

## ВОПРОСЫ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ В ОБЛАСТИ РУДНИЧНОГО ПОДЪЕМА

<sup>1</sup>Ляпцев С.А., <sup>1</sup>Двинин Л.А., <sup>1</sup>Двинина Л.Б.

*<sup>1</sup>ГОБУ ВПО «Уральский государственный горный университет», Екатеринбург, Россия (620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30), e-mail: [gmf.tm@m.ursmu.ru](mailto:gmf.tm@m.ursmu.ru)*

**В данной статье предложена методика выбора рациональных динамических режимов рудничных подъемных установок, отличающаяся от применяемых в настоящее время методик тем, что наиболее полно учитывает многообразие основных и сопутствующих факторов, возникающих при переходных процессах подъемных электромеханических систем. Основные законы динамики, сформулированные в 80-х годах XVII века Ньютоном, более 300 лет являются теоретической базой для расчета машин, в том числе шахтных подъемных установок. Трактовка основных законов Ньютона в детерминированном виде приводит к тому, что возможности динамических режимов подъема используются не в полном объеме. Приведенная ниже уточненная методика выбора динамических режимов подъема базируется на теории подобия, что позволяет на основании разработанных уравнений и номограмм подобия достоверно оценить динамику нагружения с учетом комплекса важнейших параметров и показателей и на основании этого выбрать рациональный режим.**

Ключевые слова: шахтный и рудничный подъем, подъемная установка, динамические режимы подъемной установки, основное уравнение динамики, критериальное уравнение динамики, критерии подобия, номограммы подобия, импульс силы, импульсное ускорение, массивность подъемной установки.

## QUESTIONS OF THE THEORY OF SIMILARITY RISE OF MINE

<sup>1</sup>Lyptsev S.A., <sup>1</sup>Dvinin L.A., <sup>1</sup>Dvinina L.B.

*<sup>1</sup>Ural state mining University, Yekaterinburg, Russia (620144, Yekaterinburg, Kuybysheva street, 30), e-mail: [gmf.tm@m.ursmu.ru](mailto:gmf.tm@m.ursmu.ru)*

**In this paper we propose a methodology of rational choice dynamic regimes mine hoisting plants, different from the currently used techniques that fully takes into consideration the diversity of primary and secondary factors arising from transient lifting Electromechanical systems. The basic laws of dynamics, formulated in the 80-ies of the XVII century by Newton, more than 300 years are the theoretical basis for calculating machines, including mine hoisting plants. The interpretation of the basic laws of Newton in a determined form leads to the fact that the dynamic modes of ascent are not used in full. Below clarified the method of selection of the dynamic modes of ascent is based on the theory of similarity, which allows on the basis of the developed equations and nomograms similarity to reliably assess the dynamics of loading taking into account the most important parameters and indicators, and then to choose a rational mode.**

Keywords: mine and mine hoist, lift installation, dynamic modes of a hoist, the basic equation of dynamics, criteria-based dynamic equation, similarity criteria, nomograms similarity, pulse strength, pulse acceleration, the massiveness of the hoisting unit.

Подъемные установки шахт и рудников являются наиболее сложными и энергоемкими объектами в общей технологической цепи транспортировки полезных ископаемых. Существующие методики выбора динамических режимов шахтных подъемных установок ограничивают возможности достоверной оценки этих режимов, что приводит к низкой производительности установок, повышенному расходу энергии, неоправданно большим капитальным затратам на шахтный подъем. Это связано с тем, что [1; 2]:

во-первых, рекомендации на проектирование даются не по всему комплексу параметров и показателей, а по отдельным признакам, например по весу полезного груза, по скорости движения, с учетом динамической постоянной подъема, по времени движения

и т.д., причем наблюдается большой диапазон значений вышеуказанных рекомендаций у различных авторов;

во-вторых, существуют различные подходы при определении константы динамического режима и коэффициента массивности установки;

в-третьих, величина, названная механической постоянной времени движения при исследованиях переходных некруговых процессов, некритично используется для исследования замкнутых круговых процессов шахтного подъема;

в-четвертых, существующие методики проектирования динамических режимов базируются на абсолютной системе единиц без учета относительных безразмерных параметров и показателей, поэтому не приняты во внимание такие важные характеристики, как импульс действующей силы, импульсное ускорение подъема, относительная скорость движения, относительное ускорение, относительное время движения.

Теоретический анализ динамических режимов подъема весьма трудоемок и требует проведения большого объема экспериментальных исследований. Вместе с тем параметры, определяющие динамику подъема, входят в основные зависимости в составе большого числа параметрических комплексов. Представляется возможным рассматривать основополагающие параметры в виде критериальных комплексов, называемых критериями подобия. Построенные зависимости в виде безразмерных комплексов позволяют предсказать результаты эксперимента, а также проводить исследования на основе моделирования изучаемых явлений. Указанные методы значительно сокращают объемы проектных расчетов, т.к. позволяют оценивать параметры в комплексе в соответствии с критериальными уравнениями, описывающими переходные процессы рудничного подъема.

Так, например, основное уравнение шахтного подъема в критериальной форме имеет вид [1]:

$$f = 1 + \delta_x \left( 1 + \frac{2x}{H} \right) \pm \gamma, \quad (1)$$

где  $f$  – относительное усилие на ободу подъемного барабана.

При этом

$$f = \frac{F}{F_{cm.c}}, \quad (2)$$

где  $F$  – усилие на ободе подъемного барабана;  $F_{ст.с}$  – постоянная составляющая статического усилия;  $\delta_x$  – статическая неуравновешенность подъема на данном участке пути;  $H$  – вертикальная высота подъема;  $x$  – текущее значение пути движения;  $\gamma$  – относительное ускорение.

Критериями подобия, входящими в это уравнение, являются безразмерные величины: статическая неуравновешенность подъема на данном участке пути  $\delta_x$ , относительное ускорение  $\gamma$ .

В исследованиях [1] за критерии подобия также приняты множитель скорости  $\alpha$ ; относительное время движения  $\tau$ ; коэффициент асимметрии графика скорости  $s$ ; коэффициент  $\beta$ , учитывающий условия охлаждения двигателя.

В сходственных точках подобных динамических процессов (например, реальный и модельный) данные критерии имеют одно и то же значение и характеризуют подъемную установку как единую электромеханическую систему.

Применяя анализ построенных зависимостей между критериями подобия на основе номограмм подобия, можно не только установить вклад каждого из этих параметров в динамические характеристики подъема, но и получить величины их предельных значений, что необходимо при выборе рационального динамического режима как по энергетическим, так и другим показателям.

Существующие методики проектирования динамических режимов рудничных подъемных установок [5-7] позволяют определить условные минимумы эквивалентных значений усилия и мощности при постоянной массе перемещаемого груза и переменной производительности. При таком подходе остаются неизвестными многие экстремальные показатели переходных режимов, существенно влияющие на эффективность работы рудничного подъема.

Динамический режим электропривода рудничного подъема и других аналогичных электроприводов повторно-кратковременного действия имеет ряд условных и безусловных экстремумов показателей, влияющих на расход энергии, нагрев двигателя, производительность и размеры оборудования [3; 4].

Определить указанные экстремумы динамических режимов возможно, если исследования проводить на основе теории подобия в двух направлениях:

- при постоянном весе груза и переменной производительности;
- при переменном весе груза и постоянной (заданной) производительности подъемной установки.

Такой подход позволил установить:

1) условный минимум эквивалентной мощности  $\rho_Q$ , условный минимум эквивалентного усилия  $\rho_{\rho}$ , безусловный минимум одноразовых тепловых потерь в двигателе  $\Delta q_1$  в условиях постоянного веса груза ( $Q = const$ ) и переменной производительности ( $A = var$ ) (рис. 1);

2) безусловный минимум относительной мощности  $\rho^1$ , относительные часовые потери тепла в двигателе  $\Delta q_{\text{час}}$ , минимум относительного эквивалентного усилия  $\rho_{\rho}^1$ , минимум импульса эквивалентного усилия  $S_{\rho}^1$  в условиях переменного груза ( $Q = var$ ) и постоянной (заданной) производительности подъемной установки ( $A = const$ ).

Указанные показатели позволили на основе критериальных номограмм подобия определить области наивысших КПД при механическом торможении подъемных установок: КПД потерь избытка кинетической энергии при механическом торможении  $\eta_2$  (рис. 2); КПД суммы реостатных потерь энергии в период ускорения и потерь избытка кинетической энергии при механическом торможении  $\eta_{1+2}$ .

Электромеханические процессы шахтного подъема могут быть представлены импульсами сил при разгоне, установившемся движении и торможении, а также импульсным ускорением подъема, импульсным коэффициентом массивности установки, относительной скоростью, относительным временем движения и относительным ускорением подъема [1; 2].

В уравнении импульса действующей силы учитывается время действия силы:

$$f = \frac{F}{F_{\text{см.с}}} . \quad (3)$$

В этом случае импульс движущего усилия

$$\bar{S} = \bar{S}_1 + \bar{S}_2 + \bar{S}_3 , \quad (4)$$

где  $\bar{S}_1$  – импульс движущего усилия при разгоне;  $\bar{S}_2$  – импульс движущего усилия при равномерном движении;  $\bar{S}_3$  – импульс движущего усилия при торможении.

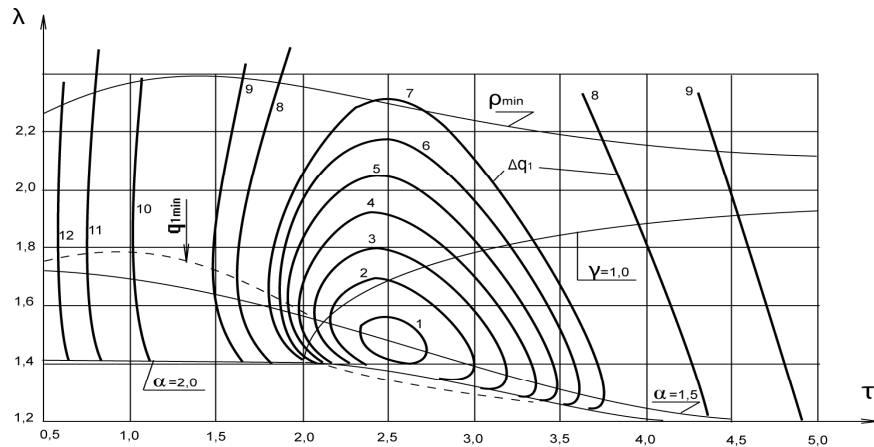


Рис.1. Номограмма изолиний одноразовых потерь тепла  $\Delta q_1$  при постоянном весе груза  $Q = const$  и переменной производительности  $A = var$  для режимов с механическим торможением

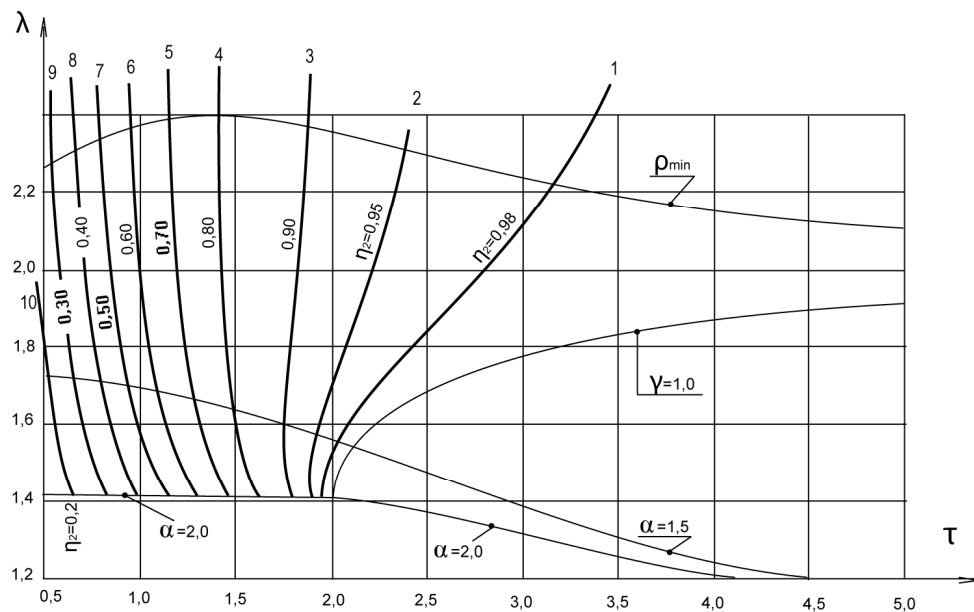


Рис. 2. Номограмма изолиний КПД  $\eta_2$ , учитывающего потерю кинетической энергии при механическом торможении

Импульсный характер переходных режимов исследован при различной степени уравновешенности подъемной установки, т.е. для случаев статически уравновешенной, неуравновешенной и переуравновешенной установок.

При различных графиках скорости возможны еще три вида минимумов импульса движущего усилия:

- 1) минимум импульса среднеквадратичного усилия;
- 2) минимум импульса эквивалентного усилия;
- 3) минимум импульсов сил, формирующихся за счет скорости вращения вала двигателя.

Выбор режимов по минимумам импульсов среднеквадратичного и эквивалентного усилий обеспечивает рациональные показатели динамических режимов, такие как безусловный минимум эквивалентного усилия, безусловный максимум относительной производительности установки, снижение габаритов, веса и расхода электроэнергии.

Выбор режимов по минимуму импульсов сил, формирующихся за счет скорости вращения вала двигателя, возможен не только для любого графика скорости, но и для любой заданной частоты операций.

Номограммы подобия построены на основе критериев подобия для динамических режимов всех видов шахтных подъемных установок – вертикальных, наклонных, уравновешенных, неуравновешенных, с равнобедренными и неравнобедренными графиками скорости, с механическим и электрическим торможением и т.д.

Поскольку номограммы подобия построены по безразмерным показателям, выраженным в относительных единицах, то, проведя простой перерасчет этих показателей в абсолютные единицы, можно выбрать требуемый рациональный динамический режим.

По номограммам подобия выбор динамического режима осуществляется визуально и не по одному какому-либо доминирующему признаку (весу груза, скорости подъема и т.д.), как это традиционно делается, а по всему комплексу критериев, установленных по данным параметрам и показателям.

Таким образом, методы подобия, реализованные в виде номограмм подобия, эффективно решают задачи выбора рациональных режимов работы рудничных подъемных установок.

### **Список литературы**

1. Двинаина Л.Б. Обоснование динамических режимов при проектировании шахтных подъемных установок : дис. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург : Изд-во УГГУ, 2008. - 150 с.
2. Двинин Л.А., Двинаина Л.Б., Ляпцев С.А. Теоретическое определение импульсов усилий шахтных подъемных установок // Изв. вузов. Горный журнал. - 2006. - № 6. - С. 139–146.
3. Двинин Л.А., Двинаина Л.Б., Ляпцев С.А. Показатели динамического режима шахтного подъема // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : материалы Междунар. научно-технической конференции. – Екатеринбург : Изд-во УГГУ, 2009. - С. 249–252.
4. Двинин Л.А. Повышение эффективности работы рудничных подъемных установок : дис. канд. техн. наук. – Екатеринбург : Изд-во УГГУ, 2013. - 140 с.

5. Еланчик Г.М. Выбор оптимальных параметров проектируемых шахтных подъемных установок с двигателями постоянного тока. - М. : МГИ, 1971. - 91 с.
6. Седов Л.И. Методы подобия и размерностей в механике. - М. : Наука, 1981. - 282 с.
7. Федоров М.М. Шахтные подъемные установки. - М. : Недра, 1979. - 309 с.

**Рецензенты:**

Герц Э.Ф., д.т.н., профессор, декан лесоинженерного факультета ФГБОУ ВПО «Уральский государственный лесотехнический университет» Министерства образования и науки Российской Федерации, г. Екатеринбург;

Кожушко Г.Г., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой подъемно-транспортных машин и роботов ММИ ФГОАУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.