

по которым производят выбор рационального режима вождения поездов. Из изменяющихся способов тяговых расчетов на метрополитенах наибольшее применение нашел графический способ. В последнее время разработаны алгоритмы тяговых расчетов на ЭВМ.

## 2. ПРИМЕР ТЯГОВОГО РАСЧЕТА

Подвижной состав из пяти вагонов типа Е. Все вагоны моторные, на одном вагоне четыре двигателя ДК-108А. Вес порожнего вагона 30 т (вес вагона и пассажиров округлены по сравнению с фактическими для упрощения вычислений). Расчетный вес пассажиров 10 т, ускорение  $1,3 \text{ м/с}^2$ , замедление с 70 до 40 км/ч —  $1,3 \text{ м/с}^2$ , а с 40 до 25 км/ч —  $1 \text{ м/с}^2$ ; пусковой ток на параллельном соединении  $2 \cdot 310 \text{ А}$ ; скорость выхода на автоматическую характеристику 45 км/ч при ослабленном возбуждении и параллельном соединении двигателей (рис. 210).

Р е ш е н и е.

1. Определим масштабы и полюсные расстояния для графических построений. Применительно к кривым движения соотношения между масштабами скорости  $m_v^2$ , пути  $m_l$  и действующих сил  $m_k$ :

$$m_k = \frac{m_v^2}{\delta' m_l},$$

где  $\delta' = \frac{1 + \gamma}{0,127}$ ;  $1 + \gamma = 1,1$ .

Масштабы примем исходя из формата чертежа. Для нашего примера возьмем:  $m_l = 0,1 \text{ мм/м}$ ;  $m_v = 2 \text{ мм/км/ч}$ ;  $m_t = 1 \text{ мм/с}$ ;  $m_A = 0,1 \text{ мм/А}$ .

Тогда соотношение

$$m_k = \frac{2^2 \cdot 0,127}{1,1 \cdot 0,1} = 4,6 \text{ мм/кгс}.$$

Для построения кривой  $t = f(l)$  определим полюсное расстояние

$$B = \frac{m_l m_v}{\delta'' m_t},$$

где  $m_t$  — масштаб времени;  $\delta'' = 0,278$ .

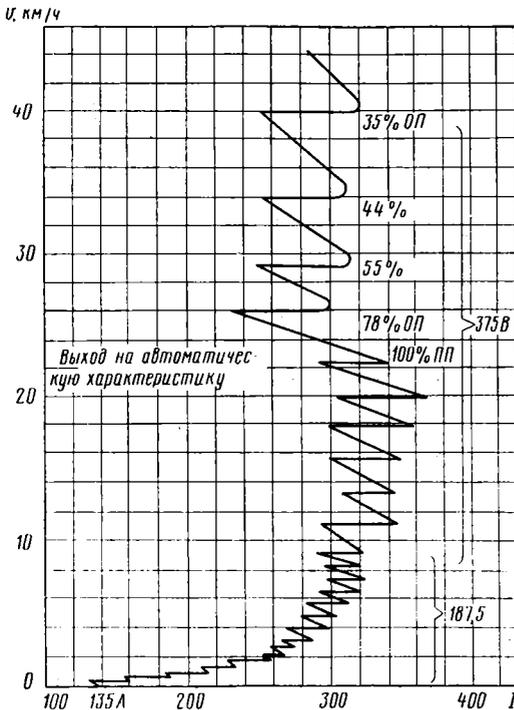


Рис. 210. Пусковая диаграмма двигателя ДК-108А

Найдем  $B = \frac{1 \cdot 2}{0,278 \cdot 0,1} = 72 \text{ мм.}$

2. Определим удельные сопротивления движению по формулам (127) и (128), если известно  $G = 5(30 + 10) = 200 \text{ т; } G_B = 30 + 10 = 40 \text{ т; } n_B = 5$  в режиме тяги по формуле (127) и в режиме выбега по формуле (128).

3. Затем найдем удельные ускоряющие усилия.

Результаты расчетов следующие:

$v, \text{ км/ч}$	10	20	23	30	40	45
$W_0, \text{ кгс/т}$	2,65	3,2	3,4	3,95	4,9	5,46
$W_{от}, \text{ кгс/т}$	1,2	1,5	1,63	2,0	2,7	3,14
$F, \text{ кгс}$	1500	1500	1500	740	740	740
$f = \frac{zF}{G_B}, \text{ кгс/т}$	150	150	150	74	74	74
$f_0 = f - W_{от}, \text{ кгс/т}$	148,8	148,5	148,3	7,72	71,3	70,86

Продолжение

$v, \text{ км/ч}$	50	60	70	80	90
$W_0, \text{ кгс/т}$	6,05	7,4	8,95	10,7	12,65
$W_{от}, \text{ кгс/т}$	3,6	4,7	6,0	7,5	9,2
$F, \text{ кгс}$	600	380	280	210	160
$f = \frac{zF}{G_B}, \text{ кгс/т}$	60	38	28	21	16
$f_0 = f - W_{от}, \text{ кгс/т}$	56,4	33,3	22	13,5	6,8

По результатам расчета строим графики  $f_0 = f(v)$  и  $W_0 = f(v)$  (рис. 211, а).

4. Построение кривой движения  $v = f(l)$ . Из-за ограниченного формата печатной страницы построение графиков выполним в условных единицах. Справа от диаграммы зависимости  $f_q = f(v)$  и  $W_0 = f(v)$  наносим оси координат  $v = f(l)$ . На оси  $l$  отметим точки перелома профиля пути и укажем длины и условные уклоны элементов пути. Затем на диаграммах действующих сил (по оси абсцисс) и движения (по оси ординат) нанесем интервалы скоростей

$$\Delta v_1, \Delta v_2, \Delta v_3, \Delta v_4.$$

Интервалы берем по характерным точкам пусковой диаграммы, руководствуясь удобствами графического исполнения. Для построения графика движения первого элемента профиля, имеющего уклон  $i_1 < i_2$ , начало координат  $f_0 = f(v)$  переносим в точку  $O_1$  на значение  $+i_1$ . Затем на кривой  $f_0 = f(v)$  отмечаем точки 1, 2,

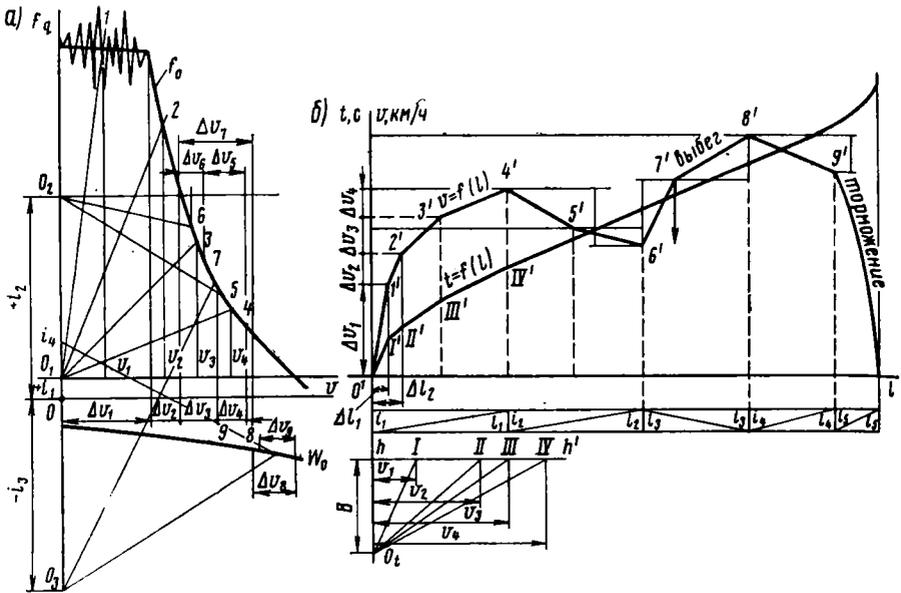


Рис. 211. Построения диаграммы удельных ускоряющих и замедляющих сил (а) и скоростных характеристик (б)

3, 4, соответствующие среднему значению скорости  $v_1, v_2, v_3, v_4$  в принятых интервалах ее изменения  $\Delta v_1, \Delta v_2, \Delta v_3, \Delta v_4$ . Далее из точки  $O'$  начала построения кривой  $v = f(l)$  проводим луч  $O'I'$  параллельно лучу  $O_1I$  (рис. 211, б) до пересечения с горизонтальной прямой, ограничивающей интервал  $\Delta v_1$ . Проекция  $O'I'$  на ось  $l$  даст приращение пути  $\Delta l_1$  в масштабе  $m_1$ . Затем из точки  $I'$  проводим прямую  $I'2'$  параллельно лучу  $O_12$  в пределах интервала  $\Delta v_2$ . Проекция  $I'2'$  на ось  $l$  равна приращению  $\Delta l_2$ . Аналогично находим  $\Delta l_3$  и  $\Delta l_4$ . В точке  $4'$  при скорости  $v_4$  поезд выходит на более крутой подъем  $+i_2$ . Поэтому для дальнейшего построения  $v = f(l)$  необходимо кривую удельной силы тяги рассматривать относительно точки  $O_2$ , находящейся от точки  $O$  на расстоянии  $OO_2 = m_k i_2$ . Опять же по средним значениям скорости в каждом интервале ее изменения находим средние ускоряющие силы  $f_{ср 5}$  и  $f_{ср 6}$  (в данном случае они будут отрицательными) и точки 5, 6 соединяем с новым началом координат  $O_2$ . Построение соответствующих участков кривой скорости (точки  $5'$  и  $6'$ ) выполняем аналогично первому элементу пути. Учитывая, что впереди уклон  $i_3$ , движение под током продолжаем до точки  $7'$ , нахождение которой выполняем по лучу  $O_37'$ . При движении без тока (выбег) сила тяги, развиваемая двигателем, равна нулю, и на поезд действуют только силы сопротивления, в том числе создаваемые профилем пути. В этом случае построение кривой  $v = f(l)$  выполняем по

характеристике  $W_0 = f(v)$  (точки 8 и 9). Построение кривой  $v = f(l)$  на участке торможения проводим после расчета тормозного пути по формуле  $l_T = \frac{v^2}{25,9b}$ . Запишем результаты расчетов:

$v$ , км/ч . . . . .	75	70	65	60	55	50	45	40
$b$ , м/с <sup>2</sup> . . . . .	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1	1
$l_T$ , м . . . . .	362	145	125	106	90	74	60,4	61,7
Продолжение								
$v$ , км/ч . . . . .	35	30	25	20	15	10	5	0
$b$ , м/с <sup>2</sup> . . . . .	1	1	1	1	1	1	1	1
$l_T$ , м . . . . .	47,4	34,5	24	15,3	8,7	3,85	0,96	0

Кривую  $v = f(l)$  по указанным данным на участке торможения строят в обратной последовательности, т. е. начиная от участка, где поезд должен остановиться.

5. Для построения кривой  $t = f(l)$  на оси ординат (см. рис. 211, б) нанесем масштаб времени в пределах интервала движения, а ниже на прямой параллельной оси  $v$  отложим полюсное расстояние  $O_i h = B$ . На горизонтальной прямой  $hh'$  отметим отрезки  $v_1 v_2 \dots$ , равные соответствующим средним значениям скоростей, а полученные точки  $I, II \dots$  соединим с полюсом  $O_i$ . Затем из точки  $O'$  проведем прямую  $O'I'$ , параллельную лучу  $O_i I$  до пересечения с вертикальной прямой, проходящей через конец приращения  $\Delta l_1$ . Далее из полученной точки  $I'$  проведем прямую  $I'I''$  параллельно лучу  $O_i II$  до пересечения с вертикальной прямой, проходящей через конец второго приращения пути  $\Delta l_2$  и т. д.

6. Построение кривой  $I = f(l)$  (рис. 212) выполним, пользуясь кривой  $v = f(l)$  пусковой диаграммы (см. рис. 210) и рабочей характеристикой двигателя (см. рис. 208). При построении кривой  $I = f(l)$  необходимо тщательно отметить такие характерные точки, как переход с последовательного на параллельное соединение двигателей, переход на ослабленное возбуждение и изменение профиля пути.

Из пусковой диаграммы двигателей (см. рис. 210) видно, что до скорости, равной 9,5 км/ч, средний пусковой ток двигателя,

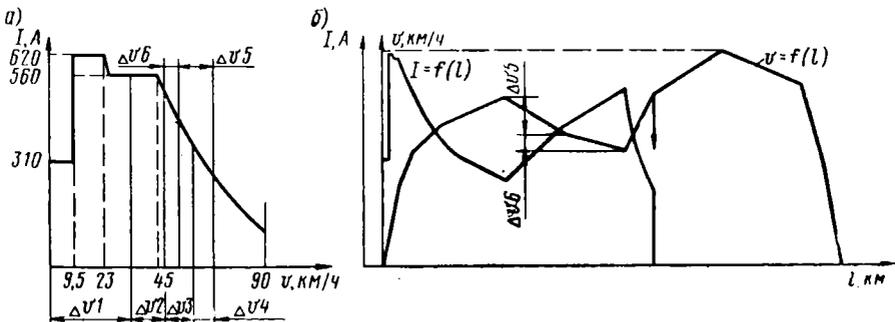


Рис. 212. Построение токовой кривой в зависимости от скорости (а) и от длины пути (б)

а, значит, и всего вагона, равен 310 А (двигатели включены последовательно). Затем происходит их переключение на последовательно-параллельное соединение, и ток, потребляемый вагоном, увеличивается в два раза. Такое положение длится до скорости 23 км/ч, после чего происходит четырехступенчатое ослабление возбуждения до 35%. Скорость возрастает до 45 км/ч, а ток становится равным  $280 \cdot 2 = 560$  А. Последняя позиция (ослабление возбуждения до 35%) при последовательно-параллельном соединении является ходовой.

Кривая  $I = f(t)$  от момента начала пуска до выхода на автоматическую характеристику будет иметь следующие характерные участки. При скорости от 0 до 9,5 км/ч средний ток  $I = 310$  А, после переключения двигателей в две последовательно-параллельные группы ток возрастет до 620 А и будет изображаться горизонтальной прямой до скорости 23 км/ч, когда произойдет ослабление возбуждения двигателей. После этого кривая тока до скорости 45 км/ч будет отражать процесс ослабления возбуждения  $I = 280 \cdot 2 = 560$  А. При скорости 45 км/ч процесс пуска заканчивается, и двигатель выходит на автоматическую характеристику, пользуясь которой выполняют дальнейшее построение кривой  $I = f(t)$  (рис. 212, б). Момент отключения двигателей фиксируется на кривой  $v = f(t)$  вертикальной стрелкой.

Исходные графики и тяговые характеристики задают при номинальном напряжении на токоприемнике поезда  $U_n = 750$  В. В действительности это напряжение может значительно отличаться. Изменение напряжения на токоприемниках вагонов зависит от его отклонений в энергосистеме, питающей тяговые подстанции, от потерь напряжения в тяговой сети и силовом электрооборудовании. Изменения напряжения отражаются на скорости, а следовательно, на времени хода поезда и на расходе электроэнергии. Поэтому при необходимости получения точных данных с учетом действительного напряжения на токоприемнике выполняют пересчет скоростных характеристик. Сначала для последовательного соединения двигателей

$$v_2 = \frac{\frac{U_2}{4} - IR}{\frac{U_1}{4} - IR} v_1,$$

где  $v_1$  и  $v_2$  — скорости соответственно для напряжения  $U_1$  и  $U_2$ ;  $R$  — активное сопротивление обмоток двигателей.

Затем для параллельного соединения двигателей

$$v_2 = \frac{\frac{U_2}{2} - IR}{\frac{U_1}{2} - IR} v_1.$$

Таким образом, если нам известна характеристика  $v = f(I)$  при каком-либо напряжении, то можно выполнить ее пересчет.