

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 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).

Решение.

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; $\delta'' = 0,278$.

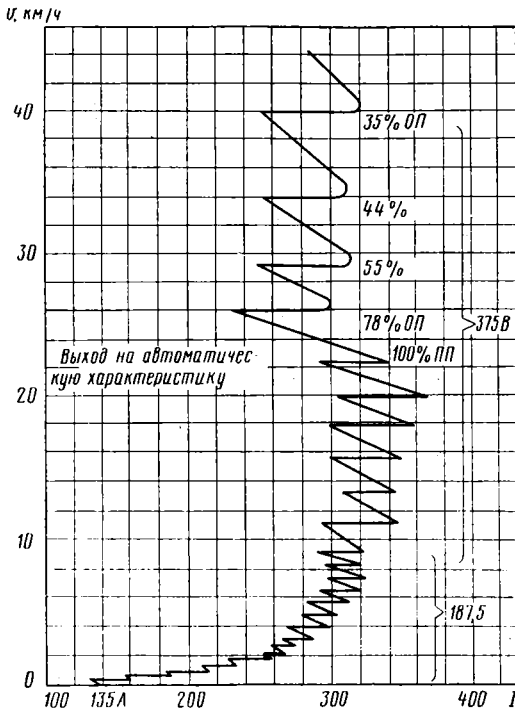


Рис. 210. Пусковая диаграмма двигателя ДК-108А

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,

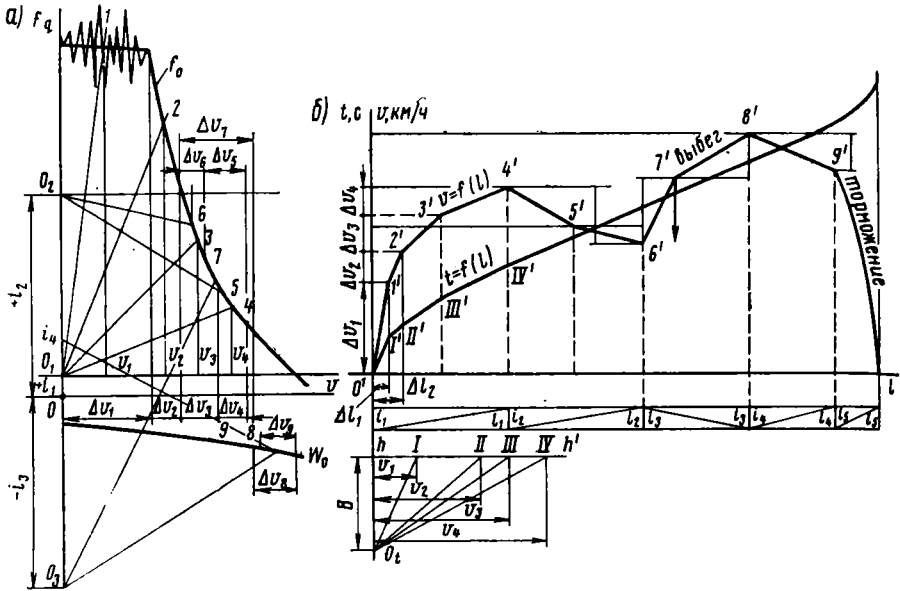


Рис. 211. Построения диаграммы удельных ускоряющих и замедляющих сил (а) и скоростных характеристик (б)

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 Δv_1 . Проекция $O'I'$ на ось l даст приращение пути Δl_1 в масштабе m_1 . Затем из точки I' проводим прямую $I'2'$ параллельно лучу O_12 в пределах интервала Δv_2 . Проекция $I'2'$ на ось l равна приращению Δl_2 . Аналогично находим Δl_3 и Δl_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 (выбер) 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 ²	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 ²	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 Δl_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 Δl_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,

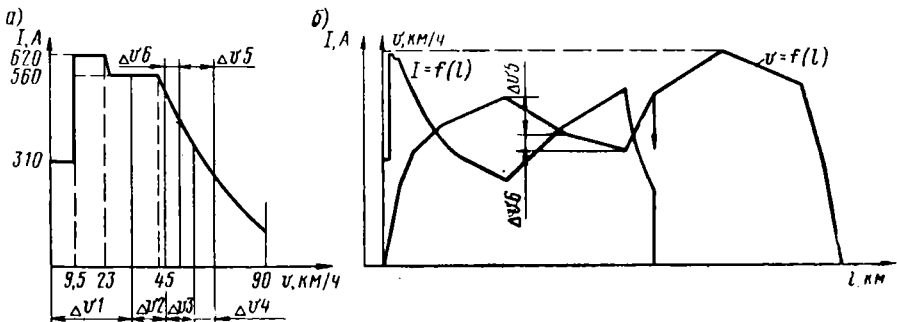


Рис. 212. Построение токовой кривой в зависимости от скорости (а) и от длины пути (б)

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.