

## АНАЛИЗ РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ТЯГУ КАРЬЕРНЫХ ПОЕЗДОВ

У статті наведено методику визначення складових витрати електроенергії на тягу кар'єрних потягів, а також проаналізовано ступінь їх взаємозв'язку з режимом руху потягу.

*Ключові слова:* тяга поїздів, витрата електроенергії, власні потреби, сила опору руху

В статье приведена методика определения составляющих расхода электроэнергии на тягу карьерных поездов, а также проанализирована степень их взаимосвязи с режимом движения поезда.

*Ключевые слова:* тяга поездов, расход электроэнергии, собственные нужды, сила сопротивления движению

The method of determination of constituents of expense of electric power on traction of quarry trains is resulted in the article, and also the degree of their intercommunication with the mode of train motion is analysed.

*Keywords:* traction of trains, expense of electric power, own needs, force of resistance to motion

Електрифікований залізничний транспорт підприємств по відкритій добычі корисних копалин є великим споживачем електричної енергії, тому в зв'язі з удорожанням паливно-енергетичних ресурсів в наші дні збільшилася актуальність робіт по зниженню енергоємності перевезок.

Застосовуючи до магістрального залізничного транспорту енергетику руху поїзда з метою пошуку резервів економії електроенергії підвергалася пристальному вивченню впродовж практично всієї історії електрифікації залізничних доріг. В результаті отримано суттєве зниження енергоємності перевезок на електрифікованих залізничних дорігах.

Застосовуючи до підприємств по відкритій добычі корисних копалин фактори, що визначають співвідношення окремих складових витрат енергії на електричну відкатку, не підвергалися детальній вивченню і в цій статті зроблена спроба заповнити цей прогалину.

Енергетику руху поїзда при електричній тязі можна представити в вигляді діаграми, зображеної на рис. 1.

Підведена до поїзда через контактну мережу електрична енергія  $A$  дорівнює сумі механічної роботи, виконаної тяговими двигачами  $A_F$  (робота сили тяги), витрат енергії на живлення окремих потреб електричного складу  $A_{CH}$  і витрат енергії в тягових електричних мережах електричного складу в режимі тяги  $\Delta A_T$ .

Робота, виконана тяговими двигачами  $A_F$ , як показано на рис. 1, витрачається на

преодолення сил опору руху (основного і від кривих доріг)  $A_w$ , зміну запасу кінетическої  $A_k$  і потенціальної енергії поїзда  $A_{\Pi}$ .

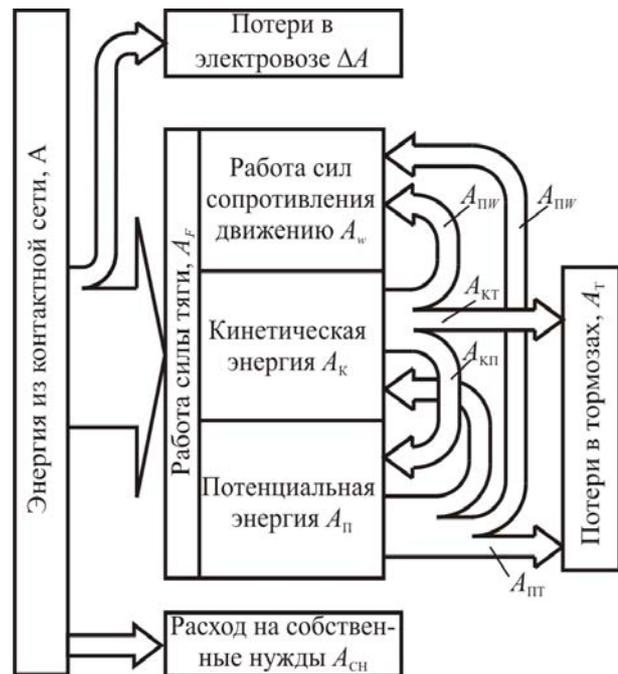


Рис. 1

Потенціальна енергія поїзда збільшується при русі на підйом за рахунок перетворення частини роботи сили тяги  $A_F$  або частини кінетическої енергії  $A_{кп}$ , звільнюваної при зниженні швидкості руху.

При русі по спуску звільнювана потенціальна енергія перетворюється в роботу по подоланню сил опору руху  $A_{\Pi w}$ , кінетическу енергію  $A_{\Pi k}$  (при збільшенні швидкості руху) і теплову енергію

в тормозных устройствах  $A_{пт}$  (потери в тормозах) в случае применения торможения.

Кинетическая энергия поезда  $A_k$  в зависимости от режима его ведения может превращаться в потенциальную (составляющая  $A_{кп}$ ), расходоваться на преодоление сопротивления движению (составляющая  $A_{кв}$ ) и гаситься в тормозных устройствах ( $A_{кт}$ ).

Движение поезда начинается с трогания и завершается остановкой. Следовательно, суммарный баланс составляющих кинетической энергии за поездку всегда равен нулю. Поэтому уравнение энергетического баланса за поездку, представим как

$$A = A_{w_0} + A_r \pm A_{п} + A_{т} + \Delta A + A_{сн}, \quad (1)$$

где  $A_r$  и  $A_{w_0}$  – работа сил сопротивления движению соответственно от кривых пути и основного.

Рассмотрим более подробно составляющие расхода электроэнергии и проанализируем степень их взаимосвязи с режимом движения поезда, а также возможные резервы экономии электроэнергии.

Составляющие  $A_{w_0}$ ,  $A_t$ ,  $A_r$  и  $A_{п}$  с достаточной точностью определяются аналитически, что будет показано далее. Потери электроэнергии в силовых цепях в конкретной поездке можно рассчитать, если известна зависимость от времени или пройденного пути параметров, характеризующих режим нагружения тяговых двигателей (тока якоря, частоты вращения, тока возбуждения и др.). Поэтому этот вид потерь целесообразно найти из опытных данных согласно выражению

$$\Delta A = A_0 - A_{w_0} \mp A_{п} - A_{тп} - A_{т}, \quad (2)$$

где  $A_0$  – найденный из опыта расход электроэнергии на тягу без учета затрат энергии на питание цепей собственных нужд.

Механическая работа по преодолению основного сопротивления движению в абсолютных величинах

$$A_{w_0} = 9,81m \int_0^s w_0(s) ds, \quad \text{Вт} \cdot \text{с}, \quad (3)$$

где  $m$  – масса поезда, т;

$s$  – пройденное поездом расстояние (путь), м;

$w_0$  – основное удельное сопротивление движению, Н/кН.

Удельный (отнесенный к единице перевозочной работы) расход рассматриваемой составляющей расхода электроэнергии

$$a_{w_0} = \frac{A_{w_0}}{3,6sm} = \frac{2,725}{s} \int_0^s w_0(s) ds, \quad \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{т} \cdot \text{км}}. \quad (4)$$

Определение работы по преодолению основного сопротивления движению по (3) затруднено в связи с зависимостью величины  $w_0$  от скорости движения, являющейся функцией пройденного расстояния  $s$ . В ряде случаев это затруднение обходят, считая составляющую  $A_{w_0}$  равной работе по преодолению сопротивления движению  $w_0$ , совершаемой при движении с некоторой постоянной скоростью  $v_c$ . Тогда выражения для  $A_{w_0}$  и  $a_{w_0}$  приобретают вид:

$$\begin{aligned} A_w &= 9,81msw_0(v_c), \quad \text{Вт} \cdot \text{с}; \\ a_w &= 2,725w_0(v_c), \quad \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{т} \cdot \text{км}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Для приближенной оценки значений  $A_w$  и  $a_w$  можно принять в качестве  $v_c$  среднюю по времени скорость движения на участке  $v_{ср} = s/T$ , поскольку время движения на маршруте  $T$  можно получить из опыта.

Однако фигурирующая в выражении (5) величина  $v_c$  должна представлять не среднюю по времени, а среднюю по пути скорость движения.

Последнее утверждение очевидно из следующего.

Согласно [1] удельное основное сопротивление движению подвижного состава карьерного транспорта представляется линейной функцией скорости движения

$$w_0 = a_0 + a_1 v,$$

где  $a_0$  и  $a_1$  – постоянные коэффициенты, а  $v = ds/dt$  – скорость движения.

С учетом приведенного выражения определенный интеграл в выражении (4) можно записать как

$$\int_0^s w_0(v) ds = a_0 \int_0^s ds + a_1 \int_0^s v ds$$

$$\text{или} \quad \int_0^s w_0(v) ds = (a_0 + a_1 v_{ср}) s,$$

где величина

$$v_{cs} = \frac{1}{s} \int_0^s v ds \quad (6)$$

представляет среднее по пути значение скорости движения.

Известно, что  $v_{cs} = v_{ct}$  только в случае движения с постоянной скоростью. В реальных условиях скорость движения поезда колеблется относительно среднего значения  $v_{ct}$ , что вызывает рост  $v_{cs}$ , поэтому практически всегда  $v_{cs} > v_{ct}$ .

Как показано в [2], минимум работы  $A_{w_0}$  реализуется при движении с постоянной скоростью, а любые ее отклонения от среднего значения сопряжены с ростом работы сил сопротивления движению  $A_w$ , соответствующей выполнению рейса за заданное время хода.

Отметим, что в ряде работ, например [3], указанный факт для электроподвижного состава магистральных железных дорог объясняется наличием в зависимости  $w_0(v)$  составляющей, пропорциональной квадрату скорости движения. Основное сопротивление движению подвижного состава карьерного транспорта на основании (5) можно считать линейной функцией скорости движения. Однако и в этом случае, как можно показать, отклонения скорости движения от её среднего по времени значения сопряжены с ростом работы сил сопротивления движению.

В практических расчетах среднюю по пути скорость движения (6) определяют как

$$v_{cs} = \kappa_n v_{ct}, \quad (7)$$

где так называемый интегральный коэффициент кривой скорости движения [4]

$$\kappa_n = \frac{v_{cs}}{v_{ct}} = \frac{\frac{1}{s} \int_0^s v ds}{v_{ct}}. \quad (8)$$

Приведенные в [4] данные исследований показывают, что для грузовых поездов магистральных железных дорог  $\kappa_n = 1,10 \div 1,20$ .

Обработка кривых скорости  $v(s)$ , зарегистрированных в ряде опытных поездок с поездами в составе тягового агрегата ПЭ2<sup>М</sup>, показала, что для карьерного электротранспорта интегральный коэффициент кривой скорости  $\kappa_n = 1,10 \div 1,15$ .

Для оценки степени увеличения механической работы  $A_{w_0}$ , обусловленного колебаниями ско-

рости относительно среднего по времени значения, рассчитаны приведенные на рис. 2 графики зависимостей отношения  $w_{os}/w_0 = f(v, \kappa_n)$ , где  $w_{os} = w_0(v_{cs})$ , а  $w_0 = w_0(v_{ct})$ . Можно видеть, что для карьерного транспорта рассматриваемое увеличение  $A_{w_0}$  реально не превышает 4...5%.

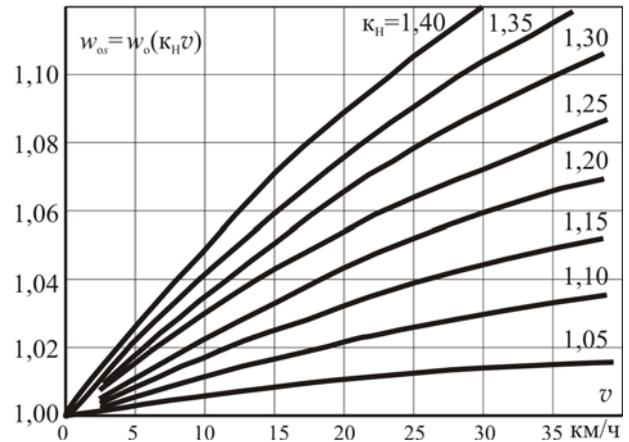


Рис. 2

В случае движения поезда вагонами вперед, он испытывает дополнительное сопротивление движению [1]

$$w_d = (0,15 + 0,001i)w_0, \text{ Н/кН},$$

которое составляет 15...20% от величины  $w_0$ .

Расход энергии на преодоление сопротивления движению от уклонов и кривых пути определяется массой поезда, профилем и планом пути. Его можно принять независимым от скорости движения и, следовательно, от режима ведения поезда, поскольку рекомендованные Правилами тяговых расчетов расчетные выражения для сопротивления движению от уклонов и кривых пути как для магистрального [5], так и для промышленного [1] транспорта не содержат в качестве переменной скорость движения.

Изменение потенциальной энергии поезда и работу сил сопротивления движению от кривых пути представим как:

$$A_n = 9,81m \int_0^s w_i ds = 9,81m \int_0^s i ds, \text{ Вт} \cdot \text{с}; \quad (9)$$

$$A_{rn} = 9,81m \int_0^s w_r ds = 9,81m \sum_{j=1}^n w_{rj} s_{kj}, \quad j = \overline{1, n}, \text{ Вт} \cdot \text{с}, \quad (10)$$

где  $w_i$  – удельное сопротивление движению от уклонов, Н/кН;

$i$  – крутизна уклона, ‰;  
 $w_{rj}$  – удельное сопротивление движению от кривых пути, Н/кН;  
 $s_{kj}$  – длина  $j$ -й кривой, м;  
 $n$  – число кривых на маршруте.

Удельный расход электроэнергии на преодоление уклонов и кривых пути в Вт·час /т·км равен:

$$a_{\text{п}} = \frac{2,725}{s} \int_0^s i ds; \quad (11)$$

$$a_r = \frac{2,725}{s} \sum_{j=1}^n \frac{700}{R_{kj}} s_{kj}, \quad (12)$$

где  $R_k$  – радиус кривой, м.

При движении по однообразному уклону или кривой, длина которой превышает длину поезда, имеем в Вт·час /т·км:

$$a_{\text{п}} = 2,725i; \quad (13)$$

$$a_r = 2,725 \frac{700}{R_k}. \quad (14)$$

Потери механической энергии при торможении (механическом или электрическом реостатном) определяются выражением [6]

$$A_{\text{т}} = \frac{1000m(1+\gamma)(v_{\text{н}}^2 - v_{\text{к}}^2)}{2 \cdot 3,6^2} - 9,81m \int_0^{s_{\text{т}}} w_{\text{к}} ds, \quad \text{Вт} \cdot \text{с}, \quad (15)$$

или 
$$A_{\text{т}} = 10^{-6} m \left[ 10,72(1+\gamma)(v_{\text{н}}^2 - v_{\text{к}}^2) - 2,72 \int_0^{s_{\text{т}}} w_{\text{к}} ds \right], \quad \text{кВт} \cdot \text{ч}, \quad (16)$$

где  $v_{\text{н}}$  и  $v_{\text{к}}$  – значения скорости соответственно в начале и конце торможения, км/ч;

$w_{\text{к}}$  – удельное сопротивление движению на участке торможения, Н/т;

$s_{\text{т}}$  – расстояние, проходимое поездом за время торможения (тормозной путь), м;

$(1+\gamma)$  – коэффициент инерции вращающихся масс поезда.

Механическая работа, совершаемая при подтормаживании на вредных спусках, в случае поддержания постоянной скорости определяется как

$$A_{\text{тв}} = 9,81m(i - w_{\text{о}}(v))s_{\text{в}}, \quad \text{Вт} \cdot \text{с}; \quad (17)$$

$$a_{\text{тв}} = 2,725(i - w_{\text{о}}(v)), \quad \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{т} \cdot \text{км}}, \quad (18)$$

где  $i$  – уклон на вредном спуске (абсолютная величина);

$s_{\text{в}}$  – протяженность вредного спуска, м.

Для электроподвижного состава с реостатным пуском из потерь в тяговых цепях  $\Delta A$  при необходимости можно выделить потери в пусковых резисторах

$$A_{\text{рп}} = 9,81mk_{\text{п}} \left[ \frac{(1+\gamma)v_{\text{п}}^2}{2 \cdot 3,6^2} - \int_0^{s_{\text{п}}} w_{\text{к}} ds \right], \quad \text{Вт} \cdot \text{с}$$

или

$$A_{\text{рп}} = 2,725 \cdot 10^{-6} mk_{\text{п}} \times \left[ 38,6(1+\gamma)v_{\text{п}}^2 - \int_0^{s_{\text{п}}} w_{\text{к}} ds \right], \quad \text{кВт} \cdot \text{ч}, \quad (19)$$

где  $k_{\text{п}}$  – коэффициент пусковых потерь;

$v_{\text{п}}$  – скорость выхода на автоматическую характеристику, км/ч;

$s_{\text{п}}$  – путь, проходимый поездом за время пуска, м.

Расход энергии на собственные нужды  $A_{\text{сн}}$  можно рассчитать по приведенной в [1] средней мощности вспомогательных цепей или определить опытным путем, как в данном исследовании.

Об удельном весе составляющих расхода электроэнергии на тягу карьерных поездов можно судить по данным табл. 1. Они соответствуют средним значениям величин, определенным с помощью приведенных выше выражений по результатам трех опытных поездок по полному циклу движения на маршруте протяженностью 12,35 км с разностью высот конечных пунктов 224,4 м. Опыты проводились с тяговым агрегатом ПЭ2<sup>М</sup> и составом из 9-и вагонов 2ВС-105 (масса тары поезда  $m = 730$  т; расчетная масса груженого поезда  $m = 1730$  т).

Анализ приведенных данных и расчетных выражений показывает, что общий расход электроэнергии и удельный вес его составляющих зависит в основном от характеристик маршрута движения (перепад высот расположения конечных пунктов; характеристики путей в местах предусмотренных остановок поезда и количество последних; протяженность участков с движением поезда головой вперед и вагонами вперед; количество и параметры кри-

вых в плане пути; доля протяженности постоянных и передвижных путей; профиль пути в местах погрузки и разгрузки). В рассматриваемом случае наибольший удельный вес в расходе электроэнергии приходится на затраты  $A_{\text{п}}$ , 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) – 30,84 %, потери энергии на вредных спусках – 19,27 %, в тяговых цепях – 11,17 % и на собственные нужды – 6,25 %.

Таблица 1

**Составляющие расхода энергии на тягу карьерных поездов  
(числитель – в кВт·ч, знаменатель – в % от общего расхода)**

Направление движения <i>l</i>	Составляющие расхода электроэнергии								
	$A_o$	$A_{\text{сн}}$	$A_{\text{п}}$	$A_{w_o}$	$A_{w_d}$	$A_{\text{т}}$	$A_{\text{тв}}$	$A_r$	$\Delta A$
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Груженный рейс	$\frac{1730}{100}$	$\frac{113}{6,53}$	$\frac{1076}{62,2}$	$\frac{276}{15,95}$	$\frac{32}{1,85}$	$\frac{22}{1,27}$	-	$\frac{60}{3,47}$	$\frac{151}{8,73}$
Порожный рейс	$\frac{190}{100}$	$\frac{7}{3,68}$	$\frac{-442}{-232,7}$	$\frac{136}{71,58}$	$\frac{5,5}{2,89}$	$\frac{25}{13,16}$	$\frac{370}{194,7}$	$\frac{25}{13,16}$	$\frac{63,5}{33,42}$
За цикл	$\frac{1920}{100}$	$\frac{120}{6,25}$	$\frac{634}{33,02}$	$\frac{412}{21,46}$	$\frac{37,5}{1,95}$	$\frac{47}{2,45}$	$\frac{370}{19,27}$	$\frac{85}{4,43}$	$\frac{214,5}{11,17}$

К основным факторам, определяющим структуру расхода электроэнергии по составляющим и энергоёмкости перевозок, следует отнести, в первую очередь, спрямленный уклон маршрута. Увеличение перепада высот, на которых расположены пункты погрузки и разгрузки, при прочих равных условиях приводит к росту энергоёмкости перевозок и росту удельного веса работы по изменению потенциальной энергии поезда  $A_{\text{п}}$ .

Снижение приведенного уклона пути на маршруте сопровождается уменьшением доли составляющей  $A_{\text{п}}$  и возрастанием удельного веса других составляющих.

Определенное влияние оказывает уровень средней скорости движения. С ее уменьшением несколько снижается составляющая  $A_{w_o}$  и заметно возрастает (как по абсолютной величине, так и по удельному весу) расход на собственные нужды.

По этой причине в ряде случаев (например, при использовании тяговых агрегатов ПЭ2<sup>М</sup>), абсолютна величина и удельный вес составляющих  $A_{w_o}$ ,  $\Delta A$  и  $A_{\text{сн}}$  зависят от уровня используемого напряжения в системе электропитания тягового подвижного состава.

Из приведенных данных можно заключить, что при действующих схемах транспортировки горной массы независимо от характеристик профиля маршрутов резервы снижения расхода электроэнергии на тягу следует

искать на пути снижения затрат на собственные нужды  $A_{\text{сн}}$  и уменьшения потерь энергии в электроподвижном составе  $\Delta A$  и на вредных спусках  $A_{\text{тв}}$ .

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Правила тяговых расчетов для поездной работы промышленных электровозов постоянного тока [Текст] / Госстрой СССР, ПромтрансНИИпроект вып. 4322. 1977. – М.: Транспорт, 1977. – Вып. 578. – С. 57-74.
2. Петров, Ю. П. Оптимальное управление движением транспортных средств [Текст] / Ю. П. Петров. – Л.: Энергия, 1969. – 96 с.
3. Обухов, В. П. Аналитический метод оперативного нормирования расхода электроэнергии на тягу поездов [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / В. П. Обухов. – М.: МИИТ, 2002. – 132 с.
4. Бакланов, А. А. Расход энергии на преодоление основного сопротивления движению поезда [Текст] / А. А. Бакланов // Сб. «Исследование работы электрооборудования и вопросы прочности электроподвижного состава». – Омск, 1979. – С. 54-59.
5. Правила тяговых расчетов для поездной работы [Текст]. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.
6. Розенфельд, В. Е. Теория электрической тяги [Текст] / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров. – М.: Транспорт, 1983. – 328 с.

Поступила в редколлегию 14.04.2010.  
Принята к печати 27.04.2010.