УДК 622.6

DOI: 10.21440/0536-1028-2021-8-55-61

# Эквивалентное усилие привода шахтного подъема при графике скорости в виде трапеции

## Залазинский А. Г.1\*, Двинин Л. А.2, Двинина Л. Б.2

<sup>1</sup> Институт машиноведения УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия <sup>2</sup> Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия \*e-mail: zalaz@list.ru

## Реферат

Введение. Мощность двигателя и эквивалентное усилие на рабочем органе зависят от вида графика скорости. Изучение данной зависимости позволит найти эквивалентные усилия и на основании сравнительной оценки разработать проектные рекомендации по выбору рациональной формы графика. Наиболее широкое распространение получили графики в виде трапеции и параболы. Настоящее исследование посвящено определению эквивалентного усилия при трапециевидном графике скорости.

Методика проведения исследования. Аналитический метод расчета учитывает, что, в отличие от параболического графика скорости, трапециевидный допускает множество скоростей и ускорений не только при различных, но и при постоянных значениях высоты подъема и времени движения, что значительно расширяет возможности для выбора рациональных динамических режимов. Свойство трапеций быть неравнобедренными еще больше расширяет эти возможности. При выводе расчетных зависимостей учтены данные особенности трапециевидного графика.

Результат исследования. Выполнен анализ кинематики сосуда шахтной подъемной установки с трапециевидным графиком скорости движения. Получены формулы, позволяющие без предварительного расчета и построения графиков скорости, ускорений и усилий определить среднеквадратическое и эквивалентное усилия, пригодные для оценки целесообразности использования трапециевидного графика.

Выводы. Применение трапециевидного графика скорости обеспечивает возможность большого выбора энергетически целесообразных динамических режимов, так как эти режимы зависят не только от частоты операций, но и от степени неполноты и коэффициента асимметрии графика. Полученные аналитическим путем кинематические и силовые зависимости позволяют сделать обоснованный выбор графика скорости при проектировании шахтной подъемной установки.

Ключевые слова: шахтная подъемная установка; эквивалентное усилие; среднеквадратическое усилие; скорость подъема; график скорости, трапециевидный график; асимметрия графика скорости.

Введение. Стационарные установки шахт, и в их числе главный подъем, относятся к неотъемлемым компонентам технологического комплекса подземных добывающих предприятий. Рост производительности и добыча с больших глубин предъявляют повышенные требования к подъемным машинам. Их ритмичное и безотказное функционирование обеспечивает бесперебойную выдачу ископаемого на-гора. Надежность и энергоэффективность подъемной установки в большой степени зависят от правильного выбора закона изменения скорости движения сосуда [1–9].

На мощность двигателя и эквивалентное усилие на рабочем органе влияет вид графика скорости (трапеция, парабола, синусоида и др.). Изучение данного влияния позволит найти эквивалентные усилия и на основании сравнительной оценки разработать проектные рекомендации по выбору рациональной формы графика. Наиболее широкое распространение получили графики в виде трапеции и параболы. Настоящее исследование посвящено определению эквивалентного усилия при трапециевидном графике скорости [10–14].

55

ISSN 0536-1028

Методика проведения исследования. В отличие от параболического графика скорости, трапециевидный график (рис. 1) допускает множество скоростей и ускорений не только при различных, но и при постоянных значениях высоты подъема Н и времени движения Т, что значительно расширяет возможности для выбора рациональных динамических режимов.

Свойство трапеций быть неравнобедренными еще больше расширяет эти возможности, что позволяет при выборе ускорений и замедлений строго соблюдать нормативные требования на проектирование [15-18].



Рисунок 1. Трапециевидный график скорости: V<sub>max</sub> - скорость равномерного движения; t<sub>2</sub> - длительность периода max равномерного движения,  $r_2$  равномерного движения Figure 1. Trapezoidalal velocity graph:  $V_{max}$  is uniform velocity;  $t_2$  is the duration of the uniform velocity motion

Для того чтобы ускорения и замедления не выступали как самостоятельные параметры динамических режимов, что усложнило бы исследования, они могут быть заменены одним параметром, так называемым коэффициентом *s* асимметрии графика скорости:

$$s = \frac{t - t_1}{t} = \frac{t_3 - t}{t},$$

где t – текущее время движения;  $t_1$  – время периода ускорения;  $t_3$  – время периода замедления.

Введем обозначения: а – текущее ускорение равнобедренного графика скорости;  $a_1$  – ускорение периода разгона;  $a_3$  – ускорение периода замедления. При значениях  $t > t_1$  будем считать *s* положительным, а при значениях  $t < t_1$  –

отрицательным.

Коэффициент s может быть вычислен следующими способами:

$$s = \pm \frac{t_3 - t_1}{t_3 + t_1} = \pm \frac{a_1 - a_3}{a_1 + a_3} = \pm \frac{a_1 - a}{a_1} = \pm \frac{a - a_3}{a_3}.$$

При постоянных значениях высоты H, максимальной скорости  $V_{\max}$  и времени T изменение периода ускорения  $t_1$  возможно только за счет изменения периода

замедления  $t_3$ , а изменение ускорения  $a_1$  – за счет изменения замедления  $a_3$  и наоборот, как показано на рис. 2.

Время и ускорение с использованием параметра s определяются таким образом:

$$t_1 = (1 \mp s)t;$$
  $t_3 = (1 \pm s)t;$   $a_1 = \frac{a}{1 \mp s};$   $a_3 = \frac{a}{1 \pm s}$ 

Отношения ускорений и времени связаны с коэффициентом асимметрии:

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{t_3}{t_1} = \frac{1 \pm s}{1 \mp s}.$$

На рис. 2 показан график изменения величины  $a_1/a_3$  в зависимости от коэффициента *s*. Видно, что при значениях s = 0,2 и s = 0,333 отношение  $a_1/a_3$  достигает значений 1,5...2,0, а при s = 0,5 становится равным трем.



Рисунок 2. График функции  $a_1/a_3$  (s) Figure 2. Graph of the function  $a_1/a_3$  (s)

Кроме того, график скорости в форме неравнобедренной трапеции при общей степени неполноты α, равной степени неполноты равнобедренного графика скорости и определяемой по выражению

$$\alpha = \frac{V_{\max}T}{H},$$

имеет для левой стороны одну степень неполноты:

$$\alpha_1 = 1 + (\alpha - 1)(1 \mp s),$$

а для правой стороны – другую:

$$\alpha_3 = 1 + (\alpha - 1)(1 \pm s).$$

Между параметрами графиков скорости в виде равнобедренной и неравнобедренной трапеции существует связь, выраженная формулами:

$$a = 0,5(a_1 + a_3); t = 0,5(t_1 + t_3); x = 0,5(x_1 + x_3); a = \frac{2a_1}{a_1 + a_3},$$

где  $x, x_1, x_3$  – перемещение скипа за время  $t, t_1, t_3$  соответственно (рис. 1).

57

Эквивалентное усилие подъема  $F_{2}$  определяется с учетом среднеквадратического усилия и условий охлаждения двигателя по формуле:

$$F_{\rm g} = \frac{F_{\rm cp.\kappa}}{\sqrt{\beta}},$$

где  $F_{\rm cp. \kappa}$  – среднеквадратическое усилие;  $\beta$  – коэффициент, учитывающий условия охлаждения двигателя.

Среднеквадратическое усилие при трапециевидном графике скорости необходимо определить путем вычисления суммы интегралов:

$$F_{\rm cp.\kappa} = \sqrt{\frac{\sum \int F_i^2 dt}{T}},\tag{1}$$

где F<sub>i</sub> – усилие на тяговом органе в пределах участка графика скорости; *i* – номер участка графика (для графика в форме трапеции *i* = 1, 2, 3).

Далее рассмотрен вертикальный статически неуравновешенный подъем без хвостового каната.

Статическое усилие в конце периода разгона

$$F_{\rm cr.1} = F_{\rm cr.c} + pH - p\frac{V_{\rm max}}{2}t_1.$$
 (2)

Статическое усилие в конце периода равномерного движения

$$F_{\rm cr.2} = F_{\rm cr.1} - pV_{\rm max}t_2.$$
 (3)

Статическое усилие в конце периода торможения

$$F_{\rm cr.3} = F_{\rm cr.c} - pH + p\frac{V_{\rm max}}{2}t_3.$$
 (4)

В формулах (2)–(4) F<sub>стс</sub> – постоянная часть статического усилия; *p* – погонный вес головного каната.

Подстановка выражений параметров в числитель формулы (1) и алгебраические преобразования позволяют получить выражение

$$\sum \int F_i^2 dt = \int_0^{t_1} \left( F_{\text{cr.c}} + pH - \frac{p}{2} a_1 t^2 + ma_1 \right)^2 dt + \int_{t_1}^{t_2} \left( F_{\text{cr.1}} - pV_{\text{max}} t \right)^2 dt + \int_{t_2}^{t_2} \left( F_{\text{cr.2}} + \frac{p}{2} a_3 t^2 - ma_3 \right)^2 dt,$$
(5)

где *m* – приведенная масса движущихся частей установки.

Результатом интегрирования выражения (5) является формула

$$\sum \int F_i^2 dt = \left(F_{\text{cr.c}}^2 + p^2 H^2\right) T + m^2 V_{\text{max}}\left(a_1 + a_3\right) + 4pHmV_{\text{max}}\frac{(4-\alpha)}{3}.$$
 (6)

Применительно к уравновешенному подъему члены формулы (6), содержащие *p*, равны нулю, и выражение существенно упрощается:

$$\sum \int F_i^2 dt = F_{\rm cr.c}^2 T + m^2 V_{\rm max} \left( a_1 + a_3 \right).$$

**Результат исследования.** Выполнен анализ кинематики сосуда шахтной подъемной установки с трапециевидным графиком скорости движения. Получены формулы, позволяющие без предварительного расчета и построения графиков скорости, ускорений и усилий вычислить сумму интегралов  $\sum \int F_i^2 dt$  и, следовательно, определить среднеквадратическое и эквивалентное усилия, пригодные для оценки целесообразности использования трапециевидного графика.

**Выводы.** Применение трапециевидного графика скорости обеспечивает возможность большого выбора энергетически целесообразных динамических режимов, так как эти режимы зависят не только от частоты операций, но и от степени неполноты и коэффициента асимметрии графика.

Полученные аналитическим путем кинематические и силовые зависимости позволяют сделать обоснованный выбор графика скорости при проектировании шахтной подъемной установки.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Стационарные установки шахт / под ред. Б. Ф. Братченко. М.: Недра, 1977. 440 с.

2. Федоров М. М. Монтаж и наладка шахтного стационарного оборудования. М.: Недра, 1974. 432 с.

3. Kempson W. J. Designing energy-efficient mineshaft systems // Essays Innovate. 2014. No. 9. P. 76–79.

4. Johansson B., Steinarson A. A new method for automatic reduction of catenary oscillations in drum hoist installations // HOIST & HAUL 2015. 2015. P. 125–139.

5. Townsend B. Control of catenary rope oscillation on a Blair multi-rope winder by unbalancing the load sharing between the hoist ropes // HOIST & HAUL 2015. 2015. P. 43–52.

6. Kratz T., Martens P. N. Optimization of mucking and hoisting operation in conventional shaft sinking // Glückauf. 2015. No. 2. P. 16–22.

7. Копытов А. И., Першин В. В., Вети А. А. Исследование влияния изменения параметров свободного падения скипа на устойчивость предохранительных полков при углубке вертикальных стволов // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 8. С. 133–142. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-8-133-142

8. Островлянчик В. Ю., Поползин И. Ю. Эквивалентная стуктура асинхронного двигателя с двойным питанием с изменением частоты добавочного напряжения для систем электропривода шахтных подъемных установок// Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2019. № 5. С. 302–307.

9. Ostrovlyanchik V. Yu., Popolzin I. Yu. Equivalent structure of a double-fed induction motor with a change in frequency of additional voltage for electric systems of mine winders // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 377. 012041. 9 p.

 Двинина Л. Б., Двинин Л. А., Ляпцев С. А. Типовые диаграммы подобия при расчете и анализе переходных режимов шахтных подъемных установок // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: матер. Четвертой междунар. науч.-техн. конф. 15–17 мая 2006. Екатеринбург: УГГУ, 2006. С. 160–163.
 11. Тимухин С. А., Плотников А. М., Дмитриев Д. С. К вопросу обоснования скоростей движения

11. Тимухин С. А., Плотников А. М., Дмитриев Д. С. К вопросу обоснования скоростей движения подъемных сосудов комплексов шахтного подъема // Известия Уральского государственного горного университета. 2016. № 4(44). С. 60–62.

12. Католиков В. Е., Динкель А. Д. Динамические режимы рудничного подъема. М.: Недра, 1995. 448 с.

13. Еланчик Г. М. Выбор оптимальных параметров проектируемых шахтных подъемных установок с двигателями постоянного тока. М.: МГИ, 1971. 91 с.

14. Воробель С. В., Трифанов Г. Д. Влияние диаграммы скорости на динамические нагрузки в системе «подъемный сосуд–жесткая армировка» и деформацию рамы подъемного сосуда // Горное оборудование и электромеханика. 2011. № 12. С. 16–19.

15. Двинина Л. Б., Двинин Л. А., Ляпцев С. А. Выбор динамического режима шахтных подъемных установок по скорости подъема // Математическое моделирование механических явлений: матер. науч.-техн. конф. 10–11 апреля 2008. Екатеринбург: УГГУ, 2008. С. 268–274.

16. Кирпичев М. В. Теория подобия. М.: АН СССР, 1953. 96 с.

17. Седов Л. И. Методы подобия и размерностей в механике. М.: Наука, 1981. 282 с.

18. Двинина Л. Б., Двинин Л. А., Ляпцев С. А. Критерии подобия динамических режимов шахтного подъема // Нетрадиционные технологии и оборудование для разработки сложно-структурных месторождений полезных ископаемых: матер. Второй междунар. науч.-техн. конф. 15–17 февраля 2005. Екатеринбург: УГГУ, 2005. С. 83–87.

#### Сведения об авторах:

Залазинский Александр Георгиевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории системного моделирования Института машиноведения YpO PAH. E-mail: zalaz@list.ru; https://orcid.org/0000-0001-8352-5475

Двинин Леонид Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технической механики Уральского государственного горного университета. E-mail: leonid.dvinin@m.ursmu.ru Двинина Людмила Борисовна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технической механики Уральского государственного горного университета. E-mail: lyudmila.dvinina@m.ursmu.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2021-8-55-61

## Equivalent force of winder drive at a trapezoidal velocity graph

Aleksandr G. Zalazinskii<sup>1</sup>, Leonid A. Dvinin<sup>2</sup>, Liudmila B. Dvinina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Engineering Science UB RAS, Ekaterinburg, Russia.

<sup>2</sup> Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

#### Abstract

Introduction. Working element engine power and equivalent force depend on the velocity graph type. By studying this curve, it will be possible to find equivalent forces and, based on the comparative estimation, develop design recommendations for choosing the graph's efficient shape. Trapezoidal and parabola graphs are most common. This research determines the equivalent force at a trapezoidal velocity graph.

**Methods of research**. The analytic calculation takes into account that the trapezoidal graph allows many velocities and accelerations not only at different, but also at constant values of the rise and travel time, whereas the parabola velocity graph does not. It greatly widens the possibilities for efficient dynamic modes selection. The non-isosceles property of a trapezoidal widens the possibilities still greater. The indicated properties of the trapezoidal graph were taken into account when deriving the estimated dependencies.

**Research result**. The kinematics of the mine winder vessel with a trapezoidal velocity graph is analyzed. Formulas have been obtained that allow to determine the root-mean-square and equivalent effort, suited for feasibility estimation a trapezoidal graph, without preliminary calculation and graphs of velocity, acceleration and force.

**Conclusions.** The trapezoidal velocity graph provides the possibility of a large choice of energetically expedient dynamic modes, since these modes depend not only on the frequency of operations, but also on graph's degree of incompleteness and asymmetry coefficient. The kinematic and force dependencies obtained analytically make it possible to make a reasonable choice of the velocity graph when designing a mine winder.

Keywords: mine winder; equivalent force; root mean square force; hoisting speed; velocity graph; trapezoidal graph; velocity graph asymmetry.

#### REFERENCES

1. Bratchenko B. F. (ed.) Stationary plants in shafts. Moscow: Nedra Publishing; 1977. (In Russ.)

2. Fedorov M. M. Installation and setup of stationary plants in shafts. Moscow: Nedra Publishing; 1974. (In Russ.)

3. Kempson W. J. Designing energy-efficient mineshaft systems. Essays Innovate. 2014; 9: 76–79.

4. Johansson B., Steinarson A. A new method for automatic reduction of catenary oscillations in drum hoist installations. HOIST & HAUL 2015. 2015. P. 125-139.

5. Townsend B. Control of catenary rope oscillation on a Blair multi-rope winder by unbalancing the

load sharing between the hoist ropes. HOIST & HAUL 2015. 2015. P. 43–52.
Kratz T., Martens P. N. Optimization of mucking and hoisting operation in conventional shaft sinking. Glückauf. 2015; 2: 16–22.

7. Kopytov A. I., Pershin V. V., Veti A. A. Research on free fall skip parameters variation impact on pentice stability when sinking vertical shafts. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal. 2019; 8: 133–142. Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2019-8-133-142

8. Ostrovlianchik V. Iu., Popolzin I. Iu. Equivalent structure of a double-fed asynchronous motor with a change in frequency of additional voltage for electric systems of mine winders. In: High technology in mineral resources development and utilization. 2019; 5: 302-307. (In Russ.)

9. Ostrovlianchik V. Iu., Popolzin I. Iu. Equivalent structure of a double-fed induction motor with a change in frequency of additional voltage for electric systems of mine winders. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 377(012041): 9 p. 10. Dvinina L. B., Dvinin L. A., Liaptsev S. A. Type plots of similarity when calculating and analyzing transient modes of mine winders. In: *Technological Equipment for Mining and Oil and Gas* 

Industry: Proceedings of the 4th Internat. Scient. and tech. Conf, 15-17 May 2006. Ekaterinburg: UrSMU Publishing; 2006. p. 160–163. (In Russ)

11. Timukhin S. A., Plotnikov A. M., Dmitriev D. S. On the question of substantiating the movement speeds of conveyances of hoisting complexes. Izvestiia Uralskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta = News of the Ural State Mining University. 2016; 4(44): 60–62. (In Russ.)

12. Katolikov V. E., Dinkel A. D. Dynamic modes of mine hoist. Moscow: Nedra Publishing; 1995. (In Russ.)

13. Elanchik G. M. Choosing the optimal parameters for the designed mine winders with the direct current motors. Moscow: MSI Publishing; 1971. (In Russ.)

14. Vorobel S. V., Trifanov G. D. Research of the influence of velocity diagram parameters on the dynamic loads and skip frame deformation in the dynamical system "shaft skip-shaft furniture". Gornoe oborudovanie i elektromekhanika = Mining Equipment and Electromechanics. 2011; 12: 16–19. (In Russ.)

15. Dvinina L. B., Dvinin L. A., Liaptsev S. A. Choosing the dynamic mode for mine winders according to the hoist speed. In: Mathematical Modelling of Mechanical Events: Proceedings of the Scient. and Tech. Conf., 10–11 April 2008. Ekaterinburg: UrSMU Publishing; 2008. p. 268–274. (In Russ.)
 16. Kirpichev M. V. Similarity theory. Moscow: AS USSR Publishing; 1953. (In Russ.)

17. Sedov L. I. Methods of similarity and dimensions in mechanics. Moscow: Nauka Publishing; 1981. (In Russ.)

18. Dvinina L. B., Dvinin L. A., Liaptsev S. A. The criteria of similarity for the dynamic modes of a mine winder. In: Unconventional Technologies and Equipment to Develop the Deposits with a Complex Structure: Proceedings of the 2nd Internat. Scient. and Tech. Conf., 15–17 February 2005. Ekaterinburg: UrSMU Publishing; 2005. p. 83–87. (In Russ.)

Received 9 November 2021

#### Information about authors:

Aleksandr G. Zalazinskii - DSc (Engineering), Professor, chief researcher, Laboratory of System Modelling, Institute of Engineering Science UB RAS. E-mail: zalaz@list.ru; https://orcid.org/0000-0001-8352-5475

Leonid A. Dvinin - PhD (Engineering), Associate Professor, associate professor of the Department of Engineering Mechanics, Ural State Mining University. E-mail: leonid.dvinin@m.ursmu.ru

Liudmila B. Dvinina – PhD (Engineering), Associate Professor, associate professor of the Department of Engineering Mechanics, Ural State Mining University. E-mail: lyudmila.dvinina@m.ursmu.ru

Для цитирования: Залазинский А. Г., Двинин Л. А., Двинина Л. Б. Эквивалентное усилие привода шахтного подъема при графике скорости в виде трапеции // Известия вузов. Горный журнал. 2021. № 8. C. 55–61. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-8-55-61

For citation: Zalazinskii A. G., Dvinin L. A., Dvinina L. B. Equivalent force of winder drive at a trapezoidal velocity graph. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii = Minerals and Mining Engineering. 2021; 8: 55-61 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2021-8-55-61