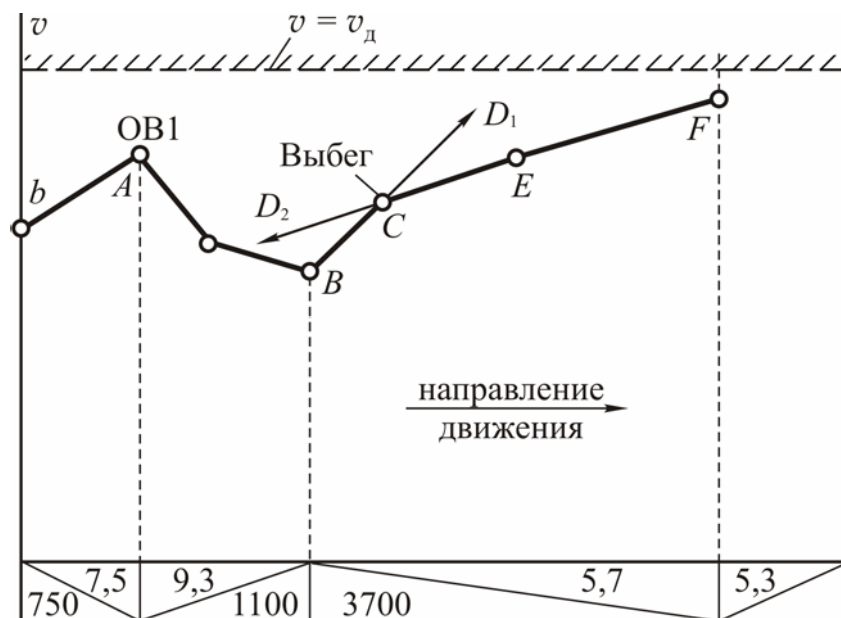


Рис. 11.18. Определение места перехода на режим выбега

На затяжных и крутых спусках для поддержания скорости в допустимых пределах применяют повторные торможения. В процессе каждого торможения скорость снижают на 15-20 км/ч, чтобы обеспечить возможность отпуска тормозов, поскольку на крутых спусках темп нарастания скорости на выбеге достаточно высок. В результате кривая скорости имеет вид пилообразной кривой, изображенной на рис. 11.19 тонкой линией.

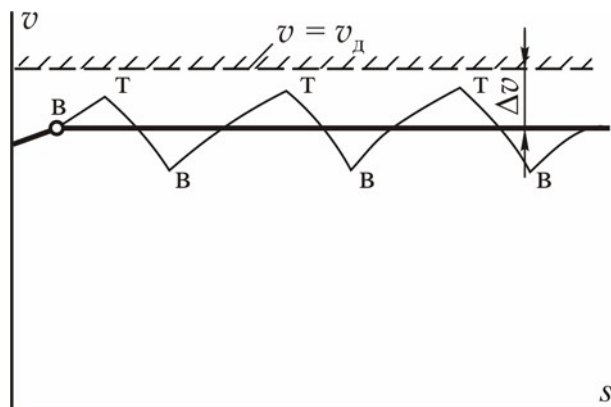


Рис. 11.19. Построение кривой скорости при движении по затяжному спуску

Очевидно, что использование механического тормоза на затяжных спусках приводит к снижению средней скорости движения по сравнению с допустимой v_d . С целью упрощения построения кривой скорости на затяжных спусках длиной до 10 км допускается заменять пилообразный участок кривой скорости прямой линией $v = v_d - \otimes v$, где $\otimes v$ – среднее снижение скорости движения на спуске. Значения $\otimes v$, рекомендованные Правилами тяговых расчетов, приведены в табл. 11.11.

Поправка $\otimes v$ для построения кривой скорости на затяжных спусках

Поезда	$\otimes v$, км/ч для спусков i_k , ‰							
	4	6	8	10	12	14	16	18
Грузовые	4	4	4	4	5	6	7	8
Пассажирские	2	2	3	4	6	7	8	9

12. По условиям безопасности движения на первом спуске после станции отправления предусматривается проба тормозов на эффективность путем снижения скорости на 20 км/ч для грузовых поездов и на 10 км/ч для пассажирских.

13. На кривой скорости указывают места изменения режима управления поездом, а для режима тяги – места изменения режимов нагружения тяговых двигателей. Обычно отмечают только места начала работы на данном режиме. При этом чаще всего используют следующие обозначения режимов:

В – выбег;

ТО – отпуск тормозов;

Т – торможение остановочное;

ТР – рекуперативное (реостатное) торможение;

ТП – торможение прямодействующим тормозом;

ПТ – проба тормозов на эффективность;

ПВ или НВ – тяга на характеристиках полного или нормального возбуждения тяговых двигателей;

ОВ1, ОВ2, ... – тяга на характеристиках первой, второй и т. д. ступеней ослабления возбуждения;

С, СП, П – последовательное, последовательно-параллельное и параллельное соединения двигателей на электровазозах постоянного тока.

Для электровазозов переменного тока режим нагружения обозначается как номер позиции или зоны регулирования напряжения.

Пример расположения необходимых обозначений на кривую скорости показан на графиках рис. 11.24 и 11.25.

14. Кривая времени $t(s)$ для размещения на планшете представляется в виде пилообразной линии (см. рис. П.4 и рис. Р.8 приложений). Она получается за счет параллельного переноса кривой $t(s)$ на отметку $t = 0$ после достижения установленной отметки времени $t_{от}$. При производстве тяговых расчетов обычно принимают $t_{от} = 10$ мин.

11.6. Тормозные расчеты

11.6.1. Общие понятия и нормируемые величины

По назначению и реализуемому замедлению различают экстренное, полное служебное и ступенчатое служебное торможение.

Служебное торможение применяется для остановки поезда в предусмотренных расписанием движения пунктах, а экстренное – когда требуется немедленная остановка поезда для предотвращения аварий и несчастных случаев.

Торможение применяют также для поддержания скорости в допустимых условиях безопасности движения поездов пределах. Такое торможение называют регулировочным.

В зависимости от вида торможения и типа тормозного оборудования может быть реализовано различное замедление поезда. В процессе остановочного торможения реализуют примерно следующие замедления, м/с^2 :

грузовые поезда	$0,1 \div 0,4$;
пассажирские поезда	$0,3 \div 0,6$;
пригородные электропоезда	$0,6 \div 0,8$;
электропоезда метрополитена	$0,6 \div 1,0$;
троллейбусы, одиночный трамвай	$0,8 \div 1,2$;
трамвай с прицепными вагонами	$0,6 \div 0,8$.

Важнейшим показателем процесса экстренного торможения является *тормозной путь – расстояние, проходимое поездом за время от момента перевода ручки крана машиниста в положение экстренного торможения до остановки поезда.*

Как известно, пневматические тормоза приводятся в действие не мгновенно. Их быстроедействие характеризуется так называемым временем подготовки тормозов к действию. Под ним понимают время, в течение которого после применения экстренного торможения тормозная сила расположенного в средней части состава вагона достигает расчетного значения.

Время подготовки тормозов к действию зависит, в основном, от скорости распространения тормозной волны по длине поезда и времени наполнения тормозных цилиндров сжатым воздухом или, иначе говоря, от длины поезда, типа воздухораспределителей и других характеристик тормозной системы.

В подавляющем большинстве случаев при решении тормозных задач условно принимают, что:

- в течение времени подготовки к действию тормозная сила равна нулю и затем мгновенно достигает расчетного значения при скорости начала торможения;
- скорость движения поезда за время подготовки тормоза к действию остается неизменной.

При таких допущениях в движении поезда в режиме торможения, как показано на рис. 11.20, можно выделить две основных фазы – подготовку тормозов к действию и движение под действием тормозной силы полного расчетного значения. Каждой фазе соответствует часть тормозного пути:

$s_{\text{п}}$ – подготовительный (предтормозной путь);

$s_{\text{д}}$ – действительный путь торможения. Подготовительный тормозной путь – это расстояние, проходимое поездом за время подготовки тормозов к действию.

Действительный тормозной путь поезд проходит за время от момента достижения расчетного значения тормозной силы до полной остановки поезда.

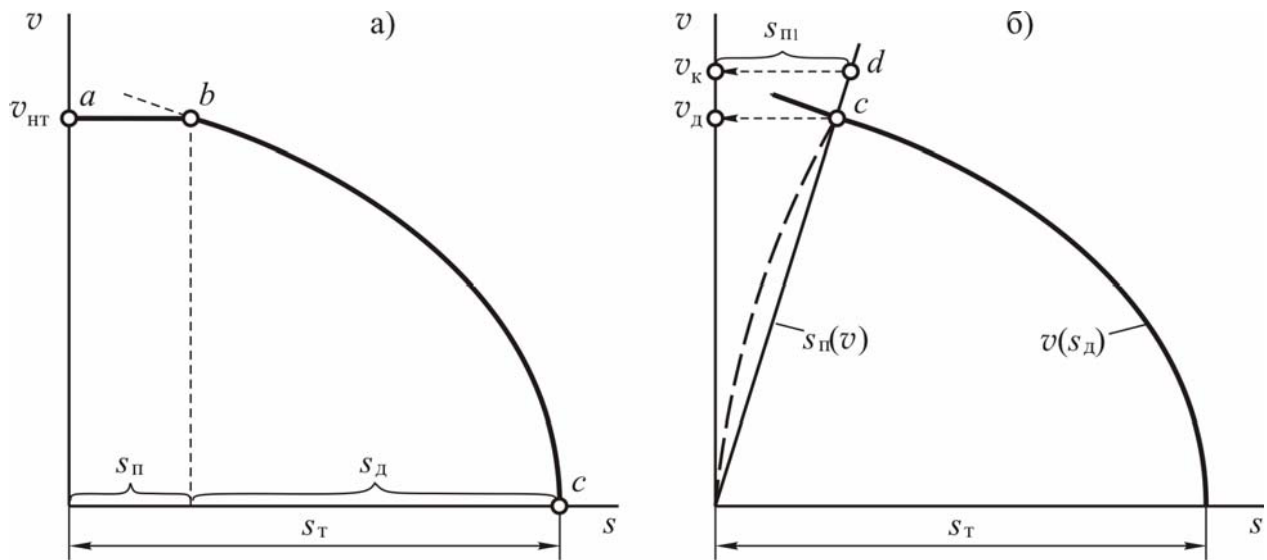


Рис. 11.20. Фазы режима остановочного торможения

Таким образом, полный тормозной путь определяется как сумма

$$s_T = s_{\Pi} + s_{\text{Д}}. \quad (11.57)$$

Подготовительный тормозной путь

$$s_{\Pi} = 0,278 v_{\text{HT}} t_{\Pi}, \text{ м}, \quad (11.58)$$

где v_{HT} — скорость начала торможения, км/ч;

t_{Π} — время подготовки тормозов к действию, с.

В зависимости от категории поезда, типа тормозов и длины состава Правила тяговых расчетов рекомендуют следующие формулы для определения времени подготовки t_{Π} .

Грузовые поезда при пневматических тормозах:

— до 200 осей
$$t_{\Pi} = 7 - \frac{10i}{1000\vartheta_p \varphi_{\text{кр}}}, \text{ с}; \quad (11.59)$$

— от 200 до 300 осей
$$t_{\Pi} = 10 - \frac{15i}{1000\vartheta_p \varphi_{\text{кр}}}, \text{ с}; \quad (11.60)$$

— свыше 300 осей
$$t_{\Pi} = 12 - \frac{18i}{1000\vartheta_p \varphi_{\text{кр}}}, \text{ с}. \quad (11.61)$$

В приведенных формулах:

i – алгебраическое значение уклона элемента пути, для которого выполняется расчет;

ϑ_p – расчетный тормозной коэффициент поезда;

$\varphi_{кр}$ – расчетный коэффициент трения колодки о колесо или бандаж при скорости начала торможения ($v = v_{нт}$).

Пассажирские поезда при пневматических тормозах и одиночно следующие пассажирские локомотивы

$$t_{\Pi} = 4 - \frac{5i}{1000\vartheta_p\varphi_{кр}}, \text{ с.} \quad (11.62)$$

Пассажирские поезда при электропневматических тормозах

$$t_{\Pi} = 2 - \frac{3i}{1000\vartheta_p\varphi_{кр}}, \text{ с.} \quad (11.63)$$

Время подготовки тормозов к действию одиночно следующих грузовых локомотивов определяется по формуле (11.59).

Как уже отмечалось выше, при решении тормозных задач скорость движения поезда на фазе подготовки тормозов к действию (участок ab на рис. 11.20, a) условно принимается неизменной. Однако в реальных условиях за время t_{Π} скорость поезда изменяется – возрастает на крутых спусках и снижается на площадках и подъемах. Поэтому, чтобы уменьшить погрешность при определении подготовительного пути из-за принятого допущения о постоянстве скорости, в формулы для определения t_{Π} введено слагаемое, содержащее как аргумент алгебраическую величину уклона i . За счет такого приема величину t_{Π} фиктивно увеличивают для спусков и уменьшают для подъемов.

Для поездов метрополитенов принимают $t_{\Pi} = 2 \text{ с}$, а для трамваев и троллейбусов – $t_{\Pi} = 1 \text{ с}$.

На железных дорогах всякое препятствие для движения поездов на перегоне ограждается сигналами остановки. Так же, как и препятствия, ограждаются места производства работ на перегоне, требующие остановки поезда.

Порядок ограждения указанных мест и расстояния от препятствия или места производства работ регламентируется Инструкцией по сигнализации на железных дорогах. Исходя из установленных схем ограждения для каждой категории поездов в зависимости от допускаемых на перегоне скоростей движения устанавливается наибольший допустимый по условиям безопасности движения тормозной путь s_{Π} . Согласно действующей Инструкции по сигнализации на железных дорогах Украины тормозной путь должен соответствовать значениям, приведенным в табл. 11.12.

Тормозной путь

Грузовые поезда		Рефрижераторные поезда		Пассажирские поезда	
$v_{\max}$, км/ч	s_T , м	$v_{\max}$, км/ч	s_T , м	$v_{\max}$, км/ч	s_T , м
При руководящем спуске на перегоне менее 6 ‰					
до 80	1000	до 100	1000	до 100	1000
80÷90	1300	100÷120	1200	100÷140	1200
90÷100	1600	—	—	140÷160	1600
При руководящем спуске на перегоне $6 \leq i \leq 10$ ‰					
до 80	1200	до 100	1200	до 100	1200
80÷90	1500	100÷120	1300	100÷140	1300
				140÷160	1700

При руководящем спуске на перегоне более 10 ‰ порядок ограждения (и тормозной путь) устанавливается начальником дороги.

Для поездов метрополитенов величина тормозного пути устанавливается Правилами технической эксплуатации метрополитенов. Тормозные средства поездов метрополитенов должны обеспечивать возможность остановки поезда путём экстренного торможения на тормозном пути, не более указанного в табл. 11.13.

Таблица 11.13

Тормозной путь при экстренном пневматическом торможении поездов метрополитенов

Скорость начала торможения, км/ч		Тормозной путь, м, для уклонов, ‰						
вагонов типа А, Б, Г, Д ($n^* \leq 7$)	вагоны типа Е и других модификаций ($n \leq 8$)	-60	-40	-20	0	+20	+40	+60
—	90	530	450	360	295	245	210	200
75	80	425	315	275	220	195	170	160
65	70	330	265	210	165	145	130	120
55	60	245	195	155	125	110	95	92
45	50	170	140	110	90	80	65	62
35	40	110	95	72	60	50	45	41
25	30	65	55	45	40	31	29	27
15	20	35	30	25	22	18	17	15
—	10	19	16	14	12	11	10	6

* n — число вагонов в поезде.

Для городского электротранспорта тормозные пути не нормируют, а допустимые скорости движения устанавливают в отдельности для каждого конкретного случая с учетом сложности трассы, радиуса кривых, крутизны уклонов, перекрестков и т. д. Однако, техническими условиями на изготовление пасса-

жирского городского электротранспорта регламентируются требования к их тормозным системам.

Так трамваи должны быть оборудованы пневматическим фрикционным, электрическим реостатным, магнитно-рельсовым и ручным тормозом. При номинальной нагрузке тормозные устройства должны обеспечивать при служебном торможении остановку вагона на тормозном пути до 35 м при начальной скорости торможения 30 км/ч. При такой же начальной скорости в случае экстренного торможения с применением магнитно-рельсового тормоза тормозной путь не должен превышать 16 м.

11.6.2. Решение тормозных задач

Как следует из уравнения движения и физической природы процесса торможения, тормозной путь является функцией следующих величин:

– скорости начала торможения $v_{\text{нт}}$, поскольку она определяет кинетическую энергию поезда, которую необходимо погасить в тормозах при остановке поезда;

– уклона пути i , так как от его знака и величины зависит поглощаемая в тормозных устройствах энергия: на подъеме часть кинетической энергии расходуется на повышение потенциальной энергии поезда и при одинаковой величине тормозной силы его замедление будет большим, чем на спуске;

– расчетного тормозного коэффициента ϑ_p , который при данном типе тормозных колодок определяет величину удельной тормозной силы b_k .

Таким образом, расчетный тормозной путь есть функция трех аргументов

$$s_T = f(v_{\text{нт}}, i, \vartheta_p).$$

В зависимости от того, какие три величины из четырех, входящих в приведенное выражение, заданы, а какая определяется, различают четыре типа тормозных задач. Их цель состоит в определении:

1) тормозного пути при заданных тормозных средствах (расчетном тормозном коэффициенте), скорости начала торможения и продольном профиле;

2) наибольшей допускаемой скорости движения при заданных тормозных средствах, тормозном пути и продольном профиле участка;

3) характеристик тормозных средств, обеспечивающих вождение поездов с установленной максимальной скоростью при возможности остановки в случае необходимости в пределах заданного тормозного пути;

4) крутизну спуска, на котором при заданных ϑ_p , $v_{\text{нт}}$ тормозной путь составит заданную величину тормозного пути s_T .

Согласно Правилам тяговых расчетов электрическое рекуперативное или реостатное торможение рассматривается как регулировочное и при решении задач, относящихся к режимам экстренного и служебного торможения, в расчет не принимается.

В грузовых поездах для спусков менее 20 ‰ тормозные средства локомотива и его масса не учитываются. Во всех остальных случаях и при следовании одиночного локомотива его тормозная сила учитывается.

Тормозной путь (**задача 1**) по заданному тормозному коэффициенту ϑ_p , скорости начала торможения v_{HT} и профилю $i(s)$ определяют путем построения каким-либо способом кривой скорости на интервале $[0, v_{HT}]$ по зависимости удельных равнодействующих сил, соответствующих выбранному режиму торможения (для экстренного торможения механическим тормозом – диаграмма $b_k + w_{ox} = f(v)$).

Расстояние, соответствующее изменению скорости в диапазоне $0 \leq v \leq v_{HT}$ составляет путь действительного торможения s_d , как показано на рис. 11.20, а. Чтобы получить общий тормозной путь по формулам (11.59)-(11.63) определяют время подготовки тормозов к действию, далее по формуле (11.58) и (11.57) – подготовительный s_{II} и полный тормозной путь s_T . Ход решения задачи очевиден из графиков рис. 11.20, а.

Для определения тормозного пути s_d на практике применяют как графический, так и расчетный способ определения кривой скорости. Для второго случая в Правилах тяговых расчетов рекомендуется формула

$$s_d = \sum_{i=1}^n \frac{500(v_{Hi}^2 - v_{Ki}^2)}{\zeta(1000\vartheta_p\varphi_{кр} + w_{ox} + i_c)}, \text{ м.} \quad (11.64)$$

где i_c – алгебраическое значение спрямленного (в профиле и в плане) уклона участка, для которого решается задача;

n – количество принятых при определении s_d расчетных интервалов скорости движения $\otimes v_i$;

v_{Hi} , v_{Ki} – начальная и конечная скорости в расчетном интервале, км/ч;

$\varphi_{кр}$, w_{ox} – расчетный коэффициент трения тормозных колодок и основное сопротивление движению поезда на выбеге при средней скорости в принятом интервале $\otimes v_i$.

Формула (11.64) соответствует приведенному ранее выражению (11.34), если в последнем среднее значение ускоряющей силы f_{yi} конкретизировать для режима торможения, а путь выразить в метрах.

Значение коэффициента ζ (замедление поезда под действием удельной замедляющей силы 1 Н/кН (или 1 кГс/т) в км/ч²) согласно Правилам тяговых расчетов следует принять равным:

грузовые и пассажирские поезда120;
электropоезда119;

дизель-поезда	116;
одиночно следующие:	
электровозы	107;
пассажирские тепловозы	118;
грузовые тепловозы	112.

Как показывают расчеты и опыты, способы определения предтормозного пути по усредненному времени подготовки тормозов к действию позволяет получить приемлемые для практики результаты при спусках менее 20 ‰ и скоростях начала торможения, больших 40 км/ч. В случаях, когда тормозная задача выходит за рамки указанных условий, пользуются методами численного интегрирования уравнения движения по интервалам времени. При этом при определении изменения скорости $\otimes v$ в течение заданного интервала времени $\otimes t$ значения тормозной силы b_k , основного сопротивления движению w_{ox} и спрямленного уклона i_c принимаются постоянными.

Приращение скорости на шаге расчета определяют по формуле

$$\otimes v_i = \frac{\zeta(b_k + w_{ox} + i_c)_i \otimes t_i}{3600}, \text{ км/ч,} \quad (11.65)$$

которая вытекает из выражения (11.37) после перевода $\otimes$ из секунд в часы.

Приращение пути составляет

$$\otimes s_i = 0,278 v_{ci} \otimes t_i, \quad (11.66)$$

где v_{ci} – средняя скорость на расчетном интервале, то есть на $\otimes v_i$.

Для применения этого метода построены диаграммы изменения тормозного коэффициента поезда в процессе наполнения тормозных цилиндров (с интервалом 3-5 сек), что позволяет учесть при расчете кривой скорости изменение тормозной силы, начиная с начала процесса торможения. Для грузовых и пассажирских поездов в таком виде зависимости $\vartheta_p(t)$ приведены в Правилах тяговых расчетов.

Следует отметить, что кроме указанных выше случаев, интегрирование уравнения движения по времени используют всегда, когда требуется определить тормозной путь в неустановившихся тормозных режимах, например, когда до остановки поезда тормозные цилиндры не всех вагонов заполнены воздухом и в других случаях.

Определение допустимых по условиям безопасности скоростей движения поездов на участке (**задача 2**) составляет обязательный раздел тяговых расчетов.

Рассмотрим последовательность решения задачи графическим способом.

По табл. 11.12 определяют соответствующий заданной категории поезда и максимально допустимой на участке скорости движения тормозной путь. Да-

лее, выбрав один из приведенных в табл. 11.4 масштабов для решения тормозных задач, строят, начиная с правого конца отрезка, изображающего тормозной путь s_T , кривую скорости $v(s_d)$, как показано на рис. 11.20, б. Построение выполняют с помощью диаграммы замедляющих сил $f_d = b_k + w_{ox}$ для заданного значения уклона.

Затем, задавшись рядом значений скорости начала торможения, для каждого из них рассчитывают время подготовки тормозов к действию, подготовительный путь s_{Π} и строят зависимость $s_{\Pi}(v)$, как показано на рис. 11.20, б пунктирной линией.

Координаты точки пересечения кривых $v(s_d)$ и $s_{\Pi}(v)$ (точка c на рис. 11.20, б) определяют искомую допустимую по тормозам скорость движения v_d и соответствующий ей подготовительный путь (отрезок $c-v_d$ на рис. 11.20, б).

При решении задачи численными методами координаты точки c определяют обычно методом итераций.

Зависимость $s_{\Pi}(v)$ – есть нелинейная функция, поскольку входящий в выражения для t_{Π} коэффициент трения $\phi_{кр}$ зависит от скорости. Однако при скоростях более 50 км/ч зависимость $s_{\Pi}(v)$ приближается к линейной и с приемлемой для практических расчетов точностью её можно изобразить в виде луча, проходящего через начало координат и точку d (см. рис. 11.20, б), соответствующую подготовительному пути $s_{\Pi 1}$ для какой-либо скорости начала торможения v_k из окрестности некоторой допустимой по тормозам скорости. Чаще всего на практике для определения положения линии $s_{\Pi}(v)$ скорость v_k принимают на 10-15 % выше максимально допустимой на участке или равной конструкционной скорости подвижного состава.

В режиме торможения результирующая замедляющая сила и, следовательно, допустимая по тормозам скорость движения, при прочих равных условиях зависит от величины и знака уклона пути. Чтобы установить эту зависимость, допустимую по тормозам скорость движения определяют для ряда значений уклона и получают кривую $v_d(i)$. Напомним, что эта зависимость соответствует только заданным в условиях задачи значениям ϑ_p и s_T .

Зависимость допустимой скорости движения от уклона $v_d(i)$ – монотонно возрастающая функция, поэтому её график обычно получают по результатам решения тормозной задачи для трех-четырёх значений уклона, как показано на рис. 11.21. Обычно расчет проводят для наибольшего на участке подъема ($i_{\max}$), наибольшего спуска ($-i_{\max}$) и площадки ($i = 0$).

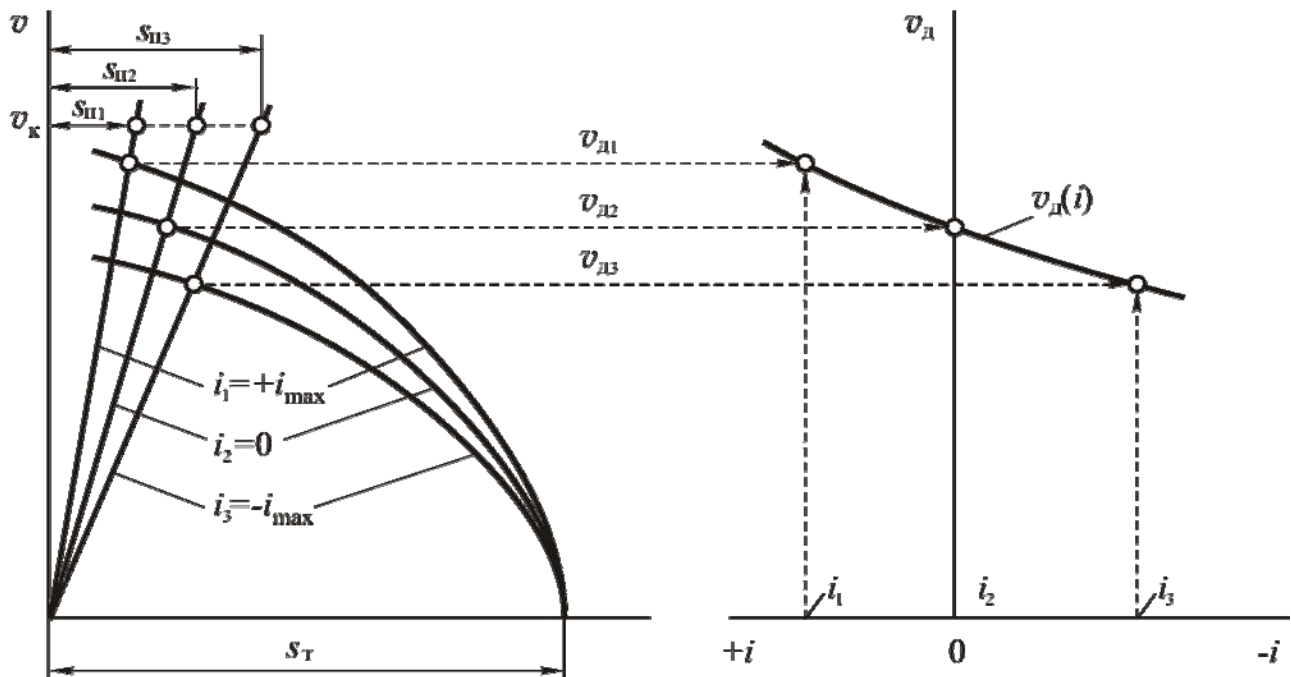


Рис. 11.21. Графическое определение допустимой скорости по тормозам

Расчетный тормозной коэффициент (**задача 3**) для заданного уклона, тормозного пути и наибольшей допустимой скорости движения определяется путем расчета для ряда значений ϑ_p диаграмм удельных действующих сил $b_k + w_{\text{ох}}$ (см. рис. 11.22, а) и значений пути действительного торможения s_d , как показано на рис. 11.22, б. Далее, определив для заданной допустимой скорости движения и величине уклона предтормозной путь, каждому заданному значению ϑ_p ставится в соответствие тормозной путь s_T и строится график зависимости $\vartheta_p(s_T)$.

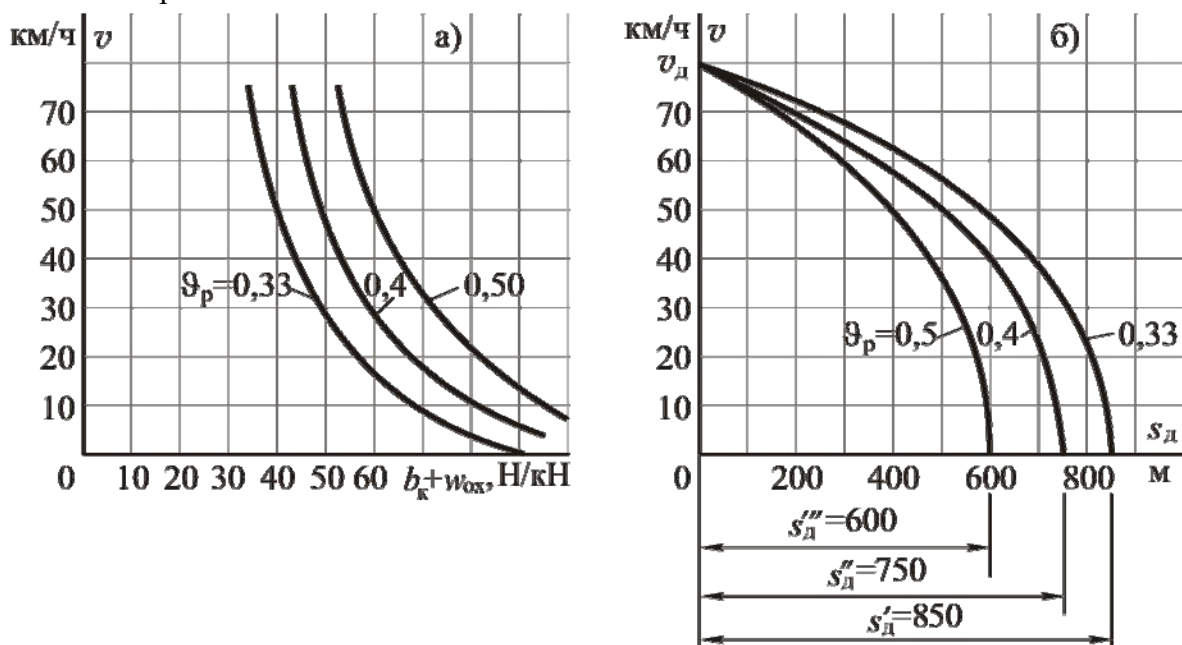


Рис. 11.22. Построение кривых $v(s_d)$ для различных значений ϑ_p

При $i = 0$ и скорости начала торможения 30 км/ч предтормозной путь составляет $s_{\Pi} \cong 150$ м и показанным на рис. 11.22, б значениям $s_{\text{д}}(\vartheta_{\text{р}})$ соответствует приведенный на рис. 11.23 график $\vartheta_{\text{р}}(s_{\text{т}})$. Он позволяет определить соответствующее заданному $s_{\text{т}}$ значение коэффициента $\vartheta_{\text{р}}$.

Задача 4 (Определение уклона по заданным значениям v_{max} , $\vartheta_{\text{р}}$ и

$s_{\text{т}}$) встречается в специальных задачах и решается подобно предыдущей задаче путем построения $v(s)$ для ряда значений уклона и с дальнейшим построением графика $s_{\text{т}}(i)$.

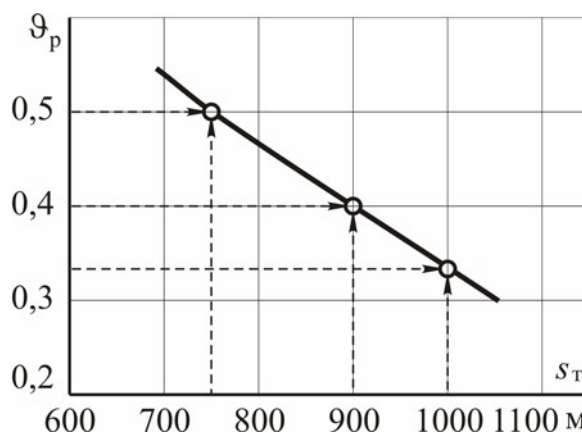


Рис. 11.23. Зависимость тормозного пути от расчетного тормозного коэффициента

11.7. Построение кривых тока

Кривые тока – это зависимости потребляемого электровозом (моторным вагоном) или тяговым двигателем тока от пройденного расстояния. Они необходимы для решения целого ряда задач: определения расхода электроэнергии на тягу поездов; проверки веса поезда и режимов его ведения по нагреву электрооборудования; определения основных параметров системы электроснабжения при составлении проектов электрификации участка. Кривые тока, как и кривые движения, определяют обычно для номинального напряжения в контактной сети.

Кривые потребляемого тока строятся с помощью токовых характеристик электровоза (или тягового двигателя), на основании кривых скорости $v(s)$.

Для электровозов постоянного тока с реостатно-контакторным регулированием мощности строят только кривую тока электровоза $I_3(s)$, поскольку для таких электровозов ток двигателя легко определяется по току электровоза и схеме соединения двигателей.

Построение $I_3(s)$ ведут в такой последовательности.

На кривой скорости выбирают характерные точки и для каждой из них по токовой характеристике электровоза с учетом используемой позиции регулирования напряжения определяют значение тока электровоза. По этим данным строят зависимость $I_3(s)$, как показано на рис. 11.24. Обычно для построения $I_3(s)$ значения тока определяют на границах тех интервалов скорости $\otimes v$, которые принимались при построении кривой скорости.

Кривую тока строят на одном планшете с графиками $v(s)$ и $t(s)$. Масштаб тока не зависит от масштаба скорости и времени. Он выбирается любым, удобным для работы.

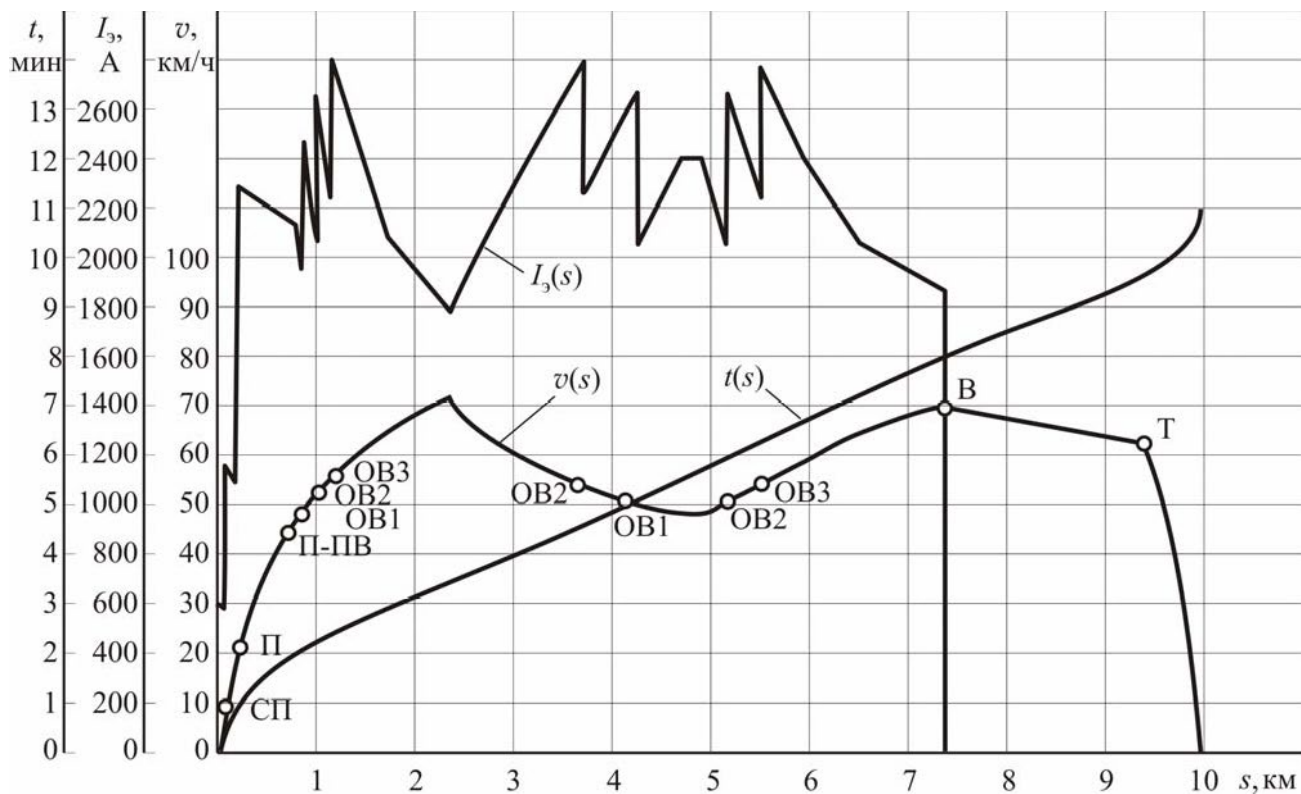


Рис. 11.24. Построение кривой тока электровоза постоянного тока

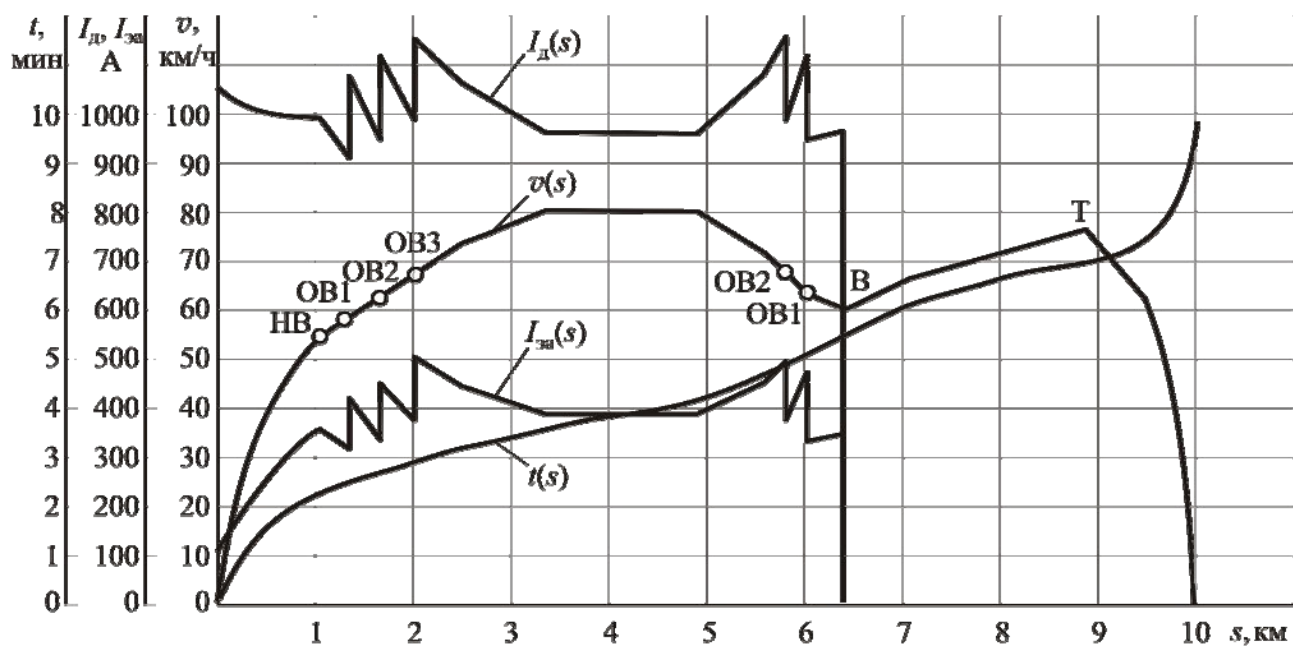


Рис. 11.25. Построение кривых тока электровоза переменного тока

Построенная таким способом кривая тока изображается как кусочно-линейная функция. Однако в местах, где имеет место изменение нагруженности тяговых двигателей (изменение схемы соединения, степени ослабления возбуждения), кривая $I_3(s)$ имеет разрывы первого рода и остроконечные пики.

Это соответствует принятому при интегрировании уравнения движения допущению о мгновенном установлении нового режима нагружения при ступенчатом регулировании напряжения или возбуждения. Такое допущение не вносит заметных погрешностей в расчеты расхода электроэнергии и нагрева электрооборудования, поскольку длительность переходных электромагнитных процессов существенно ниже, чем длительность механических переходных процессов в поезде и за время перехода двигателей на новый режим нагружения скорость движения поезда существенно не изменяется.

При производстве тяговых расчетов для участков, электрифицированных на переменном токе, определяется, как показано на рис. 11.25, кривая активной составляющей тока электровоза $I_{\text{эа}}(s)$ и кривая тока двигателя $I(s)$. Это обусловлено тем, что взаимосвязь $I_{\text{эа}}$ и I нелинейная, так как включает параметры, зависящие не только от позиции регулирования напряжения, но и от тока нагрузки. Для построения кривых тока электровоза и тока двигателя обычно используют разные масштабы, так как эти токи существенно отличаются по величине.

Если тяговые расчеты выполняют с целью определения параметров системы электроснабжения, то их программа включает также построение кривых полного тока электровоза $I_3(s)$ и его реактивной составляющей. Они необходимы для расчета полной мощности тяги и её реактивной составляющей.

В случае применения электрического торможения для построения соответствующих участков кривых тока электровоза $I_3(v)$ или тока тягового двигателя $I(s)$ используют рекуперативные или реостатные токовые характеристики.

Тяговая характеристика электровоза с плавным регулированием мощности представляется областью допустимых значений силы тяги. В расчет можно принять любое значение силы тяги из области допустимых. Выбор целесообразной величины силы тяги определяется из условия реализации требуемого режима движения поезда.

Иначе обстоит в этом случае дело с определением тока электровоза. Дело в том, что при использовании систем плавного регулирования мощности токовые характеристики представляются, как и тяговые, значениями токов, соответствующих ограничениям тяговой характеристики. Поэтому нет возможности выбранному по условиям целесообразности ведения поезда значению силы тяги поставить в соответствие ток двигателя и электровоза.

Чтобы обойти указанное затруднение, область допустимых значений силы тяги дополняют зависимостями $F_k(v)$ для ряда промежуточных зон регулирования напряжения и затем для этих же условий строят токовые характеристики.

Так, например, для электровоза 2ЕЛ5 зависимости $F_k(v)$ и $I_3(v)$ построены для напряжений, соответствующих каждой зоне регулирования (см. рис. 9.26). Для электровоза ДСЗ (рис. 10.21) эта задача решена путем нанесения на область определения токовой характеристики ряда детерминированных зависимостей

$I_3(v)$, каждая из которых соответствует реализации фиксированного значения силы тяги (см. рис. Ж.1 приложения Ж).

Указанный способ представления токовых характеристик позволяет приближенно построить кривые тока электровоза с плавным регулированием мощности. Совершенно очевидно, что точность расчетов в этом случае определяется густотой и точностью расчета дополнительных линий, наносимых на токовые характеристики.

Практические приемы построения кривых тока при плавном регулировании тяговой или тормозной мощности электроподвижного состава рассмотрены в примерах тяговых расчетов, приведенных в приложениях П и Р.

11.8. Расчет кривых движения при пониженном напряжении в контактной сети

Тяговые расчеты обычно выполняют, используя паспортные характеристики тяговых средств. Однако опыт показывает, что в зависимости от условий эксплуатации тяговые характеристики в определенной мере отличаются от паспортных.

В связи с изложенным возникает необходимость определения степени влияния различных эксплуатационных факторов на характеристики электроподвижного состава и разработки приемов учета таких отклонений в практике тяговых расчетов.

Под условиями эксплуатации обычно понимают:

- характеристики плана и профиля пути;
- допустимые максимальные скорости движения;
- степень использования грузоподъемности вагонов (определяет основное сопротивление движению);
- длину приема-отправочных путей отдельных пунктов;
- график движения поездов (интервал попутного следования, график движения, порядок пропуска поездов по отдельным пунктам и т. п.);
- нормативы к графику движения поездов (критическая и графиковые нормы массы поездов);
- метеорологические условия в регионе расположения железной дороги;
- характеристики системы электроснабжения (только для электроподвижного состава).

Отличительной особенностью большинства эксплуатируемых в настоящее время тяговых средств электрического транспорта является зависимость его характеристик тяги от напряжения на токоприемнике.

Отклонение напряжения на токоприемнике от номинального может вызываться:

- колебанием напряжения на входных шинах тяговых подстанций, то есть в системе первичного электроснабжения;
- падениями напряжения в силовом электрооборудовании тяговых подстанций и в контактной сети.

Таким образом, напряжение на токоприемнике определяют не только принятая схема и параметры системы электроснабжения, но и величина и закон регулирования мощности тяги, изменение числа, величины и места приложения тяговой нагрузки от других поездов, находящихся одновременно на рассматриваемом участке питания.

На различных участках линии может наблюдаться как пониженное, так и повышенное напряжение в контактной сети.

Повышенное напряжение характерно для участков рекуперации. При этом следует отметить, что повышение напряжения в пределах, предусмотренных Правилами технической эксплуатации железных дорог, может привести к снижению эффективности рекуперативного торможения, но не ограничивает тяговые свойства электроподвижного состава и возможности регулирования силы тяги и скорости движения поездов.

В противоположность этому пониженное напряжение в ряде случаев может ограничивать величину реализуемой мощности тяги и скорость движения поездов. Кроме того для современных электровозов постоянного тока пониженное напряжение отрицательно сказывается на производительности мотор-компрессорных установках и на работе системы охлаждения электрооборудования в связи со снижением частоты вращения мотор-вентиляторов. В свою очередь ухудшение эффективности охлаждения тяговых двигателей обуславливает снижение значений тока номинального режима.

Опыт показывает, что тяговые расчеты, выполненные на основе паспортных характеристик электроподвижного состава, дают приемлемые результаты, если среднее значение напряжения в контактной сети мало отличается от номинального. В случае, когда движение поезда на участке или отдельных перегонах происходит при значительном снижении среднего напряжения на токоприемнике, возникает необходимость в расчете кривых движения для близкого к реальному напряжению в контактной сети.

Согласно действующим Правилам тяговых расчетов, тяговые расчеты при пониженном напряжении в контактной сети выполняются каждый раз с разрешения Укрзализныци. Такой подход объясняется тем, что подобные тяговые расчеты обычно выполняются с целью обоснования необходимости снижения массы или увеличения времени хода поездов на участке.

Чтобы выполнить тяговые расчеты при отличающемся от номинального значении напряжения в контактной сети, необходимо:

- установить для рассматриваемого участка значение расчетного напряжения (по результатам расчета системы электроснабжения или по результатам наблюдений);
- произвести пересчет характеристик электроподвижного состава на выбранное напряжение.

Обычно целью тяговых расчетов при измененном напряжении есть определение скорости движения и расхода электроэнергии на тягу, поэтому достаточ-

но пересчитать и перестроить на новое значение напряжения только тяговые и токовые характеристики.

Пересчет выполняется для всех ступеней регулирования. Для выбранных значений силы тяги и тока на каждой позиции с помощью формулы (5.49) рассчитывают соответствующую измененному напряжению скорость движения. По результатам расчетов строятся графики тяговых и токовых характеристик и в порядке, изложенном ранее в разделе 6.6, определяются установленные ограничения силы тяги и зависимости среднего значения пускового тока от скорости.

Далее на тяговые и токовые характеристики наносят новые значения скоростей переходов и определяются параметры расчетного режима, то есть значения расчетной силы тяги $F_{кр}$ и расчетной скорости v_p . Расчетный режим работы, то есть соответствующая ему позиция регулирования, принимается таким же, как и для номинального напряжения.

Следует указать, что процесс нанесения ограничений на пересчитанные характеристики можно несколько упростить, если иметь в виду, что ограничение по сцеплению $F_{сц}(v)$ и сила тяги при трогании не зависят от напряжения на токоприемнике. Неизменными принимаются также значения силы тяги, соответствующие на конкретной позиции регулирования максимально допустимому току двигателя.

Проверка возможности пуска поезда на труднейших позициях за пределами остановочных пунктов производится по наименьшим значениям силы тяги, реализуемым во время разгона (пунктирные линии на тяговых характеристиках) при номинальном напряжении на токоприемнике.

Кривые движения на участках применения рекуперации при пониженном напряжении рассчитываются с помощью паспортных характеристик, поскольку при пониженном напряжении необходимый режим торможения, предусмотренный для номинального напряжения, можно реализовать за счет соответствующего выбора более низкой позиции регулирования возбуждения.

Рассмотренная выше взаимосвязь напряжения на токоприемнике и характеристик электроподвижного состава имеет место в случаях, когда используемая система управления не предусматривает стабилизации тяговой мощности, как например, на всех находящихся в эксплуатации типах электроподвижного состава постоянного и однофазно-постоянного тока с коллекторными тяговыми двигателями.

Если же система управления обладает функцией стабилизации значений тяговой мощности, предусмотренных алгоритмом регулирования, то колебания напряжения на токоприемнике при прочих равных условиях движения вызовут лишь изменение составляющих тока электровоза (тока контактной сети), что скажется на расходе электроэнергии на тягу, к.п.д. и коэффициенте мощности электроподвижного состава. Как пример можно привести электровоз ДСЗ (см. рис. 10.18), на котором предусмотрена стабилизация выходного напряже-

ния входного преобразователя при колебании напряжения в контактной сети в пределах, допускаемых Правилами эксплуатации железных дорог.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ушаков, С. С. Повышение эффективности новых видов тяги / С. С. Ушаков. – М.: Трансжелдориздат, 1959. – 303 с.
2. Хазан, М. Н. Энергетика локомотивов / М. Н. Хазан. – М.: Транспорт, 1969. – 223 с.
3. Воронков, И. М. Курс теоретической механики / И. М. Воронков. – М., Гостехиздат, 1966. – 552 с.
4. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.
5. Корниенко, В. В. Электрификация железных дорог / В. В. Корниенко, А. В. Котельников, В. Т. Доманский. – К.: Транспорт Украины, 2004. – 195 с.
6. Дмитриев, В. А. Народно-хозяйственная эффективность электрификации железных дорог и применение тепловозной тяги / В. А. Дмитриев. – М.: Транспорт, 1980. – 273 с.
7. Бирюков, И. В. Тяговые передачи электроподвижного состава / И. В. Бирюков, А. И. Беляев, Е. К. Рыбников. – М.: Транспорт, 1986. – 256 с.
8. Розенфельд, В. Е. Теория электрической тяги / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров. – М.: Транспорт, 1983. – 328 с.
9. Марков, Д. П. Взаимосвязь коэффициента трения с проскальзыванием в условиях взаимодействия колеса с рельсом / Д. П. Марков // Вестник ВНИЖТа. – 2003. – № 3. – С. 31-33.
10. Голубенко, А. Л. Сцепление колеса с рельсом: Монография / А. Л. Голубенко. – К.: “ВИПОЛ”, 1993. – 448 с.
11. Бирюков, И. В. Механическая часть тягового подвижного состава / И. В. Бирюков, А. Н. Савоськин, Г. Л. Бурчак. – М.: Транспорт, 1992. – 440 с.
12. Минов, Д. К. Повышение тяговых свойств электровозов и тепловозов с электрической передачей / Д. К. Минов. – М.: Транспорт, 1965. – 267 с.
13. Вербек, Г. Современное представление о сцеплении и его использовании / Г. Вербек // Железные дороги мира. – 1974. – № 4. – С. 23-53.
14. Головатый, А. Т. Независимое возбуждение тяговых двигателей электровозов / А. Т. Головатый, И. П. Исаев, Е. В. Торчаков. – М.: Транспорт, 1976. – 152 с.
15. АС СССР (М) 889507. Способ повышения тягового усилия / В. Ф. Гуменный, А. А. Белицкий. – 15.12.81.
16. Иноземцев, В. Г. Автоматические тормоза / В. Г. Иноземцев, В. М. Казаринов, В. Ф. Ясенцев. – М.: Транспорт, 1981. – 464 с.
17. Тихменев, Б. Н. Подвижной состав электрифицированных железных дорог / Б. Н. Тихменев, Л. М. Трахтман. – М.: Транспорт, 1980. – 471 с.
18. Бочаров, В. И. Магистральные электровозы. Тяговые электрические машины / В. И. Бочаров, Г. В. Василенко, А. Л. Курочка, В. И. Седов. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 464 с.

19. Вольдек, А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1974. – 839 с.
20. Винокуров, В. А. Электрические машины железнодорожного транспорта / В. А. Винокуров, Д. А. Попов. – М.: Транспорт, 1986. – 511 с.
21. Бочаров, В. И. Тяговые электродвигатели электропоездов / В. И. Бочаров, В. И. Захаров, М. А. Коломойцев, М. А. Комаровский. – Новочеркасск: Агентство Наутилус, 1998. – 667 с.
22. Курбасов, А. С. Проектирование тяговых электродвигателей / А. С. Курбасов, В. И. Седов, Л. Н. Сорин. – М.: Транспорт, 1987. – 536 с.
23. Тихонов, К. К. Теоретические основы выбора оптимальных весовых норм грузовых поездов / К. К. Тихонов // Тр. МИИТа. – М.: Транспорт, 1970. – Вып. 331. – 200 с.
24. Босов, А. А. Функции множества и их применение / А. А. Босов. – Днепропетровск: Изд-во «Андрей», 2007. – 182 с.
25. Борцов, П. И. И все же двигатели отключать не следует / П. И. Борцов, А. С. Курбасов, Х. Я. Быстрицкий // Электрическая и тепловозная тяга. – 1978. – № 10. – С. 35-37.
26. Тулупов, В. А. Автоматическое регулирование сил тяги и торможения электроподвижного состава / В. А. Тулупов. – М.: Транспорт, 1976. – 368 с.
27. Гетьман, Г. К. Научные основы определения рационального мощностного ряда тяговых средств железнодорожного транспорта: монография / Г. К. Гетьман. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, – 2008. – 444 с.
28. Дрейпер, Н. Прикладной регрессионный анализ / Н. Дрейпер, Т. Смит. – М.: Статистика, 1973. – 392 с.
29. Костромин, А. М. Оптимизация управления локомотивом / А. М. Костромин. – М.: Транспорт, 1979. – 119 с.
30. Гетьман, Г. К. Выбор параметров номинального режима магистральных электропоездов / Г. К. Гетьман, С. В. Арпуль, Р. Н. Демчук // Залізничний транспорт України. – 2009. – № 3. – С. 11-14.
31. Фуфрянский, Н. А. Развитие локомотивной тяги / Н. А. Фуфрянский, Н. А. Долганов, А. С. Нестрахов. – М.: Транспорт, 1988. – 344 с.
32. Некрасов, О. А. Режимы работы магистральных электропоездов // О. А. Некрасов, А. Л. Лисицин, Л. А. Мугинштейн, В. И. Рахманинов. – М.: Транспорт, 1983. – 231 с.
33. Тихонов, К. К. Оптимальные ходовые скорости грузовых поездов / К. К. Тихонов. – М.: Транспорт, 1964. – 262 с.
34. Луговой, П. А. Основы технико-экономических расчетов на железнодорожном транспорте / П. А. Луговой, Л. Г. Цыпин, Р. А. Аукционек. – М.: Транспорт, 1973. – 232 с.
35. Кочнев, Ф. П. Управление эксплуатационной работой железных дорог / Ф. П. Кочнев, И. Б. Сотников. – М.: Транспорт, 1990. – 424 с.

36. Гетьман, Г. К. Определение параметров номинального режима пассажирских электровозов для железных дорог Украины / Г. К. Гетьман, С. В. Арпуль // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В.Лазаряна: Зб. наук. пр. – 2009. – Вип. 25. – С. 263-266.
37. Тихменев, Б. Н. Вентильные двигатели и их применение на электроподвижном составе / Б. Н. Тихменев, Н. Н. Горин, В. А. Кучумов, В. А. Сенаторов. – М.: Транспорт, 1976. – 279 с.
38. Аракелян, А. К. Вентильный электропривод с синхронным двигателем и зависимым инвертором / А. К. Аракелян, А. А. Афанасьев, М. Г. Чиликин. – М.: Энергия, 1977. – 224 с.
39. Находкин, М. Д. Проектирование тяговых электрических машин / М. Д. Находкин, Г. В. Василенко, В. И. Бочаров, М. А. Козорезов. – М.: Транспорт, 1976. – 624 с.
40. Курбасов, А. С. Повышение работоспособности тяговых электродвигателей / А. С. Курбасов. – М.: Транспорт, 1977. – 223 с.
41. Петров, Ю. П. Оптимальное управление движением транспортных средств / Ю. П. Петров. – Л.: Энергия, 1969. – 96 с.
42. ДСТУ Б А.2.4-2.95 (ГОСТ 21.204-93). Державний стандарт України. Умовні графічні позначення і зображення елементів генеральних планів та споруд транспорту (ГОСТ 21.204-93. Условные графические обозначения и изображения элементов генеральных планов и сооружений транспорта). Держстандарт України. 1995. – 31 с.
43. Тихменев, Б. Н. Электровозы переменного тока со статическими преобразователями / Б. Н. Тихменев. – М.: Трансжелдориздат, 1958. – 267 с.
44. Скоблев, В. Е. Двигатели пульсирующего тока / В. Е. Скоблев. – Л.: Энергия, 1968. – 231 с.
45. Теорія електричної тяги: Програмоване завдання на курсовий проект / Видво Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна; Уклад.: Г. К. Гетьман, Д., 2003. – 41 с.
46. Басов, Г. Г. Розвиток електричного моторвагонного рухомого складу / Г. Г. Басов, Яцко С. І. Харків: «Атекс+», 2005. – 248 с.
47. Розенфельд, В. Е. Электрическая тяга поездов / В. Е. Розенфельд, Ю. Е. Рыбкин, И. А. Лакштовский. – М.: Трансжелдориздат, 1940. – 800 с.
48. Осипов, С. И. Испытания локомотивов и выбор рациональных режимов вождения поездов / С. И. Осипов, Е. В. Горчаков, И. П. Исаев, Н. В. Максимов. – М.: Транспорт, 1975. – 272 с.
49. Гетьман, Г. К. Расчет характеристик тяговых электрических машин постоянного тока / Г. К. Гетьман // Електротехніка і електромеханіка. – 2002. – № 2. – С.37-38.
50. Литовченко, В. В. Определение энергетических показателей электроподвижного состава переменного тока с 4q-S-преобразователями / В. В. Литовченко // Електромеханіка. – 1993. – № 5. – С. 23-31.

51. Сергиенко, Н. И. Определение параметров номинального режима пассажирских электровозов для железных дорог Украины / Н. И. Сергиенко, Г. К. Гетьман // Залізничний транспорт України. – 2008. – № 4. – С. 10-12.
52. Находкин, М. Д. Универсальные магнитные характеристики тяговых электродвигателей постоянного тока / М. Д. Находкин, В. С. Хвостов // Вестник электропромышленности. – 1958. – № 1. – С. 44-48.
53. Гетьман, Г. К. Об использовании универсальной магнитной характеристики для расчета электромеханических характеристик тягового двигателя / Г. К. Гетьман, С. Н. Голик // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна: Зб. наук. пр. – 2007. – Вип. 16. – С. 21-25.
54. Безрученко, В. М. Тягові електричні машини електрорухомого складу / Безрученко В. М., Варченко В. К., Чумак В. В. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2003. – 252 с.
55. Гетьман, Г. К. Некоторые пути снижения сверхнормативного износа колёс тягового подвижного состава / Г. К. Гетьман, Н. И. Сергиенко // Залізничний транспорт України. – 1997. – № 2-3. – С. 15-17.
56. Гетьман, Г. К. О выборе пусковых частот плоских линейных асинхронных двигателей / Г. К. Гетьман Г. К. // Вопросы усовершенствования устройств электрической тяги. – Тр. ДИИТа. – 1975. – Вып. 163. – С. 33-35.
57. Гетьман, Г. К. Новые тормозные колодки / Г. К. Гетьман, Ю. Ф. Дубравин // Залізничний транспорт України. – 2002. – № 4. – С. 30-32.

СОДЕРЖАНИЕ

Глава 11. ТЯГОВЫЕ РАСЧЕТЫ	3
11.1. Задачи тяговых расчетов	3
11.2. Подготовка плана и профиля пути для тяговых расчетов	5
11.3. Расчет массы грузовых поездов.....	12
11.3.1. Краткие сведения об определении массы и скорости движения поездов.....	12
11.3.2. Расчет массы состава из условия движения поезда с установившейся скоростью по расчетному подъему	14
11.3.3. Проверка массы состава на трогание	17
11.3.4. Проверка массы состава по длине приемо-отправочных путей.....	18
11.3.5. Проверка возможности преодоления труднейших подъемов	20
11.3.6. Определение массы состава с учетом использования кинетической энергии на труднейших подъемах	21
11.4. Расчет и построение диаграмм удельных равнодействующих сил	22
11.5. Расчет кривых движения	26
11.5.1. Постановка задачи расчета кривых движения	26
11.5.2. Аналитический метод расчета кривых движения.....	29
11.5.3. Построение кривых движения графическим способом	35
11.5.4. Техника построения кривой скорости.....	43
11.6. Тормозные расчеты.....	50
11.6.1. Общие понятия и нормируемые величины.....	50
11.6.2. Решение тормозных задач	55
11.7. Построение кривых тока	60
11.8. Расчет кривых движения при пониженном напряжении в контактной сети	63
11.9 Тяговые расчеты на ЭВМ.....	66
Глава 12. РАСЧЕТ НАГРЕВАНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ.....	71
12.1. Общие сведения	71
12.2. Ограничение режимов нагружения тяговых двигателей по нагреванию обмоток.....	72
12.3. Расчет нагревания обмоток тяговых двигателей	76
12.4. Факторы, определяющие процесс нагревания обмоток.....	80
12.5. Определение тепловых параметров обмоток тяговых двигателей	85
12.6. Расчет нагревания обмоток тяговых двигателей по кривым движения.....	90

12.7. Расчет температуры обмоток при повторных рейсах	93
12.8. Проверка допустимости режимов нагружения по нагреванию тяговых двигателей методом среднеквадратичного тока.....	96
12.9. Построение кривых нагревания по сетке температурных кривых	98
Глава 13. ЭНЕРГЕТИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ.....	100
13.1. Расчет расхода электроэнергии в тяговых расчетах	100
13.1.1. Расход электроэнергии на тягу	100
13.1.2. Расхода электроэнергии на собственные нужды и отопление	103
13.1.3. Удельный расход электроэнергии на тягу поездов	104
13.2. Составляющие расхода электроэнергии на тягу поездов и пути её экономии.....	106
13.2.1. Составляющие расхода электроэнергии на движение поезда	106
13.2.2. Работа сил сопротивления движению	108
13.2.3. Потери энергии в тормозах	114
13.2.4. Потери энергии на вредных спусках.....	116
13.2.5. Потери энергии в пусковых устройствах	117
13.2.6. Потери электроэнергии в тяговом электрооборудовании.....	120
13.2.7. Расход электроэнергии на собственные нужды.....	125
13.3. Нормирование расхода электроэнергии на тягу поездов	126
13.3.1. Задача нормирования расхода электроэнергии.....	126
13.3.2. Метод аналитического расчета норм расхода электроэнергии.....	127
13.3.3. Опытнo-статистические методы нормирования расхода электроэнергии.....	131
13.4. Оптимизация перегонных времен хода поездов по минимуму расхода электроэнергии	135
13.4.1. Постановка задачи оптимального распределения перегонных времен хода поездов и графический способ её решения.....	136
13.4.2. Оптимизация перегонных времен хода аналитическим способом	139
Глава 14. ТЯГОВЫЕ РАСЧЕТЫ В ЗАДАЧАХ ТЯГОВОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ	144
14.1. Предельные тяговые характеристики грузовых электровозов постоянного и однофазно-постоянного тока	144
14.2. Предельные тяговые характеристики пассажирских электровозов постоянного и однофазно-постоянного тока	152

14.3. Определение управляющих параметров в уравнении движения поезда	158
14.4. Предельные тяговые характеристики электровозов с асинхронным тяговым приводом	160
14.5. Определение расхода электроэнергии на тягу	161
14.6. Тягово-энергетические характеристики электроподвижного состава	164

Глава 15. **ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ НОМИНАЛЬНОГО РЕЖИМА ТЯГОВЫХ СРЕДСТВ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**..... 168

15.1. Общие замечания	168
15.2. Постановка задачи тягового обеспечения	169
15.3. Определение скорости номинального режима	172
15.4. Определение рационального мощностного ряда электровозов	179
15.4.1. Кратность тяги и избыточная мощность электроподвижного парка для отдельного поезда-участка	180
15.4.2. Кратность тяги и избыточная мощность парка для полигонов тяги	186
15.4.3. Кратность тяги и избыточная мощность потребного парка пассажирских электровозов	191
15.5. Практические приемы определения оптимального мощностного ряда электроподвижного состава	193
15.5.1. Определение показателей оптимизации при дискретном распределении массы составов	193
15.5.2. Алгоритм определения оптимальной градации мощности электровозов	195
15.5.3. Формирование варианта мощностей тягового модуля	199
15.5.4. Пример решения задачи определения рационального мощностного ряда электровозов	200

Список использованных источников	206
--	-----

Приложение А. Технические данные и характеристики электровоза 2ЕЛ5	209
--	-----

Приложение Б. Технические данные и характеристики тягового двигателя ДТК-820 (НБ-514Б)	212
--	-----

Приложение В. Технические данные и характеристики электровоза 2ЕЛ4	221
--	-----

Приложение Г. Технические данные и характеристики тягового двигателя ДТК-800А	227
---	-----

Приложение Д. Технические данные и характеристики электровоза ЧС7 и тягового двигателя 1АЛ4846dt	233
--	-----

Приложение Е. Технические данные электровоза ДЭ1 и тягового двигателя ЭД-141 У (СТК-730У1)	236
Приложение Ж. Основные технические данные электровоза ДС3 и тягового двигателя АД-914 У	242
Приложение И. Основные технические данные и характеристики электровоза ЧС8	250
Приложение К. Технические данные электропоезда ЕПЛ2Т и тягового двигателя 1ДТ.003.Л8 У1	254
Приложение Л. Технические данные электропоезда ЕПЛ9Т и тягового двигателя 1ДТ.003.11У	259
Приложение М. Пример расчета характеристик электровоза однофазно-постоянного тока	264
Приложение Н. Пример расчета к.п.д. электровоза.....	292
Приложение П. Пример тягового расчета для электровоза постоянного тока.....	297
Приложение Р. Пример тягового расчета для электровоза однофазно-постоянного тока	321



Гетьман Геннадий Кузьмич
доктор технических наук,
профессор, заведующий
кафедрой «Электрический
подвижной состав железных
дорог» Днепропетровского
национального университета
железнодорожного транспорта.



ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ том II

Г. К. ГЕТЬМАН