

УДК 423.1.076.004.18

Г. К. ГЕТЬМАН – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроподвижной состав», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна; getman-gk@i.ua, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3471-6096>;
В. Е. ВАСИЛЬЕВ – ст. преп. кафедры «Электроподвижной состав», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна; wasiljew@ukr.net, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7551-2332>

АНАЛИЗ РЕЗЕРВОВ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕВОЗОК НА ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Введение

Предприятия по открытой добыче полезных ископаемых являются крупными потребителями электрической энергии. Так, для железорудных карьеров общекарьерный (т.е. с учетом всех видов работ) удельный расход электроэнергии в ряде случаев достигает 50 кВт·ч на 1 т добытой руды. Он определяется энергопотреблением всего комплекса оборудования, обеспечивающего технологический процесс добычи, и всех вспомогательных цехов.

Однако анализ структуры энергопотребления карьеров показывает, что наиболее энергоемким процессом является транспортирование горной массы. При использовании на открытых работах электрической тяги ее доля в общих затратах электроэнергии по карьере может достигать 85%.

Развитие открытого способа разработки сопровождается ростом концентрации производства, увеличением глубины и пространственных размеров карьеров, расстояний транспортирования и сложности доставки горной массы на поверхность.

С увеличением глубины карьеров увеличивается дальность перевозок и соответствующие затраты электроэнергии.

Увеличение высоты подъема на 1 т горной массы железнодорожным транспортом на каждые 100 м повышает энергозатраты приблизительно на 2,5 кВт·ч. Этот же показатель для остального имеющегося в карье-

ре оборудования, занятого в других технологических процессах (экскавация, бурение, водоотлив, освещение и т. д.), составляет всего 1,03-1,05 кВт·ч.

Из сказанного следует, что развитие горнодобывающих предприятий, использующих на открытых работах электрическую тягу, будет сопровождаться ростом транспортной составляющей в энергоемкости перевозок. Поэтому разработка мероприятий по экономии электроэнергии на карьерах должна предусматривать реализацию резервов экономии затрат электроэнергии на транспортировку горной массы

Цель статьи

Анализ резервов снижения энергоемкости железнодорожных перевозок на горнодобывающих предприятиях, использующих на открытых работах электрическую тягу.

Обзор литературы

Издержки на возмещение затрат электроэнергии на тягу поездов составляют ощутимую долю эксплуатационных расходов железных дорог, поэтому вся история их электрификации неразрывно связана с поиском и реализацией резервов снижения энергоёмкости перевозок.

Особую актуальность вопросы энергосбережения приобрели в последнее десятилетие в связи с ростом цен на энергоносители. Возросло количество работ, посвящённых экономии электроэнергии на тягу

поездов. В поле зрения исследователей находятся оба главных звена, определяющих общий энергобаланс электротяги, – устройства электроснабжения и тяговый электроподвижной состав [1- 5]. Ряд новых исследований посвящен усовершенствованию методов нормирования расхода электроэнергии на тягу поездов [6,7,8].

В связи с удорожанием топливно-энергетических ресурсов в настоящее время возросла также актуальность исследований и разработки практических мероприятий, направленных на повышение энергоэффективности электрифицированного железнодорожного транспорта карьеров, который является крупным потребителем электрической энергии.

Проблема экономии электроэнергии на тягу поездов применительно к магистральному железнодорожному транспорту изучалась в течение практически всей истории электрификации железных дорог. В результате внедрения различных энергосберегающих мероприятий расширение полигона электрической тяги сопровождалось значительным снижением энергоёмкости перевозок. Так, в период 1950-1975 г.г. на железных дорогах бывшего СССР удельный расход электроэнергии на тягу поездов во всех видах движения снизился с 218 до 125 кВт·час/10⁴ т·км брутто, т. е. приблизительно на 42 % (см. рис. 1).

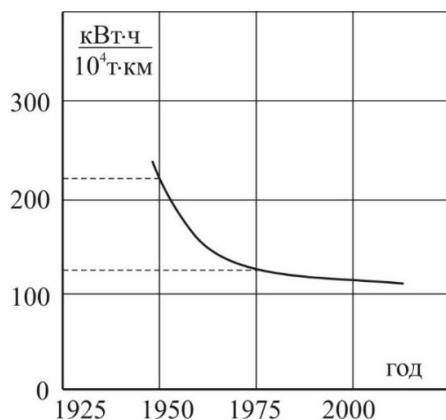


Рис.1. Удельный расход электроэнергии на тягу поездов на железных дорогах СССР

Однако, как показывает анализ литературных источников, вопросы снижения энергоёмкости перевозок карьерным железнодорожным транспортом до настоящего времени изучены недостаточно. В частности, не проведены необходимые для определения и реализации резервов экономии электроэнергии исследования структуры составляющих затрат на транспортировку горной массы и факторы, ее определяющие. В настоящей статье сделана попытка восполнить этот пробел.

Основной материал

С практической точки зрения представляет интерес анализ составляющих расхода электроэнергии на:

- тягу (преодоление сил сопротивления движению, покрытие потерь в тормозах и в электрических цепях электровоза, питание цепей собственных нужд);
- выполнение отдельных операций перевозочного процесса (погрузка, разгрузка, движение с грузом, движение в карьер, взвешивание);
- питание цепей собственных нужд (двигателей вентиляторов и компрессоров, устройств отопления и кондиционирования и т.п.).

Составляющие расхода электроэнергии на тягу и их взаимосвязь с режимами движения поезда подробно рассмотрены в [9]. Уравнение энергетического баланса за поездку представлено как

$$A = A_T + A_{CH}, \quad (1)$$

где A_T – затраты электроэнергии на тягу (работа тяговых двигателей и потери в силовых цепях); A_{CH} – расход электроэнергии на питание цепей собственных нужд.

Уравнение энергетического баланса за поездку, представим как

$$A = A_T + A_1 + A_{w_0} \pm A_{II} + A_{TOP} + \Delta A + A_{CH}, \quad (2)$$

где A_T , A_i и A_{w_0} - работа сил сопротивления движению соответственно от кривых и уклонов пути и основного; A_{Π} – работа сил по изменению потенциальной энергии; $A_{\text{тор}}$ – потери энергии в тормозных устройствах; ΔA – потери энергии в тяговых электрических цепях электровоза в режиме тяги соответственно.

На основании анализа опытных и расчетных данных установлено, что доля A_T в общем расходе электроэнергии составляет 88 – 92%. При перепаде высот, на которых расположены пункты погрузки и разгрузки, 100м и более наибольший удельный вес в расходе электроэнергии на тягу A_T имеют затраты, связанные с преодолением сопротивления движению от уклонов пути. Далее по убыванию удельного веса следуют затраты на преодоление сил сопротивления движению поезда (основного, от кривых пути и добавочного), потери энергии на вредных спусках и в силовых цепях, затраты на собственные нужды.

Структура рассматриваемых затрат энергии зависит от характеристик маршрута движения: с увеличением протяженности маршрута возрастает доля расхода энергии на движение с грузом, а удельный вес остальных составляющих снижается. При используемых схемах транспортировки горной массы независимо от характеристик профиля маршрутов резервы снижения расхода электроэнергии на тягу следует искать на пути уменьшения затрат на перемещение поезда A_T и питание цепей собственных нужд $A_{\text{СН}}$, снижения потерь энергии в электроподвижном составе ΔA , при остановочном торможении и подтормаживании на вредных спусках.

Правомерность сделанных в [9] выводов подтверждают приведенные ниже результаты анализа структуры пооперационного расхода электроэнергии и составляющих затрат энергии на питание цепей собственных нужд.

Особенностью работы электротранспорта предприятий по открытой добыче полезных ископаемых является ее цикличность. Типичный цикл перевозочной работы включает:

- движение в карьере;
- погрузку (полезного ископаемого или вскрыши);
- взвешивание (обычно только составов, перевозящих полезные ископаемые);
- движение с грузом (на фабрику дробления или на отвалы);
- разгрузку горной массы.

Расход электроэнергии на тягу за цикл представим как

$$A_T = A_{\text{пор}} + A_{\text{пог}} + A_{\text{тр}} + A_{\text{раз}} + A_{\text{взв}}, \quad (3)$$

где слагаемые правой части представляют соответственно затраты электроэнергии на:

$A_{\text{пор}}$ – движение поезда в карьере; $A_{\text{пог}}$ – погрузку горной массы; $A_{\text{тр}}$ – движение поезда с грузом; $A_{\text{раз}}$ – выгрузку горной массы; $A_{\text{взв}}$ – взвешивание поезда.

По результатам опытных поездок в карьерах ЮГОКа и ССГОКа с тяговыми агрегатами ПЭ2М получены данные об удельном весе перечисленных выше пооперационных затрат электроэнергии.

Их усредненные по ряду опытных поездок значения в виде гистограммы приведены на рис. 2.

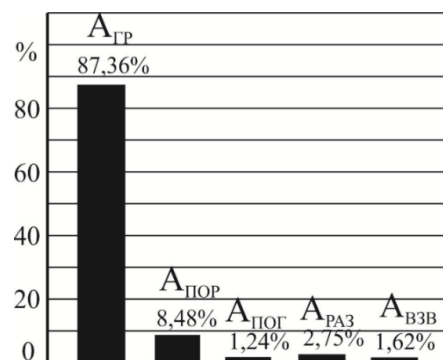


Рис. 2. Пооперационные затраты электроэнергии на тягу карьерных поездов

Нетрудно видеть, что большая часть энергии расходуется на движение поезда с грузом и в карьер, поэтому при сборе статистического материала, необходимого для нормирования расхода электроэнергии и разработки мероприятий по снижению энергоемкости перевозок особое внимание следует уделять выбору рациональных приемов управления поездом в период движения, поскольку в этом случае даже незначительное в процентном отношении снижение расхода энергии может дать существенное изменение ее общих затрат.

Расчетная мощность двигателя на руководящем уклоне соответствует условиям перегрузки двигателей. Длительность перегрузки изменяется в широких пределах и зависит от конкретного профиля ж.-д. путей. В практике эксплуатации электровозов всегда используется тепловая инерция тягового двигателя с тем, чтобы кратковременно формировать мощность на наиболее тяжелых участках пути при трогании с места. Это возможно только при условии, если температура двигателя к моменту перегрузки меньше, чем это допускается нормами. В конце периода форсирования мощности температура и его перегрев не должны превосходить значений, допускаемых для данного класса изоляции.

Выше отмечалось, что в общих затратах электроэнергии значительную часть составляют затраты на работу вспомогательного оборудования: двигателей компрессоров и вентиляторов тяговых двигателей, аппаратов управления, освещения, отопления и т.п.

Применительно к магистральному транспорту вопросы экономии расхода энергии на питание цепей собственных нужд электроподвижного состава исследовались рядом авторов [10, 11, 12]. Для карьерного электротранспорта этот вопрос не освещался в известной авторам технической литературе.

Вместе с тем, поиск резервов экономии требует изучения энергоемкости отдельных элементов вспомогательных цепей, а также оценки величины затрат энергии на соб-

ственные нужды на всех фазах перевозочного цикла. Для решения этого вопроса во время опытных поездок были проведены необходимые измерения.

На тяговом агрегате ПЭ2М общая мощность вспомогательных машин, получающих питание от контактной сети, составляет 390 кВт:

1 Двигатель привода компрессора КТ-6 – два двигателя типа ТЛ110 (53,1 кВт; 20,6 А; 3 кВ).

2 Двигатели типа НБ101 привода центробежных вентиляторов охлаждения тяговых двигателей электровоза управления и моторных думпкаров (шесть электродвигателей мощностью 41 кВт каждый; 36 А; 1,5 кВ) или двигатели ДТ-51, по параметрам и конструкции идентичные НБ-101.

3 Динамотор-генератор типа ДК-604В для питания цепей управления напряжением 50 В и подзаряда аккумуляторной батареи (2х6 кВт; 5,3 А; 2х1,5 кВ).

4 Электродвигатели типа ЭТВ-20 для привода осевых вентиляторов охлаждения пуско-тормозных резисторов (шесть двигателей мощностью 13 кВт каждый; 200 В; 80 А).

Исходя из вышеизложенного, расход электроэнергии на собственные нужды можно представить как

$$A_{\text{сн}} = A_{\text{мв}} + A_{\text{мк}} + A_{\text{мг}} + A_{\text{от}}, \quad (4)$$

где слагаемые правой части представляют собой расходы электроэнергии, обусловленные питанием соответственно цепей:

$A_{\text{мв}}$ – мотор-вентиляторов; $A_{\text{мк}}$ – мотор-компрессоров; $A_{\text{мг}}$ – мотор-генераторов;

$A_{\text{от}}$ – отопления кабины машиниста.

Значения составляющих расхода энергии на собственные нужды, полученные опытным путем, приведены в виде диаграмм на рис. 3...7, где затраты энергии обозначены соответственно: МВ – мотор-вентиляторов, МК – мотор-компрессоров, МГ – мотор-генераторов, ОТ – на отопление кабины машиниста. Можно видеть, что в период погрузки (рис. 3) и разгрузки (рис. 4) основная часть расхода электроэнергии

$A_{сн}$ обусловлена работой мотор-компрессоров (62-85%).

При движении с грузом (рис. 5) расход на собственные нужды обусловлен, главным образом, работой мотор-вентиляторов тяговых двигателей (83%).

При движении в карьер (рис. 6) 52% $A_{сн}$ обусловлены работой мотор-генератора цепей управления, а на долю мотор-компрессора приходится 34% расхода энергии.

За полный цикл движения (рис. 7) более половины затрат энергии на собственные нужды обусловлено вентиляцией тяговых двигателей (59,3%). Работа мотор-компрессоров обуславливает 25,4% $A_{сн}$, питание двигатель-генератора -7,4%. Расход на отопление кабины машиниста в зимнее время составляет 7,9% $A_{сн}$.

Приведенные выше данные соответствуют обычному на карьерном транспорте режиму работы вспомогательных машин, предусматривающему включение вентиляторов тяговых двигателей только на период движения с грузом. Следовательно, в случае более продолжительной работы вентиляторов удельный вес расхода на собственные нужды в общем расходе энергии возрастает. Из сказанного также следует, что если для конкретных условий эксплуатации существует резерв по нагреванию обмоток тяговых двигателей, то в этом случае снизить расход электроэнергии на собственные нужды можно за счет использования режима пониженной производительности вентиляторов.

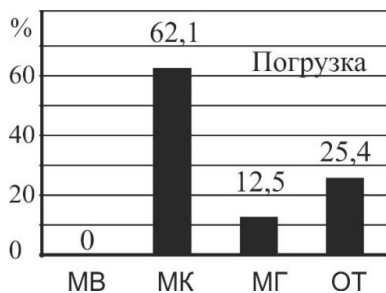


Рис. 3. Затраты электроэнергии на собственные нужды при погрузке

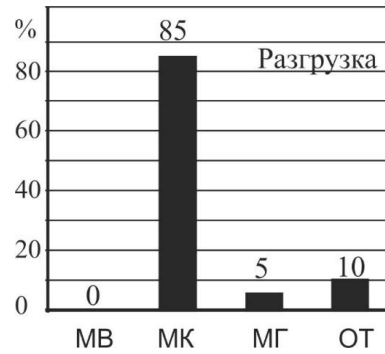


Рис. 4. Затраты электроэнергии на собственные нужды при разгрузке

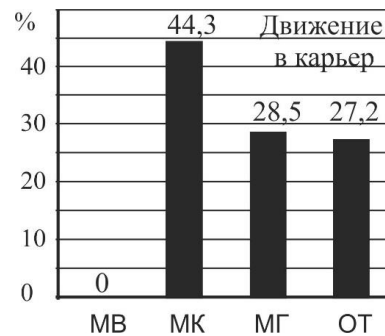


Рис. 5. Затраты электроэнергии на собственные нужды при движении с грузом

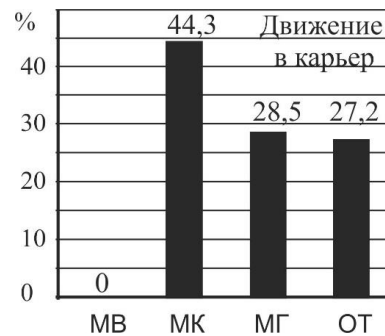


Рис. 6. Затраты электроэнергии на собственные нужды при движении в карьер



Рис. 7. Структура затрат электроэнергии на собственные нужды за цикл

Выводы

1. Разработка мероприятий по снижению энергоемкости перевозок карьерного электротранспорта актуальна, т.к. позволяет снизить себестоимость добычи полезных ископаемых.

2. Выполненное исследование структуры затрат электроэнергии составляет основу для разработки технико-эксплуатационных мероприятий по снижению энергоемкости процесса транспортировки горной массы.

3. Работы по снижению затрат электроэнергии на транспортировку горной массы должны быть направлены на:

- снижение потерь в силовых цепях тягового подвижного состава за счет применения более совершенного электроподвижного состава и регулирования степени использования установленной тяговой мощности;

- внедрение мероприятий, обеспечивающих снижение расхода электроэнергии на питание цепей собственных нужд;

- разработку и внедрение рациональных приемов управления движением поездов.

4. Внедрение энергосберегающих мероприятий должно предусматривать разработку и применение эффективных методик расчета индивидуальных норм расхода электроэнергии и стимулирования за ее экономию задействованных в организации перевозочного процесса работников (прежде всего – поездных бригад);

5. Целесообразно выполнить сравнительный анализ энергозатратности перевозочного процесса в зависимости от вида тока и уровня напряжения в системе тягового электроснабжения.

Библиографический список

1. К вопросу развития системы электроснабжения предприятий горнодобывающей промышленности с использованием возобновляемых источников электроэнергии [Текст] / С.М. Бойко и др. // Электрифікація транспорту. – 2017. - №14. – С. 7-14.

2. Денисюк, С.П. Повышение энергетической эффективности предприятий железнодорожного транспорта на основе технологического подхода [Текст] / С.П. Денисюк, В.И. Василенко // Электрифікація транспорту. – 2017. - №14. – С. 78-85.
3. Сиченко, В.Г. Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць [Текст] / В.Г. Сиченко, Ю.В. Саєнко, Д.Т. Босий. – Д.: Стандарт-Сервіс, 2015, - 344 с.
4. Малый комментарий к тактике создания тяговых электромеханических комплексов рудничных электровозов комбинированного вида [Текст] / О.Н. Синчук и др. // Электричний транспорт. – 2017. - № 14. – С. 42-55.
5. Малишко, І.В. Основні напрямки енергозбереження на залізничному транспорті України [Текст] / І.В. Малишко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. какад. В.Лазаряна. - 2006. - Вип. 13. - С. 36-38.
6. Мозговой В.И. Электроэнергия - потребление и учет. Современные методы: [Рациональное использование и учет энергетических ресурсов. Применение автоматизированной системы учета электроэнергии] // Мир техники и технологий. - 2005. - № 11. - С. 56-58.
7. Силич М.П. Экономия энергетических ресурсов: Оценка уровня энергосбережения в регионе: [Экономия энергетических ресурсов]/ М.П. Силич, Н.Ю. Хабибулина // Промышленная энергетика. - 2006. - № 3. - С. 2-6.
8. Дзюбан В.С. Энергоресурсосбережение - приоритетная задача предприятий Украины: [Снижение энергопотребления предприятий горнодобывающей промышленности] / В.С. Дзюбан, М.И. Рымар // Энергосбережение. - 2006. - № 11. - С. 10-11.
9. Гетьман, Г.К. Анализ расхода электроэнергии на тягу карьерных поездов [Текст] / Г.К. Гетьман, В.Е. Васильев. // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. какад. В.Лазаряна. - 2011. - Вип. 36. - С. 70-74.
10. Кузнецов, В.Г. Нормування витрат електроенергії на власні потреби постів секціонування та пунктів паралельного з'єднання постійного струму [Текст] / В. Г.

Кузнецов, М. О. Иванов, О. О. Матусевич // Вісник Дн. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В.Лазаряна: Зб. наук. пр. – 2008. – Вип. 25. – С. 30-33.

11. Легостаев, В. А. Экономия электрической энергии на электроподвижном составе [Текст] / В. А. Легостаев. – М.: Транспорт, 1956. – С. 21-29.
12. Варламов, А.А. Частичное отключение тяговых двигателей на электровозах переменного тока [Текст] / Варламов А. А., Тарасов Н. Г. // Электрическая и тепловозная тяга. – 1969. – № 12. – С. 8-9.

Ключові слова: електрична тяга поїздів, кар'єрний електричний транспорт, енергоємність перевезень, витрата електроенергії на тягу поїздів.

Ключевые слова: электрическая тяга поездов, карьерный электрический транспорт, энергоёмкость перевозок, расход электроэнергии на тягу поездов.

Keywords: electric traction on-rides, career electric transport port, energy intensity of transportation, electric power consumption for train traction.

Рецензенты:

д.т.н., проф. В. Г. Сиченко
д.т.н., проф. О.Н. Синчук

Поступила в редколлегию 15.01.2019
Принята в печать 23.01.2019