

СНИЖЕНИЕ РАСХОДА ЭНЕРГИИ НЕУРАВНОВЕШЕННЫХ ЛИФТОВЫХ СИСТЕМ

С.А. Каимов

kaimovsaid@mail.ru

SPIN-код: 8798-9771

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрены актуальные вопросы снижения экономичности грузоподъемных машин (ГПМ). Критерий экономичности ГПМ оценен с помощью комплексных удельных показателей, позволяющих определять связь динамических характеристик машин и энергетических затрат. Расчет комплексного удельного показателя показан на основе простой неуравновешенной лифтовой системы. Определена зависимость удельной затрачиваемой мощности при подъеме груза от отношения веса кабины к весу груза. Также рассмотрены математические модели уравновешенных с помощью противовесов подъемно-транспортных машин (ПТМ), анализ которых показывает возможности снижения их энергопотребления. Даны рекомендации по обеспечению минимизации общего расхода энергии на спуске и подъеме ГПМ.

Ключевые слова

Подъемно-транспортные машины, экономичность грузоподъемных машин, соотношение веса кабины и груза, вес уравновешивающего противовеса, мощность двигателя лифтовой системы, расчет мощности шахтного лифта, уравновешивание лифтовой системы, схема шахтного подъемника

Поступила в редакцию 23.03.2020

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020

Значительную часть времени грузоподъемные машины (ГПМ) работают с переменной нагрузкой, различной на подъеме и спуске. Несомненно, что причинами снижения экономичности ГПМ являются изменение нагрузки на режимах подъема и спуска, на которых отклонения нагрузки от оптимального значений вызывает нерасчетные изменения мощности двигателя и скорости движения, что и вызывают рост потерь энергии. Другой причиной роста потерь энергии при работе подъемно-транспортных машин (ПТМ) является процесс принудительного торможения при необходимости их остановки.

Анализ характеристик современных зарубежных ГПМ показывает, что удельные расходы энергии у них почти на 30 % ниже, чем у отечественных, что достигается часто рекуперацией энергии торможения благодаря применению частотно-регулируемого электропривода и оптимальному выбору мощности основного двигателя [1]. Значительными преимуществами обладают уравновешенные машины, имеющие высокие надежность и срок службы.

Сравнение многочисленных известных критериев качества строительно-дорожных машин показывает, что наиболее полно оценивать их можно с помощью комплексных удельных показателей [2], позволяющих выявить связь между динамическими характеристиками и экономичностью расхода энергии,

одновременно учитывая мощность установленного двигателя, время разгона и расход энергии. Рассмотрим коэффициент мощности двигателя:

$$k_p = \frac{P_p}{P_d}, \quad (*)$$

где P_d — мощность установленного двигателя; P_p — требуемая расчетная мощность при подъеме или опускании груза.

Уравновешивание ГПМ может быть частичным и может служить для выравнивания нагрузок на режимах подъема и спуска груза и расчета минимальной необходимой мощности при движении груза с постоянной скоростью:

$$P_p = (V \times G_{гр}) \cos \vartheta,$$

где V — средняя скорость подъема груза; $G_{гр}$ — типовой вес поднимаемого груза; ϑ — угол давления между векторами действующей силы и скорости точки ее приложения.

Поскольку значение расчетной требуемой для движения с постоянной скоростью мощности может иметь как положительное, так и отрицательное значения, комплексный удельный показатель может принимать отрицательное значение при потреблении двигателем энергии и положительное значение при работе его в качестве генератора энергии [2, 3]. Таким образом, комплексный удельный показатель в виде (*) не является критерием экономичности в явном виде, однако при рассмотрении вариантов одной и той же машины его удобно использовать для косвенной оценки экономичности проектируемой ГПМ, в том числе при расчетах значений противовесов по критерию экономичности.

Для оценки удобства использования предлагаемого критерия рассмотрим наиболее простой пример расчета неуравновешенной ГПМ, расчетная схема которой изображена на рис. 1, а. Представленная расчетная схема является одномассовой, но для проведения энергетического анализа из общего веса поднимаемого груза $G_{гр} + G_k$ выделена полезная составляющая собственно груза $G_{гр}$ и неизбежная составляющая, связанная с массой клетки или кабины ГПМ G_k . Требуемая для движения мощность может быть рассчитана как скалярное произведение двух векторов, силы и скорости ее приложения [4]:

$$P_p = V G_{гр} \cos \vartheta = (G_{гр} + G_k) V \cos \vartheta.$$

При подъеме клетки с грузом $G_k + G_{гр}$ угол давления ϑ составляет 180° и значение комплексного критерия при подъеме принимает вид

$$p = \frac{P}{V \times G_{гр}} = - \left(1 + \frac{G_k}{G_{гр}} \right).$$

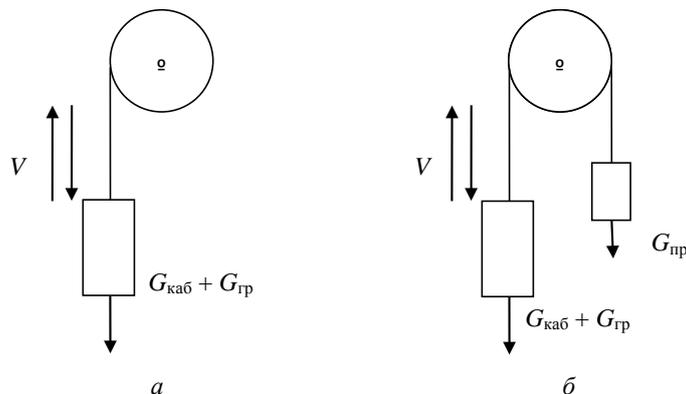


Рис. 1. Расчетные схемы неуравновешенной (а) и уравновешенной (б) грузоподъемных машин

Расчеты этого критерия представлены на рис. 2. Они показывают, что снижение по модулю удельной затрачиваемой мощности p_1 вдвое наблюдается при отношении масс кабины и груза $G_k/G_{гр} < 1$, что соответствует реальным условиям работы шахтной подъемной установки [5]. Однако при этом в системе без противовеса на участке спуска мощность становится положительной и возникает вопрос, как проводить ее рекуперацию. Вопрос непростой и требующий определенных капитальных затрат. Поэтому в простейших ГПМ, как правило, не проводят рекуперацию энергии. Обычно на практике увеличивают установленную номинальную мощность двигателя, осуществляя торможение двигателем без рекуперации энергии торможения.

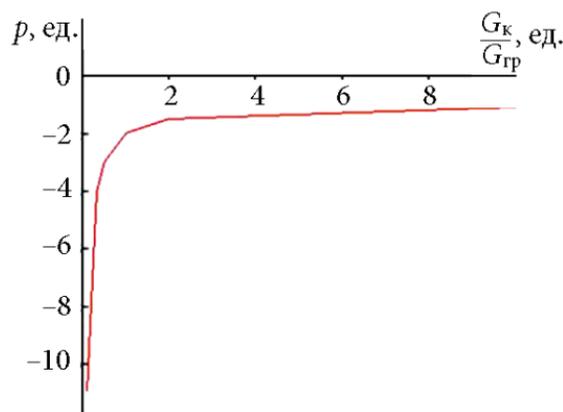


Рис. 2. Зависимость удельной затрачиваемой мощности p при подъеме груза от отношения веса кабины к весу груза $G_k/G_{гр}$

При спуске груза весом $G_{гр}$ с помощью лебедки мощность двигателя положительна и ее необходимо рекуперировать. Практически такая же мощность будет вырабатываться электрическим двигателем, работающим в режиме генератора при спуске такого же груза. Для рекуперации энергии в этом режиме

необходимо использовать систему управления рекуперацией энергии торможения, а в некоторых случаях и устройство аккумулирования вырабатываемой энергии. На практике для упрощения системы управления привода лебедки часто допускают рассеивание излишков вырабатываемой электроэнергии на электрических тормозных резисторах. Однако это приводит к ряду неудобств, таких как увеличение габаритных размеров тормозных резисторов и нагрев их поверхности, поэтому необходимо обеспечивать защиту тормозных резисторов от попадания пыли и влаги, а также ограничивать несанкционированный доступ к ним. Поскольку излишняя вырабатываемая энергия преобразуется в ненужную тепловую, в некоторых случаях может потребоваться система охлаждения, на обслуживание которой пойдет дополнительная энергия [5, 6].

На практике для снижения номинальной мощности установленного электрического двигателя и упрощения системы управления привода ГПМ часто применяют частичное уравнивание лифтовой системы [7, 8]. Такая традиционная лифтовая система состоит из кабины, лебедки и противовеса (рис. 1, б), который используется для уравнивания веса частично-нагруженной кабины. Часто уравнивание осуществляется для среднестатистической нагрузки, например, для уравнивания суммарного веса кабины G_k и половины максимально допустимого груза $(G_{гр})_{max}$ выбирают вес противовеса $G_{пр}$:

$$G_{пр} = G_k + \frac{G_{гр\ max}}{2}.$$

Расчетный вес противовеса $G_{пр}$, как правило, оказывается больше, чем вес пустой кабины G_k , но меньше, чем полностью загруженной грузом $G_{гр}$ кабины как показано на рис. 1, б [6].

В горнодобывающей промышленности находят применение уравновешенные шахтные подъемники [9], расчет противовеса которых может осуществляться исходя из условия одинаковых затрат мощности на участках при подъеме и опускании кабины. Рассмотрим пример расчета затрачиваемых мощностей шахтного подъемника, осуществляющего подъем вагонеток с фиксированным весом груза и опускающего пустые вагонетки после разгрузки. Такая расчетная схема будет иметь вид, представленный на рис. 3.

Подъем кабины с грузом $G_k + G_{гр}$ при опускании противовеса потребует удельных затрат энергии

$$p_1 = \frac{G_{пр}}{G_{гр}} - \frac{G_k}{G_{гр}} - 1.$$

Опускание кабины без груза G_k при подъеме противовеса потребует удельных затрат энергии

$$p_2 = \frac{G_k}{G_{гр}} - \frac{G_{пр}}{G_{гр}} - 1.$$

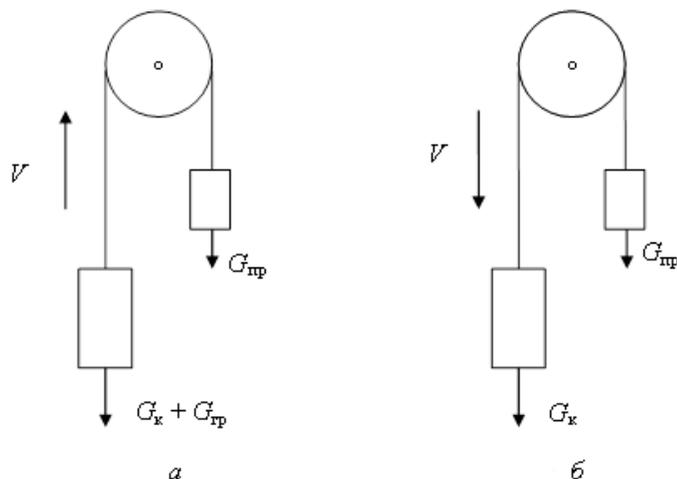


Рис. 3. Расчетная схема шахтного подъемника при подъеме кабины с грузом (а) и при опускании кабины без груза после разгрузки (б)

И при подъеме, и при опускании кабины двигатель может работать в двух режимах, как показано на рис. 4. Возникает нестандартный вопрос: какой вес противовеса $G_{пр}$ следует выбрать, чтобы расход энергии и капитальные затраты были минимальными?

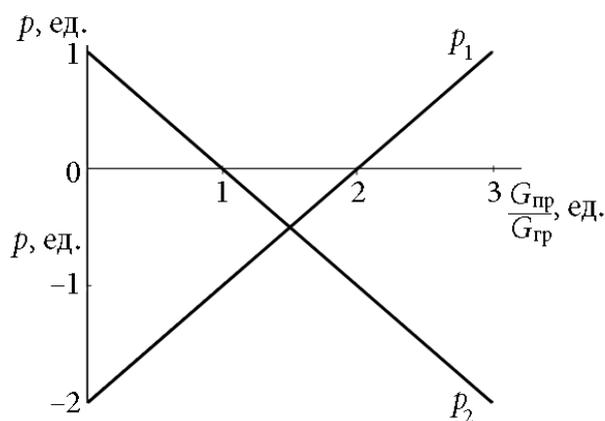


Рис. 4. Потребные расчетные удельные мощности при спуске p_2 и при подъеме p_1

Вариант положительного значения комплексного критерия следует отвергнуть как требующий усложнения лифтовой системы из-за необходимости применения системы рекуперации энергии, увеличивающий стоимость ГПМ. Вариантов отрицательных значений предлагаемого для оценки качества ГПМ несколько при значениях $G_{пр}/G_{гр}$ от нуля до двух. Ответ на поставленный выше вопрос можно найти, приравняв значения комплексного критерия на участках подъема и опускания при фиксированном значении $G_{к}/G_{гр}$: $p_2 = p_1$.

На рис. 4 представлены результаты расчета требуемых удельных мощностей подъемного электродвигателя при спуске и подъеме в зависимости от отношения $G_{пр}/G_{гр}$ при постоянном отношении $G_k/G_{гр}$. Оптимальное значение веса противовеса при $G_k/G_{гр} = 1$ составит $G_{пр} = 1,5G_{гр}$. Это оптимальное значение отношения $G_{пр}/G_{гр} = 1,5$ соответствует точке пересечения удельных затрат $p_2 = p_1 = 0,5$.

Таким образом, двигатель лифтовой системы в несимметричном цикле нагрузки при подъеме и спуске с минимальным расходом энергии потребляет энергию из сети. Преимуществом такого принципа работы является упрощение системы управления благодаря отсутствию устройств рекуперации энергии и возможность снижения пиковой нагрузки на двигатель, а также уменьшение номинальной мощности установленного двигателя.

На рис. 4 представлены расчеты требуемых удельных мощностей двигателя при спуске и при подъеме в зависимости от отношения веса противовеса к весу поднимаемого груза при несимметричном цикле работы ПТМ [5].

Анализируя расчеты удельных мощностей при спуске и подъеме, можно указать, что необходимая мощность двигателя при подъеме p_1 падает с увеличением массы противовеса, а необходимая мощность при спуске p_2 увеличивается при тех же условиях. Эта особая точка свидетельствует о возможности использования двигателя и при спуске, и при подъеме с одинаковой мощностью, т. е. обеспечить минимальную мощность установленного двигателя, исключая его перегрузку или недогрузку.

На основании проделанного исследования можно сделать следующие выводы.

1. При фиксированных нагрузках ПТМ на участках спуска и подъема по предлагаемой методике расчета можно выбрать оптимальное значение веса противовеса, обеспечивающее минимизацию общего расхода энергии на спуске и подъеме.

2. Предполагается совершенствование известных методов повышения экономичности ПТМ путем автоматического уравнивания перед циклом движения. Актуальность решения задачи заключается в возможности сокращения удельного расхода энергии до 30 % при создании новых ПТМ с помощью предлагаемой методики расчета. Применение автоматических уравнивающих устройств вместо применяемых в настоящее время устройств предварительного статического уравнивания ПТМ обеспечивает адекватное сокращение удельного расхода энергии, но требует проведения стендовых испытаний новых ПТМ.

Рассмотренные конструкции ГПМ показывают, что основные динамические и экономические свойства ее закладываются на начальном этапе проектирования при выборе мощности двигателя и массы противовеса. Последующие расчеты по критериям прочности и долговечности, как правило, не влияют на динамические качества ПТМ и расход энергии в эксплуатации, если не происходит значительного увеличения подвижных масс. На экономические характеристики ПТМ влияет ряд факторов, таких как характеристики неустановившегося режима работы ПТМ, КПД рабочей машины, двигателя и передаточного механизма. Первым условием возможности повышения экономичности ПТМ в процессе проектирования является выбор экономичных двигателя и рабочей машины. Но это усло-

вие является необходимым, но недостаточным, выполнение его обеспечивает только потенциальную возможность повышения экономичности. Для практической реализации этой возможности необходимо произвести совмещение экономических режимов двигателя и рабочей машины согласованием их характеристик путем выбора оптимальных параметров передаточного механизма.

Значительные резервы повышения экономичности ПТМ при эксплуатации могут быть реализованы путем уравнивания. Примером такого способа является применение противовесов в лифте, однако эффективность такого метода снижается при изменении в процессе эксплуатации поднимаемого груза. Исключение этого недостатка возможно путем автоматического уравнивания в каждом цикле работы.

Литература

- [1] Волков Д.П., ред. Лифты. М., АСВ, 2005.
- [2] Леонов И.В., Леонов Д.И. Теория механизмов и машин. М., Высшее образование, 2008.
- [3] Барбашов Н.Н., Леонов И.В. Динамическая модель подъемно-транспортной машины с аккумулятором энергии. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2012, № 9, с. 45–50.
- [4] Левитский Н.И. Теория механизмов и машин. М., Наука, 1990.
- [5] Яновский Л. Проектирование механического оборудования лифтов. М., АСВ, 2005.
- [6] Александров М.П. Грузоподъемные машины. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000.
- [7] Леонов И.В., Барбашов Н.Н. Улучшение механических характеристик механизмов привода маховичных аккумуляторов энергии. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2011, № 11, с. 24–28. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2011-11-24-27>
- [8] Леонов И.В. Барбашов Н.Н. Энергетическая модель передаточного механизма с маховичным аккумулятором энергии. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2011, № 4, с. 61–68.
- [9] Леонов И.В. Энергетический анализ цикла грузоподъемной машины. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2013, № 3, с. 19–26. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2013-3-19-26>

Каимов Сайд-Хусайн Абдурахманович — аспирант кафедры «Теория механизмов и машин», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Леонов Игорь Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры «Теория механизмов и машин», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Каимов С.А. Снижение расхода энергии неуравновешенных лифтовых систем. *Политехнический молодежный журнал*, 2020, № 04(45). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-04-603>

LOWERING ENERGY CONSUMPTION OF UNBALANCED ELEVATOR SYSTEMS

S.A. Kaimov

kaimovsaid@mail.ru

SPIN-code: 8798-9771

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

Topical issues of reducing the efficiency of lifting machines (LM) are considered. The LM economy criterion was estimated using complex specific indicators, which make it possible to determine the relationship between the dynamic characteristics of machines and energy costs. The calculation of the complex specific indicator is shown on the basis of a simple unbalanced elevator system. The dependence of the specific power expended when lifting the load on the ratio of the cabin weight to the cargo weight is determined. Also considered are mathematical models of counterbalanced lifting-and-transport machines (LTM), the analysis of which shows the possibility of reducing their energy consumption. Recommendations are given to ensure minimization of the total energy consumption on the descent and ascent of the LM.

Keywords

Lifting-and-transport machines, efficiency of lifting machines, the ratio of the cabin weight and the load, the weight of the balancing counterweight, the engine power of the elevator system, the power calculation of the mine elevator, the balancing of the elevator system, the scheme of the mine elevator

Received 23.03.2020

© Bauman Moscow State Technical University, 2020

References

- [1] Volkov D.P., ed. Lifty [Elevators]. Moscow, ASV Publ., 2005 (in Russ.).
- [2] Leonov I.V., Leonov D.I. Teoriya mekhanizmov i mashin [Theory of mechanisms and machines]. Moscow, Vysshee obrazovanie Publ., 2008 (in Russ.).
- [3] Barbashov N.N., Leonov I.V. Dynamic model lifting-and-shifting machines battery powered. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2012, no. 9, pp. 45–50 (in Russ.).
- [4] Levitskiy N.I. Teoriya mekhanizmov i mashin [Theory of mechanisms and machines]. Moscow, Nauka Publ., 1990 (in Russ.).
- [5] Yanovskin L. Proektirovanie mekhanicheskogo oborudovaniya liftov [Design of mechanical equipment for elevators]. Moscow, ASV Publ., 2005 (in Russ.).
- [6] Aleksandrov M.P. Gruzopod"emnye mashiny [Lifting machines]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2000 (in Russ.).
- [7] Leonov I.V., Barbashov N.N. Improvement of mechanical data of flywheel energy accumulators drives. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2011, no. 11, pp. 24–28. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2011-11-24-27> (in Russ.).
- [8] Leonov I.V. Barbashov N.N. Energy model of transmission mechanism with flywheel energy storage. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 201, no. 4, pp. 61–68 (in Russ.).

- [9] Leonov I.V. Energy analysis cycle of hoisting-and-transport machines. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2013, no. 3, pp. 19–26. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2013-3-19-26> (in Russ.).

Kaimov S.A. — PhD Student, Department of Theory of Mechanisms and Machines, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Leonov I.V., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Theory of Mechanisms and Machines, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Kaimov S.A. Lowering energy consumption of unbalanced elevator systems. *Politekhnicheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2020, no. 04(45). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-04-603.html> (in Russ.).