

УДК 622.673

Ерофеева Наталья Валерьевна, доцент, к.т.н.
(КузГТУ, г. Кемерово)

Natalya V. Erofeeva, Associate Professor, Candidate of engineering sciences
(KuzSTU, Kemerovo)

К ВОПРОСУ ПОСТРОЕНИЯ ТАХОГРАММЫ, ГРАФИКОВ УСКОРЕНИЙ И ДВИЖУЩИХ УСИЛИЙ ШАХТНОГО СКИПОВОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО ПОДЪЕМА

ON THE QUESTION OF CONSTRUCTING A TACHOGRAM, ACCELERATION GRAPHS AND GRAPH OF THE DRIVING FORCES OF MINE SKIP VERTICAL LIFTING INSTALLATIONS

Аннотация. Приведена методика расчетов семипериодной тахограммы скиповой подъемной установки и движущих усилий на барабане подъемной машины.

Annotation. The author gave in the article a method for calculating the seven-period tachogram of a skip lifting unit and showed the calculation of the driving forces on the drum of the lifting machine.

В известной методике расчета двухскиповой одноканатной подъемной установки производится расчет основных параметров и выбор подъемного сосуда, каната, шкива, подъемной машины, электропривода, расчет кинематики и динамики подъема [1].

В самом простейшем случае диаграмма изменения скорости (тахограмма) имеет трапециевидную форму, называемая трехпериодной тахограммой [2]. Существуют диаграммы, содержащие большее количество периодов. В источнике [1] подробно описана методика расчета шестипериодной диаграммы и вскользь затронута семипериодная диаграмма. В современной литературе также хорошо описаны пяти- и шестипериодные тахограммы, что в принципе является неверным, поскольку отраслевые нормы технологического проектирования ОНТП 5-86 требуют применение семипериодных тахограмм для шахтного подъема. Согласно временными нормам технологического проектирования ВНТП 1-92 допускается принимать трехпериодную тахограмму подъема, но при условии применения сколов с автономным приводом открывания-закрывания затвора. Так, в источнике [3] описана методика построения трехпериодной тахограммы. Кроме трехпериодной приведены расчеты для пятипериодных тахограмм, хотя в этом же источнике сказано о рекомендации отраслевых норм, в которых для шахтных подъемов следует применять семипериодные тахо-

грамммы. К тому же реальные тахограммы имеют сложный характер, но форма их приближена к семипериодной. Поэтому возникает сложность при проектировании шахтных вертикальных скиповых подъемных установок в соответствии с нормами ОНТП 5–86 и необходимость приведения порядка расчета и построения семипериодных тахограмм, а также движущих усилий на барабане подъемной машине при семипериодной тахограмме.

Каждый период семипериодной тахограммы соответствует следующим моментам: первый – трогание скипа с места, второй – движение скипа в разгрузочных кривых с постоянной скоростью, третий – разгон до максимальной скорости, четвертый – движение с постоянной максимальной скоростью, пятый – торможение до ползучей скорости дотягивания, шестой – движение с постоянной скоростью в кривых, седьмой – стопорение по окончании цикла подъема (рис. 1).

ОНТП 5–86 предъявляет следующие требования к семипериодной тахограмме:

- 1) величина основного ускорения a_1 и замедления a_3 не должна превышать $0,75 \text{ м/с}^2$;
- 2) скорость равномерного движения сосуда на втором V_0 и шестом V_a участках тахограммы следует принимать не более $0,5 \text{ м/с}$;
- 3) ускорение a_0 при трогании с места и замедление a_a при стопорении не должно превышать $0,3 \text{ м/с}^2$;
- 4) суммарный путь $h'_{\text{р кр}}$ движения для первого и второго участков следует принимать для скипов, равным длине разгрузочных кривых $h_{\text{р кр}}$, увеличенной на $0,5 \text{ м}$;
- 5) суммарный путь движения на шестом и седьмом участках следует принимать $h''_{\text{р кр}}$ равным для скипов удвоенной длине кривых $h_{\text{р кр}}$.

Правила безопасности в угольных шахтах определяют максимальную скорость V_{\max} для скипового подъема проектом.

Методика построения семипериодной тахограммы приведена ниже.

Продолжительность (с) периода ускорения в кривых при спуске пустого скипа, и путь (м), пройденный скипом за этот период, определяют по формулам

$$t'_0 = \frac{V_0}{a_0} \quad \text{и} \quad x'_0 = \frac{V_0^2}{2a_0}. \quad (1)$$

Путь (м), пройденный скипом в кривых в период равномерной скорости, и время (с):

$$x''_0 = h'_{\text{р кр}} - x'_0 \quad \text{и} \quad t''_0 = \frac{x''_0}{V_0}. \quad (2)$$

Продолжительность (с) периода замедления в кривых, и путь (м), пройденный скипом за этот период:

$$t'_a = \frac{V_a}{a_a} \quad \text{и} \quad x'_a = \frac{V_a^2}{2a_a}. \quad (3)$$

Путь (м), пройденный скипом в кривых в конце подъемной операции в период равномерной скорости, и время (с) (период дотягивания):

$$x''_a = h''_{\text{п кр}} - x'_a \quad \text{и} \quad t''_a = \frac{x''_a}{V_a}. \quad (4)$$

Продолжительность (с) периодов основного ускорения и замедления:

$$t_1 = \frac{V_{\max} - V_0}{a_1} \quad \text{и} \quad t_3 = \frac{V_{\max} - V_a}{a_3}. \quad (5)$$

Путь (м), пройденный скипом в период основного ускорения и замедления:

$$x_1 = \frac{V_{\max} + V_0}{2} t_1 \quad \text{и} \quad x_3 = \frac{V_{\max} + V_a}{2} t_3. \quad (6)$$

Путь (м), пройденный скипом с максимальной скоростью и продолжительность (с) периода максимальной скорости

$$x_2 = H - (h''_{\text{п кр}} + x_1 + x_3 + h'_{\text{п кр}}) \quad \text{и} \quad t_2 = \frac{x_2}{V_{\max}}. \quad (7)$$

где H – высота подъема, м.

Действительное время (с) подъема

$$T_0 = t'_0 + t''_0 + t_1 + t_2 + t_3 + t''_a + t'_a. \quad (8)$$

Средняя скорость (м/с) подъема

$$V_{\text{cp}} = \frac{H}{T_0}. \quad (9)$$

Продолжительность (с) цикла при длительности паузы θ

$$T_{\Pi} = T_0 + \theta. \quad (10)$$

Для определения движущих усилий на ободе барабана подъемной машины используют динамическое уравнение для двухконцевого вертикального подъема акад. М. М. Федорова [1, 4]

$$F_{\text{дв}} = (KQ - m_k [H - 2x])g \pm \Sigma m'a, \quad (11)$$

где K – коэффициент шахтных сопротивлений (для скиповой подъемной установки равен 1,15); Q – грузоподъемность скипа, кг; m_k – погонная масса одного метра каната, кг/м; g – ускорение свободного падения, м/с²; $\Sigma m'$ – приведенная к окружности барабана масса подъемной установки, кг; x – путь, пройденный сосудом от начала подъема, м; a – ускорение (замедление) подъемного сосуда, м/с².

Приведенную к окружности барабана диаметром D_b массу (кг) подъемной установки определяют как сумму приведенной массы всей системы:

$$\Sigma m' = Q + 2m_{\text{ск}} + 2m_k L_k + m'_b + m'_{\text{рот}} + m'_{\text{ред}} + 2m'_{\text{шк}}, \quad (12)$$

где L_k – полная длина одной ветви подъемного каната, м; m'_b , $m'_{\text{рот}}$, $m'_{\text{ред}}$, $m'_{\text{шк}}$ – приведенная масса соответственно барабана, ротора, редуктора и шкива, кг, $m_{\text{ск}}$ – собственная масса скипа, кг

Полная длина одной ветви подъемного каната [1]

$$L_k = H_0 + \frac{\pi D_{\text{шк}}}{2} + L_{\text{стр}} + n_{\text{тр}} \pi D_b + h_{\text{исп}}, \quad (13)$$

где H_0 – длина отвеса каната при самом нижнем положении скипа в стволе до оси направляющего шкива, м; $n_{\text{тр}} \pi D_b$ – длина витков трения каната количеством $n_{\text{тр}}$, м; $L_{\text{стр}}$ – длина струны, м; $h_{\text{исп}}$ – резервная длина каната, предназначенная для взятия проб на испытание, м; $\frac{\pi D_{\text{шк}}}{2}$ – длина каната, огибающая направляющий шкив диаметром $D_{\text{шк}}$, м.

Приведенная масса (кг) соответственно подъемной машины, направляющего (копрового) шкива и редуктора

$$m'_b = \frac{1}{g} \frac{GD_b^2}{D_b^2}, \quad m'_{\text{шк}} = \frac{1}{g} \frac{GD_{\text{шк}}^2}{D_b^2} \quad \text{и} \quad m'_{\text{ред}} = \frac{1}{g} \frac{GD_{\text{ред}}^2}{D_b^2}, \quad (14)$$

где GD_6^2 , $GD_{шк}^2$, $GD_{ред}^2$ – маховый момент соответственно барабана подъемной машины (без редуктора, двигателя), шкива, редуктора, $\text{Н}\cdot\text{м}^2$.

Приведенная масса (кг) ротора приводного электродвигателя (электродвигателей количеством n) при условии соединения с валом барабана через редуктор

$$m'_{\text{пот}} = n \frac{1}{g} \frac{GD_{\text{пот}}^2}{D_6^2} i^2, \quad (15)$$

где $GD_{\text{пот}}^2$ – маховый момент ротора двигателя, $\text{Н}\cdot\text{м}^2$.

Величину ускорения выбирают из условия максимального использования перегрузочной способности двигателя в период пуска. Определение величин основного ускорения и замедления ($\text{м}/\text{с}^2$) для неуравновешенной системы подъема хорошо описано в методике источника [4].

Движущее усилие (Н) (при соответствующих значениях x и a):
 в начале подъема ($x = 0, a = a_0$)

$$F_1 = (KQ - m_k H)g + \sum m'a_0;$$

в конце периода ускорения – $x = x'_0, a = a_0$

$$F_2 = (KQ - m_k [H - 2x'_0])g + \sum m'a_0;$$

в начале периода равномерной скорости в разгрузочных кривых ($x = x'_0, a = 0$)

$$F_3 = (KQ - m_k [H - 2x'_0])g;$$

в конце периода равномерной скорости в разгрузочных кривых ($x = x'_0 + x''_0, a = 0$)

$$F_4 = (KQ - m_k [H - 2(x'_0 + x''_0)])g;$$

в начале периода нормального ускорения ($x = x'_0 + x''_0, a = a_1$)

$$F_5 = (KQ - m_k [H - 2(x'_0 + x''_0)])g + \sum m'a_1;$$

в конце периода нормального ускорения ($x = x'_0 + x''_0 + x_1, a = a_1$)

$$F_6 = (KQ - m_k [H - 2(x'_0 + x''_0 + x_1)])g + \sum m'a_1;$$

в начале периода равномерной скорости ($x = x'_0 + x''_0 + x_1, a = 0$)

$$F_7 = (KQ - m_k [H - 2(x'_0 + x''_0 + x_1)]) g;$$

в конце периода равномерной скорости ($x = x'_0 + x''_0 + x_1 + x_2, a = 0$)

$$F_8 = (KQ - m_k [H - 2(x'_0 + x''_0 + x_1 + x_2)]) g;$$

в начале периода нормального замедления ($x = x'_0 + x''_0 + x_1 + x_2, a = -a_3$)

$$F_9 = (KQ - m_k [H - 2(x'_0 + x''_0 + x_1 + x_2)]) g - \sum m' a_3;$$

в конце периода нормального замедления ($x = x'_0 + x''_0 + x_1 + x_2 + x_3, a = -a_3$)

$$F_{10} = (KQ - m_k [H - 2(x'_0 + x''_0 + x_1 + x_2 + x_3)]) g - \sum m' a_3;$$

в начале периода равномерной скорости в момент входа в разгрузочные кривые ($x = x'_0 + x''_0 + x_1 + x_2 + x_3, a = 0$)

$$F_{11} = (KQ - m_k [H - 2(x'_0 + x''_0 + x_1 + x_2 + x_3)]) g;$$

в конце периода равномерной скорости в момент входа в разгрузочные кривые ($x = x'_0 + x''_0 + x_1 + x_2 + x_3 + x''_a, a = 0$)

$$F_{12} = (KQ - m_k [H - 2(x'_0 + x''_0 + x_1 + x_2 + x_3 + x''_a)]) g;$$

в начале периода стопорения ($x = x'_0 + x''_0 + x_1 + x_2 + x_3 + x''_a, a = -a_a$)

$$F_{13} = (KQ - m_k [H - 2(x'_0 + x''_0 + x_1 + x_2 + x_3 + x''_a)]) g - \sum m' a_a;$$

в конце подъема ($x = x'_0 + x''_0 + x_1 + x_2 + x_3 + x''_a + x'_a, a = -a_a$)

$$F_{14} = (KQ - m_k [H - 2(x'_0 + x''_0 + x_1 + x_2 + x_3 + x''_a + x'_a)]) g - \sum m' a_a.$$

Эффективное усилие (Н) подъема определяют как

$$F_{\text{эфф}} = \sqrt{\frac{\sum F^2 t}{T_{\text{эфф}}}}, \quad (16)$$

где F и t – соответственно усилие и продолжительность для каждого периода, H и c ; $T_{\text{эфф}}$ – эквивалентная продолжительность цикла, т. е. время, в течение которого двигатель, вращающийся с максимальной скоростью, отдал бы окружающей среде такое же количество тепла, как и за время одного цикла.

Для общего случая семипериодной тахограммы

$$T_{\text{эфф}} = \beta_1(t'_0 + t''_0 + t_1 + t_3 + t'_a + t''_a) + t_2 + \beta_2 \theta, \quad (17)$$

где β_1, β_2 – коэффициенты, учитывающие ухудшение охлаждения двигателя в периоды соответственно неустановившегося движения и во время паузы (для асинхронных двигателей $\beta_1 = 0,5$ и $\beta_2 = 0,25$) [метод].

Величину $F^2 t$ определяют из графика движущих усилий. Для периода с продолжительностью t_2 и прямолинейным изменением усилия от F_7 до F_8 рассчитывают по формуле

$$F^2 t = (F_7^2 + F_7 F_8 + F_8^2) \frac{t_2}{3}. \quad (18)$$

При небольшой разности между усилиями, а также при незначительной продолжительности периода принимают

$$F^2 t = (F_5^2 + F_6^2) \frac{t_1}{2}. \quad (19)$$

Если усилия на участке имеют отрицательные значения, то при расчете $\Sigma F^2 t$ эти участки пропускают (в этих периодах двигатель не нагревается).

Для семипериодной тахограммы обычно характерны отрицательные значения усилий F_9 и F_{10} , тогда

$$\begin{aligned} \Sigma F^2 t = & (F_1^2 + F_2^2) \frac{t'_0}{2} + (F_3^2 + F_4^2) \frac{t''_0}{2} + (F_5^2 + F_6^2) \frac{t_1}{2} + \\ & + (F_7^2 + F_7 F_8 + F_8^2) \frac{t_2}{3} + (F_{11}^2 + F_{12}^2) \frac{t''_a}{2} + (F_{13}^2 + F_{14}^2) \frac{t'_a}{2}. \end{aligned} \quad (20)$$

Эффективная мощность (кВт) подъема

$$P_{\text{эфф}} = \frac{F_{\text{эфф}} V_{\max}}{1000 \eta_p}. \quad (21)$$

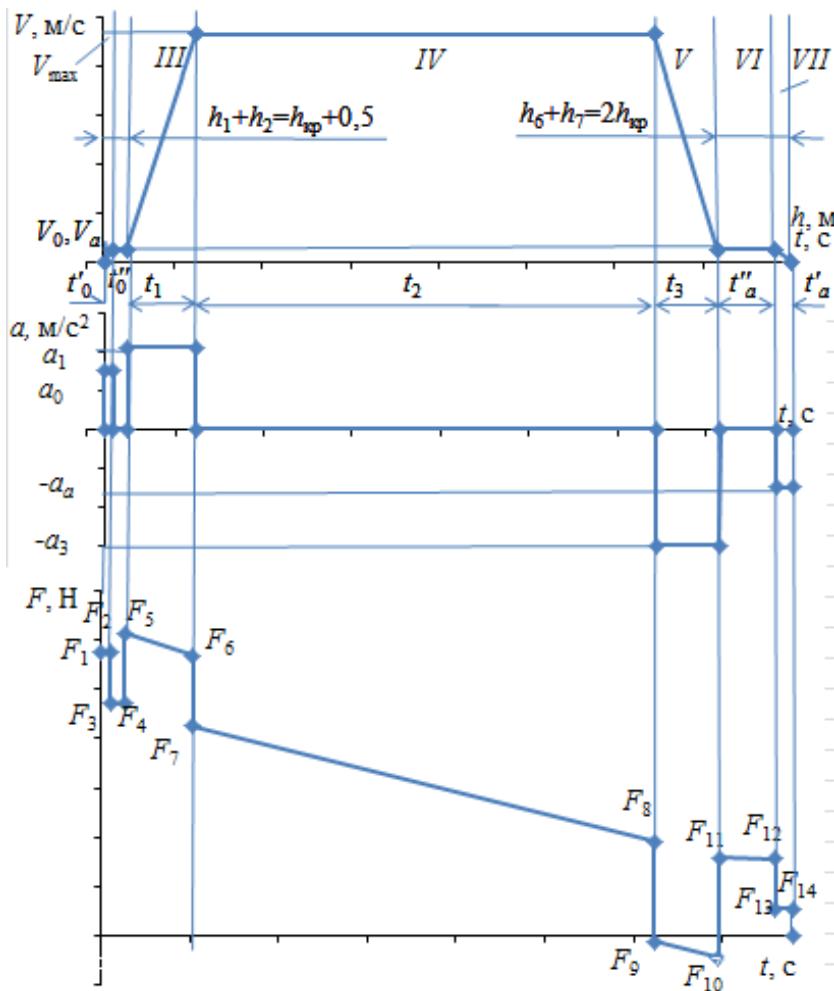


Рис. 1. Графики скорости, ускорений, движущих усилий во времени

Таким образом, используя вышеприведенные зависимости можно определить скорость движения сосуда, его ускорение во времени и рассчитать движущие усилия в каждый период времени, и в конечном счете эффективную мощность подъема, которая не должна превысить установленную.

Список литературы

1. Методика расчета двухскиповой одноканатной подъемной установки. – Москва, 1977. – 89 с.
2. Шахтный подъем : Научно-производственное издание / Бежок В. Р., Дворников В. И., Манец И. Г., Пристром В. А. ; общ. ред. Б. А. Грядущий, В. А. Корсун. – Донецк : ООО «Юго-Восток, Лтд», 2007. – 624 с
3. Методика эксплуатационного расчета шахтного подъема // Стационарные машины : учебник / Уральский государственный горный университет. – Москва : Издательский дом Академии Естествознания, 2017. – С. 236–276.
4. Песвианидзе, А. В. Расчет шахтных подъемных установок : учеб. пособие для вузов / А. В. Песвианидзе. – Москва : Недра, – 1992. – 250 с.