

Г. К. ГЕТЬМАН, В. Е. ВАСИЛЬЕВ (ДНУЖТ)

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна 2, г. Днепропетровск, Украина, 49010, тел. (056)373-15-31, эл.почта: getman-gk@i.ua, [wasiljew@ukr.net](mailto:wasiljew@ukr.net),  
ORCID: [orcid.org/0000-0002-3471-6096](http://orcid.org/0000-0002-3471-6096), [orcid.org/0000-0001-7551-2332](http://orcid.org/0000-0001-7551-2332)

## О ВОЗМОЖНОСТИ СНИЖЕНИЯ РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ТЯГУ КАРЬЕРНЫХ ПОЕЗДОВ ЗА СЧЕТ ЧАСТИЧНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ ЧАСТИ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

### Введение

Издержки на возмещение затрат энергоносителей на транспортировку горной массы составляют ощутимую долю эксплуатационных расходов предприятий по открытой добыче полезных ископаемых. В связи с этим внедрение электрической тяги на горнодобывающих предприятиях всегда сопровождалось поиском резервов экономии электроэнергии на тягу поездов и разработкой технико-организационных мероприятий по их реализации.

Особую актуальность вопросы повышения энергетической эффективности железнодорожных перевозок приобрели в последние десятилетия в связи с удорожанием топливно-энергетических ресурсов как в нашей стране, так и за рубежом [1, 2].

### Обзор литературы

Проблема снижения энергоемкости железнодорожных перевозок возникла одновременно с внедрением электрической тяги и большинство её аспектов характеризуется достаточно глубокой степенью разработанности. Вместе с тем ряд задач этой проблемы остаются актуальными.

В связи с этим необходимость снижения энергоемкости перевозок и на сегодня определяет приоритетные направления совершенствования систем электрической тяги как в нашей стране [1], так и за рубежом [2].

Анализ энергетики движения поезда показывает [3, 4], что при фиксированных основных параметрах перевозочного процесса (масса поезда, техническая или участковая скорость движения) повышения энергоэффективности перевозок, оцениваемую по величине расхода электроэнергии на токоприемнике, можно достичь за счет:

- снижения потерь энергии в силовых и вспомогательных электрических цепях электроподвижного состава;

- увеличения части потенциальной и кинетической энергии поезда, расходуемых в процессе движения на преодоление сил сопротивления движению (снижение потерь энергии в тормозах);

- минимизации работы сил сопротивления движению поезда путем снижения абсолютной величины основного сопротивления движению поезда и оптимизации режимов его движения.

Перечисленные выше задачи на стадии разработки и создания электроподвижного состава решаются за счет повышения энергоэффективности используемого на нем тягового электрооборудования [5], а при организации перевозок - за счет оптимизации режимов вождения поездов [2].

О возможности экономии электроэнергии за счет отключения части тяговых двигателей (или части тяговых единиц в случае кратной тяги) на легких элементах профиля или при вождении неполновесных поездов известно из классических трудов по электрической тяге [6, 7] и применительно к магистральным железным дорогам возможность реализации этой идеи широко обсуждалась в технической литературе [8, 9]. Вместе с тем для условий эксплуатации карьерного транспорта этот вопрос, насколько известно авторам, детально не исследовался. Не рассматривался также вопрос о влиянии уровня напряжения в контактной сети на расход электроэнергии на тягу карьерных поездов.

### Постановка задачи

Настоящая статья посвящена вопросам снижения энергоемкости перевозок горной массы на электрифицированных ж.д. путях предприятий по открытой добыче полезных ископаемых. Применительно к тяговым агрегатам постоянного тока рассмотрена возможность снижения

затрат электроэнергии на тягу (на токоприемнике) за счет частичного отключения тяговых двигателей, а также взаимосвязь удельного расхода электроэнергии и уровня напряжения в контактной сети.

Расчеты выполнены применительно к условиям эксплуатации карьерного транспорта постоянного тока на предприятиях по открытой добыче полезных ископаемых.

### Основной материал

Как показано в [8], возможность экономии электроэнергии на тягу за счет отключения части тяговых двигателей можно получить путем сопоставления удельных расходов электроэнергии для сравниваемых вариантов тяги. Поскольку на энергоёмкость транспортировки влияет большое количество факторов (тип подвижного состава, составность поезда, характеристики профиля и плана пути маршрутов, уровень напряжения в контактной сети и многие другие), задачу целесообразно решать применительно к условиям работы карьерного электротранспорта на конкретном предприятии. При этом в качестве исходных данных следует принять:

- характеристики тягового подвижного состава;
- характеристики прицепной части поезда (тип и количество вагонов, степень использования их грузоподъемности);
- уровень используемого напряжения в контактной сети и род тока.

Ниже в качестве примера будут приведены результаты расчетов для тяговых агрегатов типа ПЭ2<sup>М</sup>.

Удельный расход электроэнергии можно установить, определив последовательно для каждого варианта:

- энергетические характеристики электроподвижного состава;
- установившуюся скорость движения поезда на рассматриваемом участке;
- удельный расход электроэнергии на тягу.

Энергетическими характеристиками принято называть зависимости отнесенного к единице транспортной работы расхода электроэнергии от скорости движения для используемых позиций регулирования мощности тяговых двигателей.

Если в качестве измерителя транспортной работы принят 1 поездо-километр, то удельный расход электроэнергии  $a_s$  и энергетические характеристики  $a_{sm}(v)$  не содержат в качестве аргумента массу поезда. Если же расход энер-

гии отнести к 1 т·км, то каждому значению массы поезда будет соответствовать своя энергетическая характеристика  $a_{sm}(v)$ .

Энергетические характеристики можно построить по токовым характеристикам электроподвижного состава, поскольку удельные расходы электроэнергии  $a_s$  (Вт·ч/поездо·км) и  $a_{sm}$  (Вт·ч/т·км) определены как:

$$a_s = \frac{U_{кc} I_{\Sigma} 10^{-3}}{v}; \quad a_{sm} = \frac{U_{кc} I_{\Sigma}}{vm}, \quad (1)$$

где  $I_{\Sigma}$  – потребляемый из контактной сети ток, А;

$U_{кc}$  – напряжение контактной сети, В;

$v$  – скорость движения поезда, км/ч;

$m$  – масса поезда, т.

На рис. 1 для примера утолщенными линиями показаны энергетические характеристики  $a_{sm}(v)$  тягового агрегата ПЭ2<sup>М</sup> при питании от контактной сети 1500 В и 3000 В и числе используемых тяговых двигателей, равном 4, 8 и 12 ( $n$  – число включенных тяговых двигателей,  $i$  – величина уклона, ‰, масса поезда 730 т).

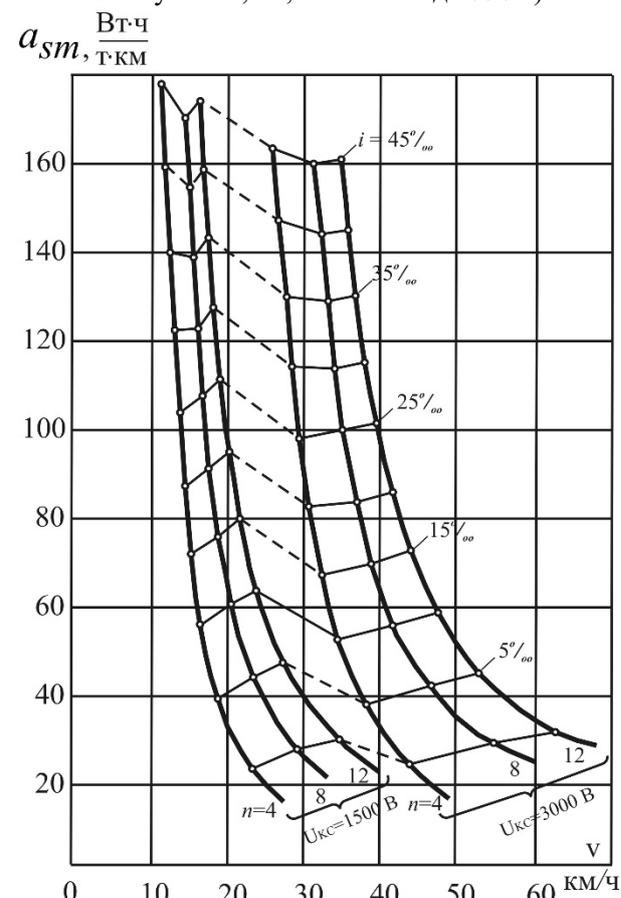


Рис. 1. Энергетические характеристики тягового агрегата ПЭ2<sup>М</sup>

Энергетические характеристики позволяют определить удельный расход электроэнергии на тягу по известной скорости движения (см. рис. 1). Последняя есть решением уравнения

$$F_k(v) - W_k(v) = 0, \quad (2)$$

где  $F_k$  – сила тяги, Н;

$W_k$  – полное сопротивление движению поезда, Н;

$v$  – скорость движения, км/ч.

Установившуюся скорость движения можно определить графическим, совместив графики тяговой характеристики  $F_k(v)$  и кривые  $W_k(v)$ , как показано на рис. 2.

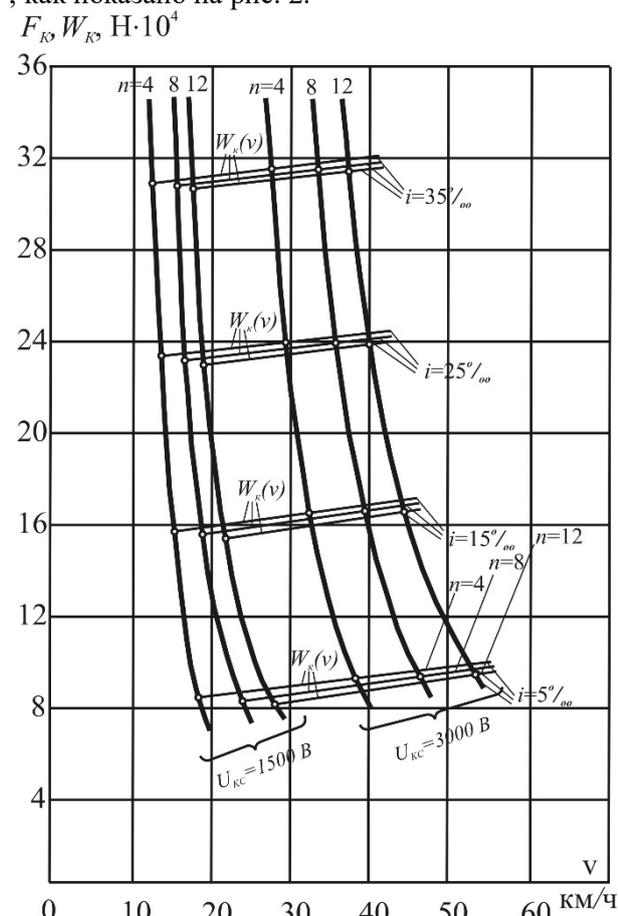


Рис. 2. Графический способ определения установившейся скорости движения

Графический способ прост и нагляден, однако весьма трудоемок и, главное, не гарантирует высокой точности результатов.

Вместе с тем экономия электроэнергии при частичном отключении тяговых двигателей обычно не превышает нескольких процентов, поэтому при решении таких задач важно, чтобы расчетный метод не вносил дополнительных погрешностей в расчеты.

При использовании средств вычислительной техники погрешность расчетных результатов

зависит от погрешности определения силы сопротивления движению  $W_k$  и силы тяги  $F_k$ .

Для определения  $W_k$  практически нет другой возможности, как построить расчет на использовании рекомендованных Правилами тяговых расчетов [10] аналитических зависимостей для расчета основного сопротивления движению.

В этом случае применительно к тяговому агрегату ПЭ2<sup>М</sup> полное сопротивление движению поезда при различном числе включенных двигателей определяется следующим образом:

$$W_{k4} = m_{\text{ЭУ}}(w'_0 + w_i) + 2m_{\text{МД}}(w_x + w_i) + m_{\text{ПР}}(w''_0 + w_i), \quad \text{Н}; \quad (3)$$

$$W_{k8} = (m_{\text{ЭУ}} + m_{\text{МД}})(w'_0 + w_i) + m_{\text{МД}}(w_x + w_i) + m_{\text{ПР}}(w''_0 + w_i), \quad \text{Н}; \quad (4)$$

$$W_{k12} = (m_{\text{ЭУ}} + 2m_{\text{МД}})(w'_0 + w_i) + m_{\text{ПР}}(w''_0 + w_i), \quad \text{Н}, \quad (5)$$

где  $W_{k4}$ ,  $W_{k8}$  и  $W_{k12}$  – сопротивление движению поезда при использовании соответственно 4-х, 8-ми и 12-ти тяговых двигателей;

$w'_0$  и  $w_x$  – основное удельное сопротивление движению тягового агрегата соответственно под током и без тока, Н/т;

$w''_0$  – основное удельное сопротивление движению состава, Н/т;

$w_i$  – сопротивление движению от уклонов, Н/т;

$m_{\text{ЭУ}}$  – масса электровоза управления, т;

$m_{\text{МД}}$  – масса моторного думпкара, т;

$m_{\text{ПР}}$  – масса прицепной части поезда (состава), т.

Удельное основное сопротивление движению  $w'_0$ ,  $w_x$ ,  $w''_0$  и  $w_i$  определяется согласно рекомендациям [10].

Иначе обстоит дело с расчетом силы тяги. Если, как обычно при производстве тяговых расчетов, использовать паспортные характеристики электроподвижного состава (заданные таблично или в виде аппроксимирующих аналитических выражений), то при вариации нагрузочных режимов двигателей в широких

пределах, нельзя получить требуемую при выполнении подобных задач точность расчетов.

Сказанное объясняется, главным образом, тем, что паспортные тяговые характеристики (или их аналитические выражения) получены в предположении о независимости потерь в тяговом двигателе и зубчатой передаче от величины напряжения на коллекторе. Такое упрощение задачи, как можно судить на основании приведенных в [11] характеристик двигателя ТЛ-2К, могут привести при определении силы тяги и к.п.д. к ошибкам, достигающим нескольких процентов. При решении же вопросов, связанных с экономией электроэнергии, точность определения к.п.д. электроподвижного состава должна быть не ниже, чем 0,5% [12].

Чтобы обеспечить указанную точность, расчет характеристик тяговых двигателей должен базироваться на результатах их квалификационных испытаний и рекомендаций ГОСТ 2582-81.

С целью упрощения процедуры алгоритмизации решения задачи установившуюся скорость движения, как показал анализ, целесообразно определять не из уравнения (2), а как решение уравнения

$$F_k(I) - W_k(v(I)) = 0, \quad (6)$$

где  $I$  – ток якоря тягового двигателя, а  $W_k(v(I))$  – представленное в функции тока якоря полное сопротивление движению поезда.

Полное сопротивление движению поезда, представленное в виде функции тока якоря  $W_k(I)$  можно найти как

$$W_k(I) = m[w_o(v(I)) - w_i], \quad (7)$$

где  $w_o$  – основное удельное сопротивление движению поезда, Н/т;

$w_i$  – сопротивление движению от уклонов, Н/т;

$m$  – масса поезда, т;

При таком подходе задача сводится фактически к определению тока установившегося режима путем совмещения графиков  $F_k(I)$  и  $W_k(I)$  как показано на рис. 3 ( $n$  – число включенных тяговых двигателей). Упрощение процедуры решения задачи обусловлено возможностью использования в расчетах зависимости скорости движения от тока якоря.

$F_k, W_k, Н \cdot 10^4$

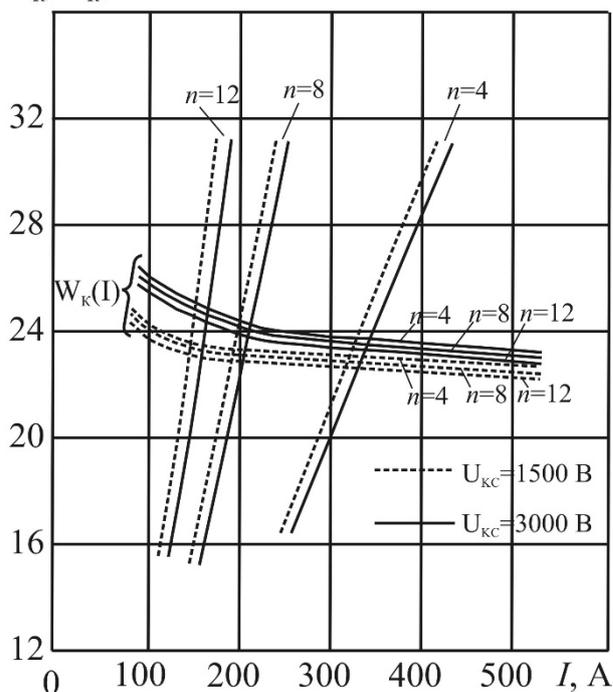


Рис. 3. Определение тока установившегося режима

При машинном счете ток установившегося режима определяется как нуль функции (6). С этой целью можно использовать любой известный способ приближенного нахождения корней уравнений и оценки степени их точности, например, метод половинного деления.

При алгоритмизации решения задачи следует иметь в виду, что:

- функция (3) в интервале  $0 < I < \infty$  определена, непрерывна и имеет лишь один корень;
- область допустимых решений определена установленными наибольшими допустимыми значениями скорости движения, тока якоря тягового двигателя и расчетной силы сцепления.

При решении задачи для выбранного варианта исходных данных (напряжение в контактной сети  $U_{kc}$ , число включенных тяговых двигателей и тип подвижного состава) на каждом шаге расчета, т.е. для каждого значения тока, последовательно определяются:

- магнитный поток (в виде удельной э.д.с.  $c_e \Phi$ , частота вращения вала тягового двигателя и скорость движения электровоза;
- потери холостого хода и добавочные потери;
- потери в тяговом редукторе;
- расчетная сила тяги двигателя и электровоза;
- полное сопротивление движению поезда.

Для определения характеристик  $v(I)$  и  $F_{\text{кд}}(I)$  используются известные расчетные выражения:

$$v = 0.1885 \frac{D_{\text{к}}}{\mu} \cdot \frac{U - Ir}{c_e \Phi};$$

$$F_{\text{к}} = n \left( \frac{2\mu}{D_{\text{к}}} \cdot c_e \Phi I - \Delta F \right),$$

где  $v$  – скорость движения, км/ч;

$D_{\text{к}}$  – диаметр круга катания движущих колес, м;

$\mu$  – передаточное число тягового редуктора;

$F_{\text{кд}}$  – расчетная сила тяги движущей оси, Н;

$\Delta F$  – снижение расчетной силы тяги от потерь энергии в двигателе и тяговой передаче, Н;

$I$  – ток цепи якоря, А;

$U$  – напряжение на зажимах двигателя, В;

$r$  – активное сопротивление обмотки якоря двигателя, Ом;

$c_e$  – конструктивная постоянная;

$\Phi$  – магнитный поток, Вб;

$n$  – число движущих осей.

Магнитная характеристика тягового двигателя  $c_e \Phi(I_{\text{в}})$  представляется в табличной форме. Для определения промежуточных значений  $c_e \Phi$  можно использовать интерполяционную формулу Лагранжа. Причем, поскольку природа магнитной характеристики такова, что ее график представляет собой плавную линию, для определения промежуточных значений  $c_e \Phi$ , как показали расчеты, достаточно в качестве интерполяционной формулы применить полином второй степени.

При определении коэффициентов интерполяционных формул в расчет принимаются узлы интерполяции, принадлежащие интервалу, содержащему табличное значение тока возбуждения и в наибольшей мере приближенные к его значению на данном шаге расчета. Если таковым оказывается первое или последнее значение тока возбуждения в исходной зависимости  $c_e \Phi(I_{\text{в}})$ , то для расчета используют координаты трех первых или трех последних узлов.

Снижение расчетной силы тяги двигателя  $\Delta F$ , в Н, определяется как [4]

$$\Delta F = 3,6 \frac{p_{\text{хх}} + p_{\text{доб}} + p_{\text{зп}}}{v}, \quad (8)$$

где  $p_{\text{хх}}$  – потери холостого хода, Вт;

$p_{\text{доб}}$  – добавочные потери, Вт;

$p_{\text{зп}}$  – потери в зубчатой передаче и моторно-осевых подшипниках, Вт;

$v$  – скорость движения в км/ч.

При расчете к.п.д. тягового двигателя падение напряжения в контакте щеток и коллектора согласно ГОСТ 2582-81 принимается равным 2 В, а сопротивление цепи якоря – при температуре обмоток, равной 115°C.

Зависимость потерь холостого хода от тока возбуждения и частоты вращения ротора  $p_{\text{хх}}(I_{\text{в}}, n)$ , определяются по данным протоколов квалификационных испытаний тягового двигателя.

Нетабличные значения  $p_{\text{хх}}$  вычисляются методом интерполяции функции двух переменных. Вычислительный алгоритм предусматривает интерполирование зависимости  $p_{\text{хх}}(I_{\text{в}}, n)$  последовательно по обоим аргументам. В качестве интерполирующей зависимости при организации процедуры интерполяции по каждому аргументу используется полином второй степени. Узлы интерполяции на каждом шаге интерполирования выбираются так же, как и при вычислении  $c_e \Phi$ .

Механические потери (потери холостого хода при  $I_{\text{в}} = 0$ ) тягового двигателя целесообразно представить аналитическим выражением в виде степенного полинома второй степени. Для тягового двигателя ДТ-9Н на основании данных, приведенных в [13], имеем выражение

$$p_{\text{мх}} = 1,63n + 4,23 \left( \frac{n}{100} \right)^2 + 0,761 \left( \frac{n}{100} \right)^3, \quad \text{Вт} \quad (9)$$

где  $n$  – частота вращения вала двигателя в об/мин.

Добавочные потери согласно ГОСТ 2582-81 определяются как

$$p_{\text{доб}} = p_{\text{доб}}^* p_{\text{мг}}, \quad (10)$$

где  $p_{\text{мг}}$  – магнитные потери;

$p_{\text{доб}}^*$  – отношение добавочных потерь к магнитным.

Приведенная в ГОСТ 2585-81 зависимость  $p_{\text{доб}}^*$  от выраженного в долях номинального

значения тока возбуждения  $I_B^*$  с приемлемой точностью аппроксимируется аналитическим выражением

$$P_{\text{доб}}^* = 0,224 - 0,0627I_B^* + 0,139I_B^{*2} \quad (11)$$

Магнитные потери равны разности потерь холостого хода и механических потерь, т.е.

$$P_{\text{МГ}} = P_{\text{ХХ}} - P_{\text{Мех}}. \quad (12)$$

Потери в месте контакта щеток определяются, исходя из падения напряжения на нем 2 В.

Потери в зубчатой передаче и моторно-осевых подшипниках

$$P_{\text{зп}} = p_{\text{зп}}^* P_{\text{под}}, \quad (13)$$

где  $P_{\text{под}}$  – подведенная к двигателю мощность;

$p_{\text{зп}}^*$  – потери в зубчатой передаче, отнесенные к  $P_{\text{под}}$ .

Величина  $p_{\text{зп}}^*$  определяется по приведенной в ГОСТ2585-81 зависимости  $p_{\text{зп}}^*(P_{\text{под}}^*)$ , где  $P_{\text{под}}^*$  – отнесенная к единице номинальной мощности двигателя подведенная мощность. Указанная зависимость может быть представлена аналитическими выражениями:

$$\begin{aligned} (P_{\text{под}}^* < 0.75): p_{\text{зп}}^* &= 0,1792 - \\ &- 0,477P_{\text{под}}^* + 0,3646P_{\text{под}}^{*2}, \\ (P_{\text{под}}^* \geq 0.75): p_{\text{зп}}^* &= 0,247 - \\ &- 0,00334P_{\text{под}}^* + 0,004289P_{\text{под}}^{*2}. \end{aligned} \quad (14)$$

В результате решения уравнения (6) для каждого из выбранных значений уклона определяется установившаяся скорость движения, и ток двигателя, а формулам (2) соответствующий им удельный расход электроэнергии на тягу.

Расход электроэнергии на собственные нужды в Вт·ч/т·км определяется как

$$a_{\text{сн}} = \frac{10^3 P_{\text{сн}}}{mv}, \quad (15)$$

где  $P_{\text{сн}}$  – расчетная мощность потребителей цепей собственных нужд, кВт.

Решение задачи применительно к вариантам, отличающимся количеством используемых тяговых двигателей и напряжением на токоприемнике, можно представить в виде графиков, показанных для примера на рис. 1.

Как можно видеть, эти графики дают возможность оценить изменение энергоемкости перевозок, обусловленное изменением напряжения в контактной сети с 1500 В до 3000 В и отключением части тяговых двигателей при каждом уровне напряжения в сети.

Относительная разность расхода электроэнергии в %:

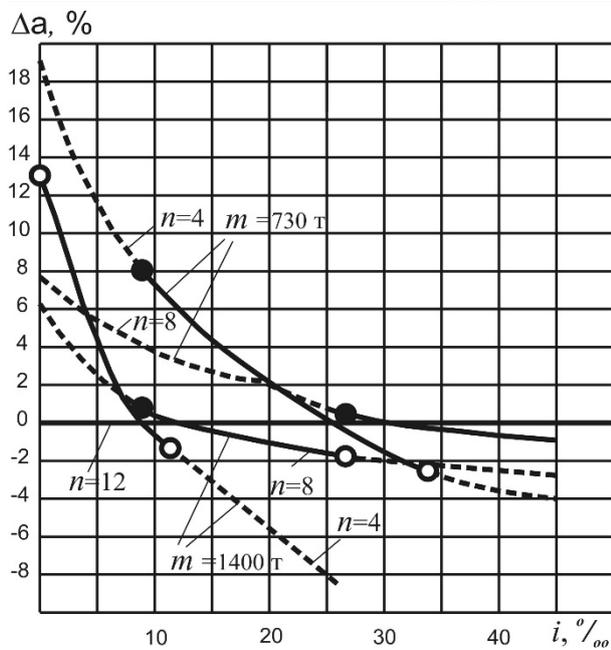
$$\Delta a = 100 \frac{a_1 - a_2}{a_1}, \quad (16)$$

где  $a_1$  и  $a_2$  удельный расход электроэнергии сравниваемых вариантов.

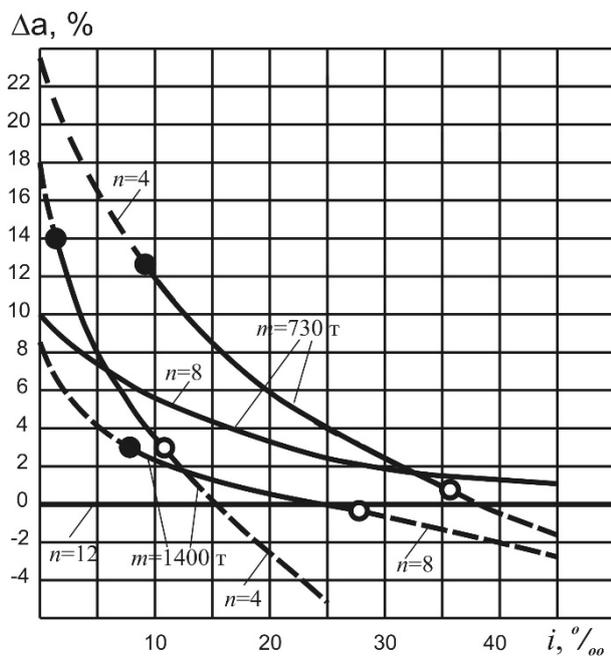
На практике обычно рассматривается вождение поездов на конкретном участке, поэтому решение предпочтительнее представить не в виде приведенных на рис. 1 графиков, а в виде зависимости относительной разности расхода энергии  $\Delta a$  от уклона пути  $i$ , как показано на рис. 4.

Как уже отмечалось, графики рис.4, рассчитанные рассмотренным выше способом, соответствуют случаю, когда прицепная часть поезда состоит из девяти вагонов-самосвалов типа 2ВС105. В этом случае расчетная масса поезда составляет 1400 т при tare 730 т.

Зависимости  $\Delta a(i)$  определяют для поезда заданной массы снижение ( $\Delta a > 0$ ) или увеличение ( $\Delta a < 0$ ) расхода электроэнергии, вызванное отключением части тяговых двигателей. На рис. 4 затушёванные точки соответствуют ограничению по скорости движения 35 км/ч, а не затушёванные - ограничению по току двигателя 400 А.



а) – без учета расхода энергии на собственные нужды



б) – с учетом расхода энергии на собственные нужды

Рис. 4. Зависимость разности расхода электроэнергии на тягу от уклона пути при напряжении в контактной сети 3000 В

Подобные представленным на рис. 4 зависимости были рассчитаны для ряда значений напряжения в контактной сети (от 2200 В до 3700 В), а также для массы поездов (1400 т), соответствующих транспортировке вскрыши. Проведено также сравнение энергоемкости перевозок при работе тяговых агрегатов на участках с напряжением в контактной сети 1500 В и 3000 В (см. рис. 5).

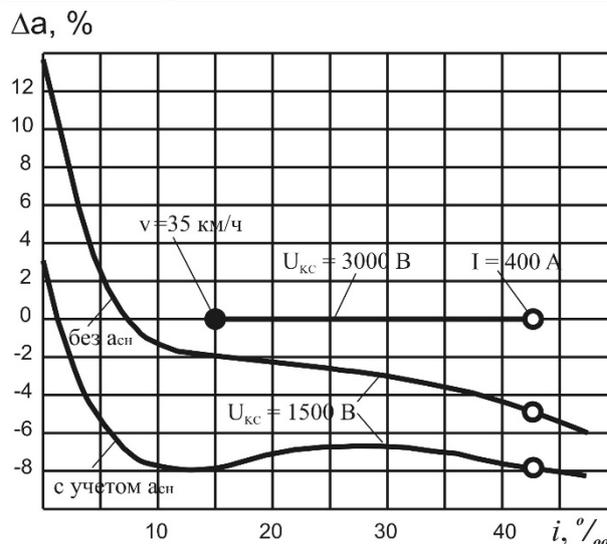


Рис. 5. Сопоставление расхода электроэнергии на тягу (на токоприемнике) при  $U_{кк} = 3000$  В и  $U_{кк} = 1500$  В

Анализ полученных данных позволил сделать следующие выводы.

### Выводы

1. На постоянных путях откатки карьеров с уклонами 15÷40 ‰ для тяговых агрегатов ПЭ2<sup>М</sup> наиболее выгоден режим работы на последовательно – параллельном соединении с включением всех тяговых двигателей. Движение на последовательном соединении сопровождается ростом расхода электроэнергии на тягу на 2-4 ‰. При учете затрат на собственные нужды разница расходов энергии на этих режимах достигает 6-10%.

2. Приведенные в п. 1 выводы справедливы при изменении напряжения в контактной сети в допустимых пределах (3,7÷2,2 кВ). С понижением напряжения работа на последовательном соединении становится все более «невыгодной» (расход энергии на 10-13% больше, чем при работе на последовательно – параллельном соединении).

3. На постоянных путях откатки с уклонами до 15‰ для ведения груженных

поездов целесообразно использовать 4 или 8 двигателей. Снижение затрат энергии составляет 2÷10%.

4. При движении без груза на участках с уклонами  $i \leq 30$ ‰ целесообразно использование 8 тяговых двигателей.

5. Расход электроэнергии (на токоприемнике) на транспортировку горной массы на постоянных путях откатки при повышении напряжения в контактной сети с 1500 В до 3000 В снижается на 4-8 ‰.

6. Приведенные выше выводы соответствуют установившимся режимам ( $v=\text{const}$ ) движения поезда, поэтому в каждом конкретном случае реальное снижение затрат электроэнергии, ко-

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Курбасов А.С. Электровозы нового поколения как фактор улучшения базовых показателей работы железных дорог. / А.С. Курбасов // Железнодорожный транспорт. – 2003. – №10. – С. 55-58.
2. Ясукава С. Энергосберегающие методы управления движением высокоскоростных поездов / С Ясукава, С. Като // Железные дороги мира. -1990. №7.-С. 43-46
3. Гетьман Г.К., Васильев В.Е. Анализ расхода электроэнергии на тягу карьерных поездов. / Г. К. Гетьман, В. Е. Васильев. // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. какад. В.Лазаряна. - 2011.Вип. 36.С.70-74.
4. Гетьман Г.К. Теорія електричної тяги [Текст]: підручник: у 2 т. / Г. К. Гетьман. – Д. : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2014. – Т. 1. – 2014. – 578 с.
5. Бочаров В. И. и др. Тяговые двигатели электровозов. Новочеркасск: Агенство Наутилус. - 1998.-672с.
6. Розенфельд В.Е. Электрическая тяга поездов. / В. Е. Розенфельд, Ю. Е. Равкин, И. А. Лакштовский. – М.: Государственное транспортное железнодорожное издательство. - 1940. – 799 с.
7. Розенфельд В. Е. Теория электрической тяги. / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров. - М.: Транспорт. - 1983. -328 с.
8. Гетьман Г. К. О расчетном определении экономии электроэнергии при частичном отключении тяговых двигателей электроподвижного состава. / Г.К. Гетьман, В.Е. Васильев. //Электрификация транспорта. – 2013. - №5. С. 25-32.
9. Гетьман Г. К. Еще раз об определении экономии электроэнергии на тягу за счет частичного отключения тяговых двигателей электроподвижного состава. / Г. К. Гетьман, В. Е. Васильев // Наука та прогресс транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна : зб. наук. пр. – 2013. – Вип. 5(47). – С. 47-57.
10. Правила тяговых расчетов для поездной работы промышленных электровозов постоянного тока. – Госстрой СССР, ПромтрансНИИпроект вып. 4322. – М. – 1977. - 230 с.
11. Справочник по электроподвижному составу, тепловозам и дизельпоездам. Том 1. – М.: Транспорт. – 1976. - 431 с.
12. ГОСТ 2582-81. Машины электрические тяговые. Общие технические требования. Введ. 1981-01-01. – М.: Издательство стандартов. – 1981. – 27 с.
13. Типовые испытания тягового двигателя ДТ9Н. ВЭЛНИИ. Технический отчет ЭМ-4Т-69. Новочеркасск. – 1969. – 32 с.

Поступила в печать 01.12.2012.

торое может быть получено за счет отключения части тяговых двигателей, следует определять путем производства тяговых расчетов и проведения тягово-эксплуатационных испытаний.

REFERENCES

1. Kurbasov A.S. Elektrovozyi novogo pokoleniya kak faktor uluchsheniya bazovyih pokazateley raboty zheleznnyih dorog [Electric locomotives of the new generation as a factor in improving the basic performance of the railways]. *Zheleznodorozhnyiy transport – Railway transport* , 2003, no. 10, pp. 55-58.
2. Yasukava S., Kato S. Energoberegayuschie metodyi upravleniya dvizheniem vyisokoskorostnyih poezdov [Energy-saving methods of traffic control high-speed trains]. *Zheleznnye dorogi mira - Railways of the World*, 1990, no. 7, pp. 43-46.
3. Getman G.K., Vasilev V.E. Analiz rashoda elektroenergii na tyagu karernyih poezdov [Analysis of energy consumption for traction trains career] *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 36, pp. 70-74.
4. Getman G.K. *Teoriya elektrichnoyi tyagi* [Theory of electric traction]. Dnipropetrovsk, DNURT Publ., 2014. 578 p.
5. Bocharov V. I. *Tyagovyye dvigateli elektrovovoz* [Electric traction motors]. Novocherkassk, Aгенstvo Nautilus Publ., 1998. 672 p.
6. Rozenfeld V.E., Ravkin Yu. E., Lakshtovskiy I. A. *Elektricheskaya tyaga poezdov* [Electric traction of trains]. Moscow, Gosudarstvennoe transportnoe zheleznodorozhnoe izdatelstvo Publ., 1940. 799 p.
7. Rozenfeld V. E., Isaev I. P., Sidorov N. N. *Teoriya elektricheskoy tyagi* [Theory of electric traction]. Moscow, Transport Publ., 1983. 328 p.
8. Getman G. K., Vasilev V. E. O raschetnom opredelenii ekonomii elektroenergii pri chastichnom otklyuchenii tyagovyih dvigateley elektropodvizhnogo sostava [Estimated determining energy savings at partial disabling the traction motors of electric rolling stock]. *Elektrifikatsiya transporta – Electrification of transport*, 2013, no. 5, pp. 25-32.
9. Getman G. K., Vasilev V. E. Esche raz ob opredelenii ekonomii elektroenergii na tyagu za schet chastichnogo otklyucheniya tyagovyih dvigateley elektropodvizhnogo sostava [Once again, the definition of energy savings in the draft due to the partial shutdown of traction motors of electric rolling stock]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2013, issue 5(47), pp. 47-57.
10. *Pravila tyagovyih raschetov dlya poezdnoy raboty promyishlennyih elektrovovozov postoyannogo toka* [Terms traction calculations for train operation of industrial DC electric]. PromtransNIIProekt vyip Publ.,

© Гетьман Г. К., Васильев В. Е., 2015

1977, 230 p.

11. *Spravochnik po elektropodvizhnomu sostavu, teplovozam i dizelpoezdam* [Handbook of electric rolling stock, locomotives and diesel trains]. Moscow, Transport Publ., 1976, 431 p.

12. GOST 2582-81. *Mashinyi elektricheskie tyagovyye. Obschie tehniccheskie trebovaniya*. [State standart Machines the electric hauling. General technical requirements]. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 1981, 27 p.

13. *Tipovyye ispytaniya tyagovogo dvigatelya DT9N* [Type testing traction motor DT9N]. Novocherkassk, 1969, 32 p.

Внутренний рецензент *Сыченко В.Г.*Внешний рецензент *Синчук О.Н.*

Важнейшей задачей локомотивного хозяйства в условиях рыночных отношений является сокращение расхода электрической энергии на тягу поездов. Особую актуальность это имеет не только для грузового движения, которое является основным на железных дорогах Украины, но и для карьерного транспорта. В последние годы удалось добиться некоторого снижения удельного расхода электроэнергии и эта тенденция должна быть сохранена и усилена в последующие годы. Большое значение здесь имеет совершенствование способов определения и реализации резервов экономии электроэнергии.

В статье рассматривается методика определения расхода электроэнергии на тягу поездов в установленных режимах движения, которая может найти применение при определении эффективности ряда мероприятий по снижению энергоёмкости перевозок, или задач нормирования энергозатрат. В качестве примера рассмотрены результаты решения задач о влиянии степени использования установленной мощности и уровня напряжения в контактной сети на затраты электроэнергии на тягу тяговыми агрегатами постоянного тока типа ПЭ2<sup>М</sup>.

**Ключевые слова:** норма расхода, карьерный транспорт, тяговый двигатель, электроэнергия, потери, собственные нужды, скорость движения.

УДК [629.423+620.92].004.18

Г. К. ГЕТЬМАН, В. Е. ВАСИЛЬЄВ (ДНУЗТ)

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна 2, м. Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. (056)373-15-31, ел.пошта: getman-gk@i.ua, [wasiljew@ukr.net](mailto:wasiljew@ukr.net),  
ORCID: [orcid.org/0000-0002-3471-6096](http://orcid.org/0000-0002-3471-6096), [orcid.org/0000-0001-7551-2332](http://orcid.org/0000-0001-7551-2332)

## ПРО МОЖЛИВІСТЬ ЗНИЖЕННЯ ВИТРАТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ТЯГУ КАР'ЄРНИХ ПОЇЗДІВ ЗА РАХУНОК ЧАСТКОВОГО ВІДКЛЮЧЕННЯ ЧАСТИНИ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ

Найважливішим завданням локомотивного господарства в умовах ринкових відносин є скорочення витрати електричної енергії на тягу поїздів. Особливу актуальність це має не тільки для вантажного руху, який є основним на залізницях України, але і для кар'єрного транспорту. В останні роки вдалося добитися деякого зниження питомої витрати електроенергії й ця тенденція повинна бути збережена й посилена в наступні роки. Велике значення тут має вдосконалювання системи нормування.

У статті розглядається методика визначення витрати електроенергії на тягу поїздів в ustalених режимах руху, яка може знайти застосування при визначенні ефективності ряду заходів щодо зниження енергоємності перевезень, або завдань нормування енерговитрат. Як приклад розглянутий результати розв'язку завдань про вплив ступеня використання встановленої потужності і рівня напруги в контактній мережі на витрати електроенергії на тягу тяговими агрегатами постійного струму типу ПЭ2<sup>М</sup>.

**Ключові слова:** норма витрати, кар'єрний транспорт, тяговий двигун, електроенергія, втрати, власні потреби, швидкість руху.

Внутрішній рецензент *Сиченко В.Г.*Зовнішній рецензент *Синчук О.М.*

UDC [629.423 - 620.92].004.18

G. K. GETMAN, V. E. VASILEV (DNURT)

Dnepropetrovsk national university of railway transport of the name of academician V. Lazaryana, street of Lazaryana 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. (056) 373-15-31, el.mail: getman-gk@i.ua, [vasiljev@ukr.net](mailto:vasiljev@ukr.net),  
ORCID: [orcid.org/0000-0002-3471-6096](http://orcid.org/0000-0002-3471-6096), [orcid.org/0000-0001-7551-2332](http://orcid.org/0000-0001-7551-2332)

## ABOUT POSSIBILITY OF DECLINE OF EXPENSE OF ELECTRIC POWER ON TRACTION OF QUARRY TRAINS FOR ACCOUNT OF PARTIAL DISCONNECTING OF PART OF HAULING ENGINES

The major task of locomotive economy in the conditions of market relations is reduction of expense of electric energy on traction of trains. The special actuality it has for freight motion that is basic on the railways of Ukraine. It was the last year succeeded to obtain some decline of specific expense of electric power and this tendency must be stored and in crease in subsequent years. A large value has perfection of the system of setting of norms here.

In the real article methodology of determination of expense of electric power is examined on traction of trains in the set modes of motion, that can find application at determination of efficiency of row of measures on the decline of power-hungryness of transportations, or tasks of setting of norms of expenses of energy. The results of decision of tasks are as an example considered about influence of degree of the use of the set power and level of tension in a pin network on the expenses of electric power on traction by the hauling aggregates of direct-current of type of ПЭ2<sup>М</sup>

**Keywords:** norm of expense, quarry transport, hauling engine, electric power, own needs, rate of movement.

Internal reviewer *Sichenko V.G.*

External reviewer *Sinchuk O.N.*