

РАСЧЕТ КРИТИЧЕСКОЙ ТАХОГРАММЫ ПОДЪЕМНЫХ УСТАНОВОК С ДИСКОВЫМ ТОРМОЗОМ.

Трибухин В.А., инж., научно-исследовательский институт
горной механики им. М.М. Федорова

Определены аналитические зависимости для расчета и построения критических тахограмм подъемных установок, оснащенных подъемными машинами с дисковыми тормозами.

The analytical dependences for account and construction of the critical diagrams of elevating installations equipped with elevating machines with disk brakes are determined.

Критической тахограммой подъема принято называть зависимость пути предохранительного торможения подъемной установки от начальной критической скорости. Критической называется скорость в момент разрыва цепи защиты, при которой в процессе предохранительного торможения подъемный сосуд остановится в точке, соответствующей допускаемой высоте переподъема или, при наличии жестких посадочных устройств, подойдет к ним с допустимой скоростью.

Общепринятая форма записи критической тахограммы имеет вид [1,2]:

$$h_k = A_k V^2 + B_k V + C_k, \quad (1)$$

где: h_k - путь предохранительного торможения;

V - значение критической скорости предохранительного торможения;
 A_k, B_k, C_k - коэффициенты, определяемые из характеристик тормоза и подъемной установки.

Для подъемных машин с радиальными тормозами характерно плавное нарастание тормозного усилия по близкому к экспоненциальному закону. Выражения для расчета коэффициентов A_k, B_k, C_k в этом случае общеизвестны [1]. Подъемные машины с дисковым тормозом, изготовленные ОАО "Донецкгормаш", имеют дискретную систему управления предохранительным тормозом. Характер нарастания тормозного усилия при этом носит ступенчатый характер. Каждая ступень прикладывается по экспоненциальному закону с высокой интенсивностью (постоянная времени порядка 0,1 с), что подтверждено экспериментальными исследованиями [3]. Известные зависи-

мости для расчета критической тахограммы в этом случае не могут быть использованы.

Цель работы – получение зависимостей для расчета и построения критической тахограммы подъема применительно к подъемным установкам, оснащенным подъемными машинами с дисковыми тормозами.

На рис.1 представлены графики изменения тормозного усилия, скорости и замедления подъемной установки в процессе предохранительного торможения.

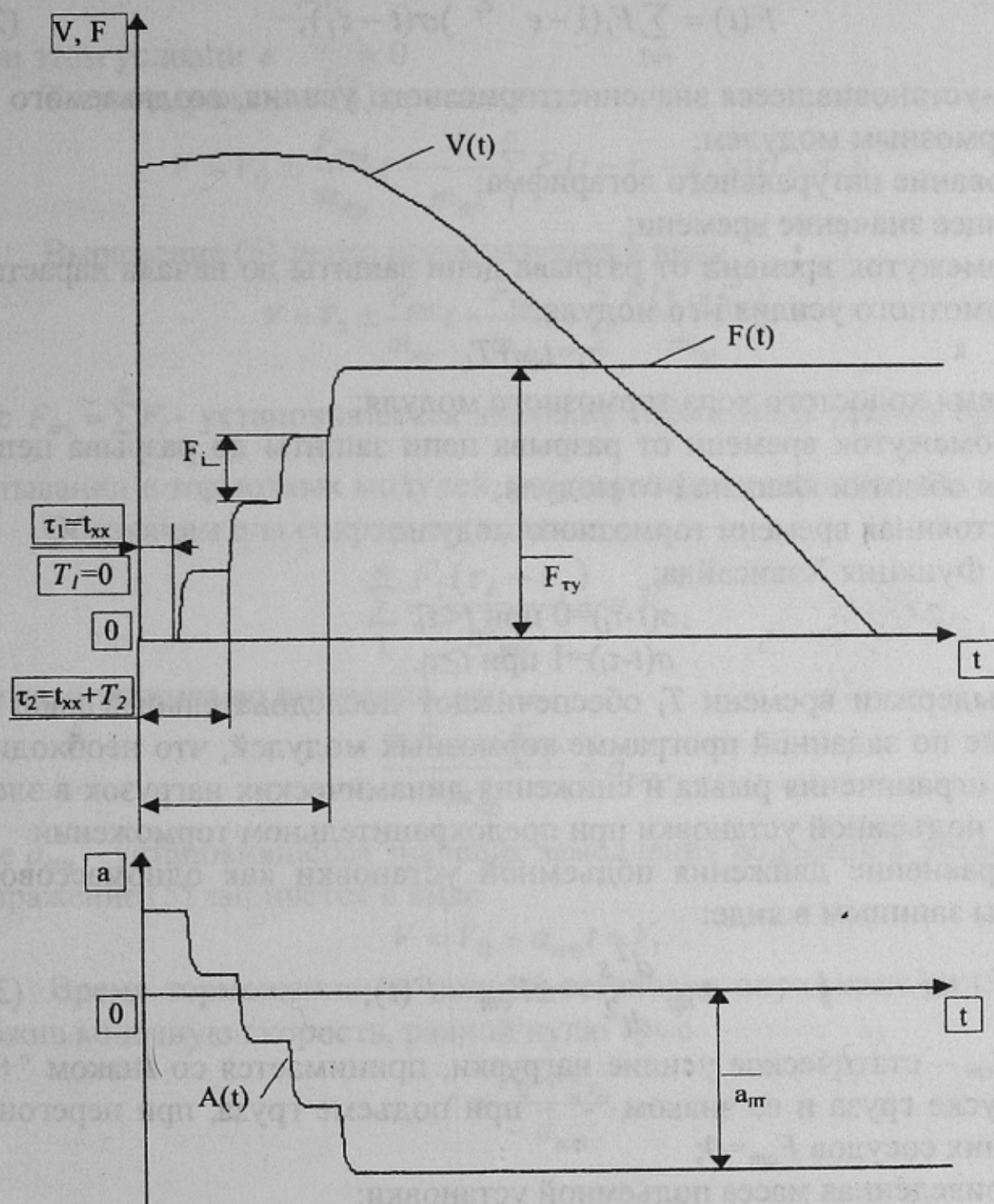


Рис.1. График процесса предохранительного торможения.

тельного торможения при ступенчатом характере изменения тормозного усилия.

Каждый тормозной модуль дискового тормоза (пара приводных элементов, имеющих общий выпускной клапан для слива рабочей жидкости) создает тормозное усилие F_i , определяемое затяжкой пружинных блоков. Текущее значение усилия, создаваемого предохранительным тормозом, может быть найдено следующим образом:

$$F(t) = \sum_{i=1}^{i=n} F_i (1 - e^{-\frac{t-\tau_i}{C_t}}) \sigma(t - \tau_i), \quad (2)$$

где: F_i - установившееся значение тормозного усилия, создаваемого i -тым тормозным модулем;

e - основание натурального логарифма;

t - текущее значение времени;

τ_i - промежуток времени от разрыва цепи защиты до начала нарастания тормозного усилия i -го модуля;

$$\tau_i = t_{xxi} + T_i,$$

t_{xxi} - время холостого хода тормозного модуля;

T_i - промежуток времени от разрыва цепи защиты до разрыва цепи питания обмотки клапана i -го модуля;

C_t - постоянная времени тормозного модуля;

$\sigma(t - \tau_i)$ - Функция Хэвисайда;

$$\sigma(t - \tau_i) = 0 \text{ при } t < \tau_i;$$

$$\sigma(t - \tau_i) = 1 \text{ при } t \geq \tau_i.$$

Выдержки времени T_i обеспечивают последовательный ввод в действие по заданной программе тормозных модулей, что необходимо для ограничения рывка и снижения динамических нагрузок в элементах подъемной установки при предохранительном торможении.

Уравнение движения подъемной установки как одномассовой системы запишем в виде:

$$m_{np} \frac{d^2 S}{dt^2} = \pm F_{cm} - F(t); \quad (3)$$

где - F_{cm} - статическое усилие нагрузки, принимается со знаком "+" при спуске груза и со знаком "-" - при подъеме груза, при перегоне порожних сосудов $F_{cm} = 0$;

m_{np} - приведенная масса подъемной установки;

S - текущее значение пути торможения.

Проинтегрировав (3), получим закон изменения скорости в процессе торможения:

$$V = V_0 \pm \frac{F_{cm}}{m_{np}} t - \frac{1}{m_{np}} \sum_1^n F_i (t + c_t e^{\frac{t-\tau_i}{c_t}} - \tau_i - c_t) \sigma(t - \tau_i) \quad (4)$$

где V_0 – начальная скорость торможения.

При существующих нормативных требованиях к быстродействию предохранительного тормоза (время срабатывания не более 0,8 с), время торможения с начальной скорости более 1 м/с, как правило, превышает время формирования тормозного усилия, т.е. $t \geq \tau_n + 3C_t$.

При этом условии $e^{\frac{t-\tau_i}{c_t}} \approx 0$

Тогда выражение (4) примет вид:

$$V = V_0 \pm \frac{F_{cm}}{m_{np}} t - \frac{1}{m_{np}} \sum_1^n F_i (t - \tau_i - c_t) \sigma(t - \tau_i); \quad (5)$$

Выражение (5) легко преобразуется к виду

$$V = V_0 \pm \frac{F_{cm}}{m_{np}} t - \frac{F_{my}}{m_{np}} t + \sum_1^n \frac{F_i (\tau_i + C_t)}{m_{np}}; \quad (6)$$

где $F_{my} = \sum_1^n F_i$ – установившееся значение тормозного усилия при срабатывании n тормозных модулей, участвующих в торможении.

Обозначим для сокращения записи

$$\sum_1^m \frac{F_i (\tau_i + c_t)}{m_{np}} = V_t, \quad (7)$$

тогда, принимая во внимание, что

$$\frac{\pm F_{cm} - F_{my}}{m_{np}} = a_{nm}, \quad (8)$$

где a_{nm} – установившееся значение замедления подъемной установки, выражение (5) запишется в виде

$$V = V_0 + a_{nm} t + V_t \quad (9)$$

Время торможения до полной остановки определим из (9), положив конечную скорость, равной нулю $V_k = 0$.

$$t = \frac{V_0 + V_t}{-a_{nm}}. \quad (10)$$

Зависимость пути торможения от времени получается путем интегрирования (4)

$$X(t) = V_0 t \pm \frac{F_{cm} t^2}{m_{np} 2} - \frac{1}{m_{np} 1} \sum_{i=1}^n F_i \left[\frac{(t - \tau_i)^2}{2} - c_t (t - \tau_i) - c_t + c_t e^{-\frac{t - \tau_i}{c_t}} \right] \sigma(t - \tau_i) \quad (11)$$

При времени торможения, превышающем время установления тормозного усилия - $t \geq \tau_i + 3C_t$, значение $\sum_{i=1}^n c_t e^{-\frac{t - \tau_i}{c_t}} \approx 0$ и выражение (11) принимает вид

$$X(t) = V_0 t \pm \frac{F_{cm} t^2}{2m_{np}} - \frac{F_{my} t^2}{2m_{np}} + \frac{1}{m_{np} 1} \sum_{i=1}^n F_i (\tau_i + c_t) t - \frac{1}{m_{np} 1} \sum_{i=1}^n F_i \left(\frac{\tau_i^2}{2} + c_t \tau_i + c_t^2 \right) \quad (12).$$

Принимая во внимание (7), (8) и обозначив

$$\frac{1}{m_{np} 1} \sum_{i=1}^n F_i \left(\frac{\tau_i^2}{2} + c_t \tau_i + c_t^2 \right) = \chi_t, \quad (13)$$

запишем (12) в виде

$$X(t) = V_0 t + \frac{a_{nm}}{2} t^2 + V_t t - \chi_t \quad (14)$$

После подстановки в (14) выражения (10) для времени торможения до полной остановки получим зависимость пути торможения от величины начальной скорости

$$X(V_0) = \frac{V_0^2}{-2a_{nm}} + \frac{V_t}{-a_{nm}} V_0 + \frac{V_t^2}{-2a_{nm}} - \chi_t \quad (15)$$

Диаграмма критической скорости в зависимости от конкретных условий рассчитывается либо из условия своевременной остановки подъемных сосудов, либо по условию предотвращения их жесткой посадки. Первое условие записывается в виде [1]

$$V_k = 0$$

$$X \leq X_p + X_n$$

где V_k - конечная скорость торможения установки;

X - путь торможения установки до достижения конечной скорости;

X_p - расстояние от точки ствола, в которой происходит разрыв цепи защиты, до крайнего нормального положения подъемного сосуда;

X_n - максимально допустимая (безаварийная) высота переподъема.

Уравнение критической тахограммы для этого случая получим из выражения (15) с учетом условия (16)

$$h_k = \frac{V_0^2}{-2a_{nm}} + \frac{V_t}{-a_{nm}} V_0 + \frac{V_t^2}{-2a_{nm}} - \chi_t - X_n$$

Обозначив

$$\frac{1}{-2a_{nm}} = A_k; \quad \frac{V_t}{-a_{nm}} = B_k \quad \text{и} \quad \frac{V_t^2}{-2a_{nm}} - \chi_t - X_n = C_{k1}, \quad (17)$$

Запишем уравнение критической тахограммы по условию предотвращения аварийного переподъема сосудов в общепринятом [2] виде

$$h_k = A_k V_0^2 + B_k V_0 + C_{k1}. \quad (19)$$

Условие предотвращения жесткой посадки сосуда имеет вид [1]

$$\begin{aligned} V_k &\leq V_\partial \\ X &\leq X_p \end{aligned} \quad (20)$$

где, V_∂ - допустимая скорость подхода сосудов к нормальному нижнему положению.

Тогда из выражения (15) с учетом (17 и 20) получим уравнение для расчета критической тахограммы по условию предотвращения жесткой посадки

$$h_k = A_k V_0^2 + B_k V + C_{k2}$$

где $C_{k2} = \frac{V_t^2}{-2a_{nm}} - \chi_t + \frac{V_\partial^2}{2a_{nm}}$

Коэффициенты A_k, B_k, C_{k1} и C_{k2} определяются из характеристик тормоза и подъемной установки с учетом (7, 8 и 13) по следующим соотношениям:

$$A_k = \frac{m_{np}}{2(F_{my} \pm F_{cm})}; \quad B_k = \frac{\sum_1^n F_i(\tau_i + c_t)}{F_{my} \pm F_{cm}};$$

$$C_{k1} = \frac{\left[\sum_1^n F_i(\tau_i + C_t) \right] \frac{\sum_1^n F_i \left(\frac{\tau_i^2}{2} + c_t \tau_i + c_t^2 \right)}{m_{np}}}{2m_{np}(F_{my} \pm F_{cm})} - \chi_n$$

$$C_{k2} = \frac{\left[\sum_1^n F_i(\tau_i + C_t) \right] \frac{\sum_1^n F_i \left(\frac{\tau_i^2}{2} + c_t \tau_i + c_t^2 \right)}{m_{np}}}{2m_{np}(F_{my} \pm F_{cm})} - \frac{V_d^2 m_{np}}{2(F_{my} \pm F_{cm})}.$$

Знак "-" соответствует спуску груженого сосуда, знак "+" – подъему. При перегоне порожних сосудов и уравновешенной установке $F_{cm} = 0$.

Расчет критической тахограммы следует производить для режима, в котором замедление при установившейся величине тормозного усилия минимально, а путь торможения максимальный. Этот режим определяется на основании анализа технологических операций, выполняемых подъемной установкой.

Список источников.

1. Мурзин В.А., Решетников В.И., Шатило А.Н., Защита рудничных подъемных установок от превышения скорости. – М.: Недра, 1974 – 174 с.
2. Методика расчета критической, защитной и рабочей тахограмм шахтных подъемных установок; ВНИИГМ им. М.М.Федорова// Г.М. Нечушкин, А.А. Белоцерковский; Утвержд. 4.04.84. А.И. Григорьев (МУП СССР) – Донецк, 1984. – 53с.
3. Шинкаренко Н.А. Трибухин В.А. Лямия Г.С. Экспериментальные исследования характеристик дискового тормоза. Сборник научных трудов. Стационарное оборудование шахт. Донецк, 1987 г., 218 с.