

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 629.423.1.076.004.18

Г. К. ГЕТЬМАН<sup>1</sup>, В. Е. ВАСИЛЬЕВ<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Электроподвижной состав железных дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 31, эл. почта wasiljew@ukr.net

<sup>1</sup>Каф. «Электроподвижной состав железных дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 31 эл. почта getman-gk@i.ua

### ЕЩЕ РАЗ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЭКОНОМИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ТЯГУ ЗА СЧЕТ ЧАСТИЧНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

**Цель.** Известные методы определения экономии электроэнергии за счет отключения части тяговых двигателей, основанные на сравнении их к. п. д. или мощности потерь энергии, в общем случае не позволяют получить объективную оценку полезности данного мероприятия, а в ряде случаев приводят к ошибочным результатам и заблуждениям. Необходим поиск новых, более совершенных методов определения экономии электроэнергии при частичном отключении тяговых двигателей. **Методика.** Предложен метод расчетного определения экономии электроэнергии при частичном отключении тяговых двигателей, базирующийся на использовании в качестве показателя рациональности режима нагружения расхода электроэнергии на измеритель перевозочной работы. **Результаты.** Приведены математические выражения, по которым возможно определить экономию электроэнергии как в относительных, так и в абсолютных величинах и установить условия (скорость движения и уклон пути), при которых экономия будет иметь место. **Научная новизна.** Предложена методика решения задачи, которая базируется не на сравнении к. п. д. или разности мощности потерь энергии, а на оценке разности расхода электроэнергии для сравниваемых вариантов. **Практическая значимость.** Приведенная методика позволяет получить более точные выводы в отношении расхода электроэнергии, поскольку сравнение мощности потерь энергии или к. п. д. не определяют однозначно расход электроэнергии на тягу, поэтому выводы, основанные на сравнении мощности потерь энергии или к. п. д., могут оказаться неточными.

**Ключевые слова:** расход электроэнергии; тяга поездов; электрическая тяга; отключение части тяговых двигателей

#### Введение

История применения электрической тяги неразрывно связана с поиском резервов снижения энергоемкости перевозок, поскольку издержки на возмещение затрат электроэнергии на тягу поездов составляют ощутимую долю эксплуатационных расходов железных дорог.

В связи с ростом цен на энергоносители вопросы энергоснабжения особую актуальность приобрели в последние десятилетия как в на-

шей стране, так и за рубежом [20–22]. Появились новые работы, посвященные исследованию различных аспектов этой проблемы [5, 9–11, 14]. В частности, возобновился интерес к хорошо известной специалистам-электротяговикам проблеме экономии электроэнергии на тягу поездов за счет частичного отключения тяговых двигателей, т. е. за счет регулирования величины используемой части установленной мощности.

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

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.

Идея способа базируется на том, что работа электровоза с поездами малого веса осуществляется при малых значениях тока, которым соответствуют пониженные значения к. п. д. тяговых двигателей. При отключении части тяговых двигателей ток оставшихся в работе двигателей увеличивается, что и обеспечивает реализацию заданного режима ведения поезда при более высоком к. п. д. электровоза.

Следует подчеркнуть, что возможность экономии электроэнергии за счет отключения части тяговых двигателей была подтверждена опытом эксплуатации на линиях, электрифицированных как на постоянном, так и на переменном токе [2, 6, 12, 15]. Аналогичные выводы получены также по результатам исследований, выполненных учеными ВНИИЖТа и его Уральского отделения, а также группой ученых ОМИИТа под руководством к. т. н. Р. Я. Медина [1, 14].

Однако в отношении целесообразности частичного отключения тяговых двигателей нет единого мнения среди специалистов-электро-тяговиков. В подтверждение сказанному можно назвать статью «И все же двигатели отключать не следует» [7], одним из авторов которой является известный специалист в области электрической тяги д. т. н. А. С. Курбасов. К этому следует добавить, что авторы некоторых публикаций отрицают саму возможность экономии электроэнергии указанным способом [11].

Противоречивость мнений по данному вопросу обусловлена, главным образом, несовершенством используемых при его решении методов.

Сказанное относится в равной мере как к ранее выполненным работам, так и к ряду исследований, опубликованных в последнее время. Это обстоятельство в сочетании с важностью задач, относящихся к поиску резервов экономии электроэнергии на тягу поездов, побудило авторов к рассмотрению в настоящей статье задач об определении экономии электроэнергии за счет частичного отключения тяговых двигателей, ранее обсуждавшихся в [3].

В выполненных исследованиях для подтверждения целесообразности отключения части тяговых двигателей используется два способа. Первый базируется на сравнении мощности потерь энергии в тяговых двигателях, а второй – на сравнении их к. п. д.

Более часто применение находит второй способ вследствие:

- доступности данных о к. п. д. тяговых двигателей, определение которых согласно ГОСТ 2582-81 входит в программу их квалификационных испытаний;
- простоты и наглядности сравнения вариантов, а также кажущейся убедительности выводов.

Например, в [18] на данных о к. п. д. основано сравнение экономичности работы электровоза серии ВЛ8 при использовании 8 и 6 тяговых двигателей. С этой целью для сравниваемых вариантов построены зависимости к. п. д.  $\eta$  тягового двигателя типа НБ-406 от тока электровоза  $I_s$ , как показано на рис. 1 (заимствован из [18]). Режимы ослабления возбуждения для каждого варианта выбраны так, чтобы получить для них максимально приближенные тяговые характеристики электровоза.

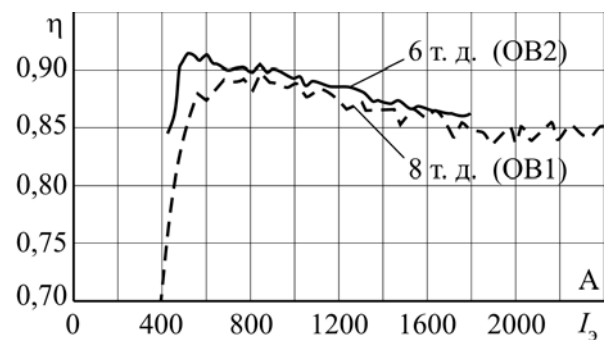


Рис. 1

На основании анализа графиков рис. 1 в [18] сделан вывод, что характеристика  $\eta(I_s)$  для случая работы электровоза ВЛ8 в режиме ОВ1 на восьми ТЭД (при напряжении на двигателе 1500 В) лежит несколько ниже той же характеристики электровоза при работе на шести двигателях в режиме ОВ2 при том же напряжении на ТЭД, а поэтому второй режим будет более экономичным – с более высоким к. п. д.

Приведенный пример наглядно демонстрирует преимущества рассмотренного способа решения задачи – простоту и наглядность.

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Однако заметим, что, если в цитированной работе под более экономичным понимается режим, обеспечивающий снижение расхода электроэнергии на тягу, то приведенное заключение, как будет показано ниже, не является бесспорным.

Первый из вышеперечисленных способов решения задачи, то есть путем сравнения мощности потерь энергии в тяговых двигателях, встречается реже, так как требует выполнения некоторого объема дополнительных вычислений.

Названные подходы к решению задачи приводят, как будет показано далее, к одинаковым результатам, однако ни один из них не позволяет однозначно установить предпочтительный по энергозатратам вариант, что может приводить к некорректным выводам, к ошибкам и заблуждениям.

## Цель

Целью данной работы является поиск новых, более совершенных методов определения экономии электроэнергии при частичном отключении тяговых двигателей.

## Методика

Пусть приведенные на рис. 2 кривые  $F_{k1}(v)$  и  $W_{k1}(v)$  представляют соответственно зависимости силы тяги и полного сопротивления движению поезда от скорости при числе включенных двигателей  $m = m_1$ , а кривые  $F_{k2}(v)$  и  $W_{k2}(v)$  – те же зависимости при  $m = m_2 \neq m_1$ . Причем, если  $m_1$  равно числу установленных на электровозе тяговых двигателей, то число отключенных двигателей равно  $m_1 - m_2$ . В этом случае при принятых в теории электрической тяги подходах к определению приведенных к ободу колес расчетных значений силы тяги и силы сопротивления движению имеет место неравенство  $W_{k2}(v) > W_{k1}(v)$ .

Точки пересечения зависимостей  $W_k(v)$  и  $F_k(v)$ , то есть кривых сопротивления движению и тяговых характеристик, определяют параметры (сила тяги и скорость) установившегося режима движения ( $F_{k1} = W_{k1}$ ,  $v_1$  и  $F_{k2} = W_{k2}$ ,  $v_2$ ).

Сила тяги электровоза, реализуемая при заданной скорости движения, определяется чис-

лом тяговых двигателей, уровнем напряжения на коллекторе и током возбуждения. Поэтому возможность реализации близких или совпадающих тяговых характеристик  $F_{k1}(v)$  и  $F_{k2}(v)$  при  $m = m_1$  и  $m = m_2$  зависит от используемого способа регулирования мощности тяги.

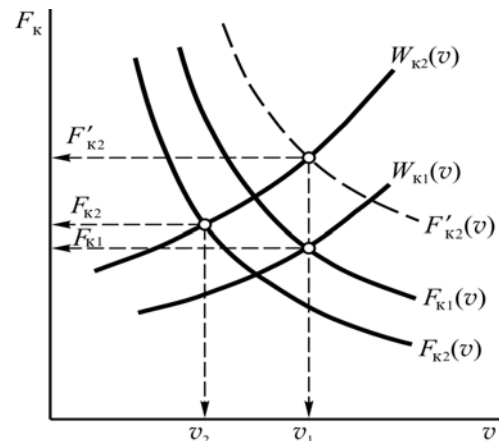


Рис. 2

Из рис. 2 следует, что при отключении части тяговых двигателей скорость движения можно сохранить неизменной, если обеспечить реализацию тяговой характеристики

$$F'_{k2}(v) = F_{k1}(v) + \Delta W(v) \text{ или}$$

$$F'_{k2}(v) = F_{k1}(v) + [W_{k2}(v) - W_{k1}(v)].$$

Увеличение силы тяги на  $\Delta W$  при неизменной скорости движения осуществимо на электроподвижном составе с плавным регулированием мощности тяги. При ступенчатом регулировании напряжения и тока возбуждения можно получить только близко расположенные характеристики  $F_{k1}(v)$  и  $F_{k2}(v)$ , но не совпадающие. Стало быть, применительно к эксплуатируемым в настоящее время электровозам серий ВЛ и ЧС следует исходить из того, что отключение части тяговых двигателей при прочих равных условиях обусловит изменение параметров режима движения – силы тяги и скорости. Так, если при частичном отключении тяговых двигателей тяговая характеристика соответствует показанной на рис. 2 кривой  $F'_{k2}(v)$ , то установившемуся режиму движения будет соответствовать сила тяги  $F_{k2} \neq F_{k1}$  и скорость  $v_2 \neq v_1$ .

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Опуская далее для краткости при обозначениях  $F_k$  и  $W_k$  индексы «к», представим потребляемую электровозом из контактной сети при  $m = m_1$  и  $m = m_2$  мощность как:

$$P_{31} = F_1 v_1 + P_1; P_{32} = F_2 v_2 + P_2,$$

где  $F_1$  и  $F_2$  – соответствующие  $m = m_1$  и  $m = m_2$  значения силы тяги;  $P_1$  и  $P_2$  – мощность суммарных потерь при  $m = m_1$  и  $m = m_2$  соответственно.

В выполненных ранее работах в качестве показателя целесообразности отключения части тяговых двигателей используют удельную величину – изменение мощности потерь энергии, выраженное в абсолютных или относительных единицах:

$$\Delta p = P_1 - P_2, \text{ кВт, или}$$

$$\Delta p^* = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \cdot 100, \% . \quad (1)$$

Значения  $P_1$  и  $P_2$  и их разность определяют как:

$$P_1 = m_1 p_1(v_1);$$

$$P_2 = (m_1 - m_2) p_{\text{мх}}(v_2) + m_2 p_2(v_2), \quad (2)$$

$$\Delta p = m_1 p_1(v_1) - [(m_1 - m_2) p_{\text{мх}}(v_2) + m_2 p_2(v_2)], \quad (3)$$

где  $p_1(v_1)$  и  $p_2(v_2)$  – суммарные мощности потерь в тяговом приводе одной оси при  $m = m_1$  и  $m = m_2$  и скорости движения  $v_1$  и  $v_2$  соответственно;  $p_{\text{мх}}(v_2)$  – механические потери в тяговом приводе оси при скорости движения  $v_2$ .

Отметим следующее, важное для дальнейшего изложения, обстоятельство.

В теории электрической тяги механические потери в отключенных тяговых двигателях принято учитывать путем увеличения основного сопротивления движению поезда на величину  $\Delta W$ , равную

$$\Delta W(v) = (m_1 - m_2) \frac{p_{\text{мх}}(v)}{v}. \quad (4)$$

Если воспользоваться расчетными выражениями для определения удельного основного сопротивления движению электровоза под током  $w'_o(v)$  и на выбеге  $w_x(v)$ , выраженного в ньютонах на килоньютон, то численное значение  $\Delta W$ , Н, можно рассчитать как

$$\Delta W(v) = \frac{9,81(m_1 - m_2)}{m_1} m_3 \times [w_x(v) - w'_o(v)], \quad (5)$$

где  $m_3$  – масса электровоза, т.

Разность мощности потерь энергии  $\Delta p$  можно определить также по заданным зависимостям к. п. д. двигателя от скорости движения поезда для сравниваемых вариантов.

В этом случае потребляемая из сети мощность определяется как:

$$P_{31} = \frac{W_1(v_1)v_1}{\eta_1(v_1)}; P_{32} = \frac{W_2(v_2)v_2}{\eta_2(v_2)}, \quad (6)$$

а разность

$$P_{31} - P_{32} = v_1 W_1(v_1) + m p_1(v_1) - [v_2 W_2(v_2) + (m_1 - m_2) p_2(v_2)]. \quad (7)$$

Представив в последнем выражении  $W_2(v)$  в виде суммы

$$W_2(v) = W_1(v) + \Delta W(v), \quad (8)$$

находим

$$P_{31} - P_{32} = v_1 W_1(v_1) + m p_1(v_1) - [v_2 W_1(v_2) + v_2 \Delta W(v_2) + m_2 p_2(v_2)]. \quad (9)$$

На основании (9) и (2) разность мощности потерь энергии

$$\Delta p = P_{31} - P_{32} - [v_1 W_1(v_1) - v_2 W_1(v_2)]. \quad (10)$$

Анализируя выражения (4) и (9), можно убедиться, что формулы (3) и (10) дают один и тот же результат. При использовании выражения (3) для определения величины  $\Delta p$  необходимо располагать данными о мощности потерь в двигателе [ $p_1(v)$ ,  $p_2(v)$  и  $p_{\text{мх}}(v)$ ]. Выражение (10) применимо, если известны зависимости к. п. д. от скорости движения [ $\eta_1(v)$  и  $\eta_2(v)$ ].

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

При решении задачи рассматриваемыми способами выводы о целесообразности отключения части тяговых двигателей базируются, как уже отмечалось, на анализе зависимости разности мощности потерь от скорости движения  $\Delta p^*(v)$  [18]. Между тем, предпочтительнее анализ зависимости  $\Delta p^*$  от уклона, то есть  $\Delta p^*(i)$ , дополненной графиками  $v_1(i)$  и  $v_2(i)$ . Такое представление результатов решения задачи позволяет определить для заданного участка (уклона) не только разность мощности потерь, но и степень изменения скорости движения при отключении части тяговых двигателей.

Рассмотрим пример, когда требуется определить разность мощности потерь энергии при вождении поездов с массой состава 1 400 т одной и двумя секциями электровоза серии ВЛ10.

Будем исходить из того, что при работе одной секцией применяется вторая ступень ослабления возбуждения (ОВ2), а при работе двумя секциями – режим полного возбуждения (ПВ). Этому случаю соответствуют расположенные близко тяговые характеристики  $F_{к8}(v)$  и  $F_{к4}(v)$ , показанные на рис. 3.

На тяговых характеристиках для сравниваемых вариантов кружками отмечены установившиеся скорости движения поезда, соответствующие ряду заданных значений уклонов пути  $i$  (значения уклонов  $i$  выбраны ради упрощения расчета так, чтобы им при работе двумя секциями соответствовали значения установившейся скорости движения 60, 65, 70 и 80 км/ч). Произведение координат каждой из указанных точек представляет механическую мощность электровоза.

Например, уклону  $i = 1,93\text{‰}$  соответствуют:

$$v_1 = 70 \text{ км/ч}; F_{к8} = 118,7 \text{ кН};$$

$$v_2 = 67,8 \text{ км/ч}; F_{к4} = 117,72 \text{ кН}.$$

Зависимости мощности потерь и к. п. д. от скорости движения для  $m = 8$  и  $m = 4$  приведены на рис. 4 и 5. При расчете указанных зависимостей потери определялись по результатам квалификационных испытаний тягового двигателя типа ТЛ-2К [19], а потери в тяговой передаче – согласно рекомендациям ГОСТ 2582-72.

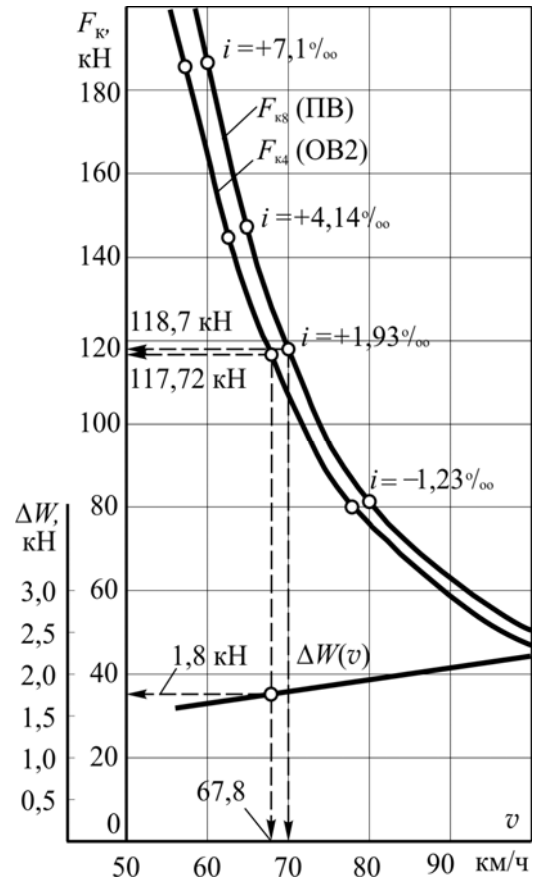


Рис. 3

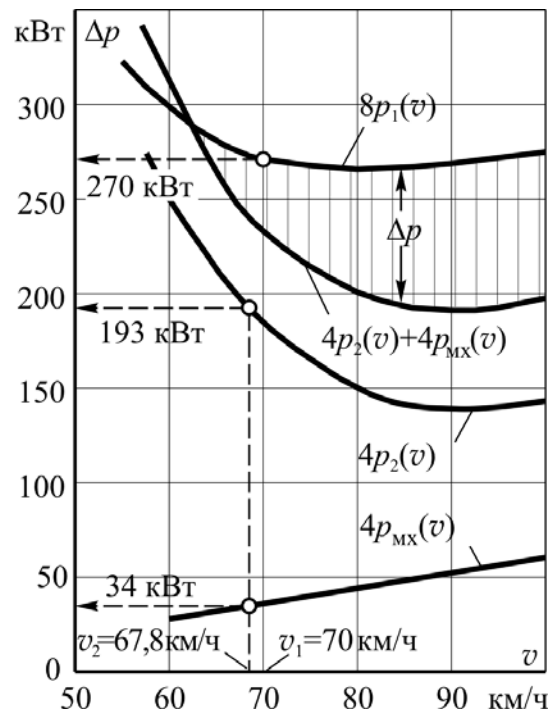


Рис. 4

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Из рис. 4 находим:

$$8p_1(v=70) = 270 \text{ кВт};$$

$$4p_2(v=67,8) = 193 \text{ кВт};$$

$$4p_{\text{мх}}(v=67,8) = 34 \text{ кВт}.$$

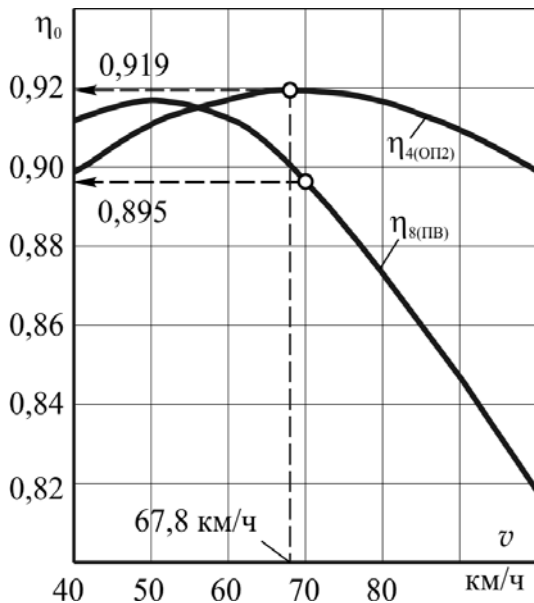


Рис. 5

Механическая мощность:

$$P_{\text{мх8}} = \frac{F_1 v_1}{3,6} = \frac{118,7 \cdot 70}{3,6} = 2308 \text{ кВт};$$

$$P_{\text{мх4}} = \frac{F_2 v_2}{3,6} = \frac{117,72 \cdot 67,8}{3,6} = 2217 \text{ кВт}.$$

Мощность, потребляемая из сети:

$$P_{\text{э8}} = P_{\text{мх8}} + 8p_1(v_1) = 2308 + 270 = 2578 \text{ кВт};$$

$$P_{\text{э4}} = P_{\text{мх4}} + 4p_2(v_2) = 2217 + 193 = 2410 \text{ кВт}.$$

Разность мощности потерь в абсолютных и относительных единицах:

$$\Delta p = 270 - 193 - 34 = 43 \text{ кВт};$$

$$\Delta p^* = \frac{43}{2578} 100 = 1,67 \text{ \%}.$$

Теперь определим разность  $\Delta p$ , используя данные о к. п. д. двигателя.

По данным рис. 5 находим:

$$\eta_8(v_1 = 70 \text{ км/ч}) = 0,895;$$

$$\eta_4(v_2 = 67,8 \text{ км/ч}) = 0,919.$$

Полная мощность:

$$P_{\text{э8}} = \frac{P_{\text{мх8}}}{\eta_8} = \frac{2308}{0,895} = 2579 \text{ кВт};$$

$$P_{\text{э4}} = \frac{P_{\text{мх4}}}{\eta_4} = \frac{2217}{0,919} = 2412 \text{ кВт}.$$

Согласно графику  $\Delta W(v)$ , приведенному на рис. 2, имеем

$$\Delta W(v_2 = 67,8 \text{ км/ч}) = 1,80 \text{ кН}.$$

На основании (8)

$$\Delta W(v) = W_2(v) - W_1(v),$$

поэтому  $W_1(v_2) = W_2(v_2) - \Delta W(v_2)$ .

Так как  $W_2(v_2) = F_{\text{к4}}$ , то

$$W_1(v_2 = 67,8 \text{ км/ч}) = 117,72 - 1,80 = 115,92 \text{ кН}.$$

Снижение мощности потерь энергии согласно (10) составит

$$\Delta p = 2579 - 2412 - \left( 2308 - \frac{115,92 \cdot 67,8}{3,6} \right) = 42 \text{ кВт},$$

что практически совпадает с ранее полученным результатом.

### Результаты

На рис. 6 показаны построенные по данным выполненных выше расчетов графики зависимостей  $\Delta p^*(i)$ ,  $v_{8(\text{ПВ})}(i)$  и  $v_{4(\text{ОП2})}(i)$ . Они позволяют оценить степень изменения установившейся скорости движения и мощности потерь энергии при отключении части тяговых двигателей и заданной величине уклона  $i$ . Так в рассмотренном случае работа одной секцией обуславливает некоторое снижение установившейся скорости движения и снижение мощности потерь энергии при скоростях движения  $v > 65 \text{ км/ч}$ .

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

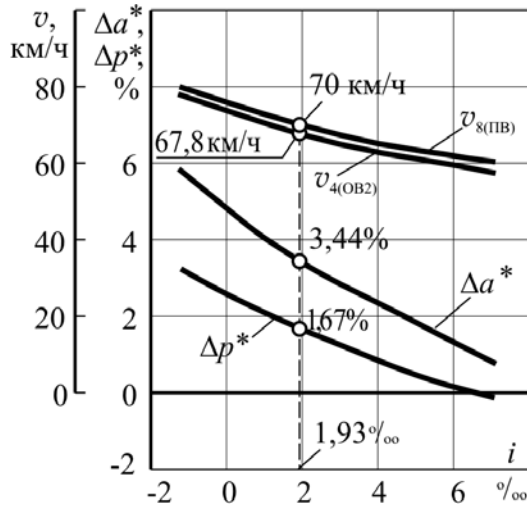


Рис. 6

### Научная новизна и практическая значимость

Не отрицая полезности расчетов, методика которых изложена выше, следует иметь в виду, что в общем случае мощность потерь энергии или к. п. д. не определяют однозначно расход электроэнергии на тягу, поэтому выводы в отношении расхода электроэнергии, основанные на сравнении мощности потерь энергии или к. п. д., могут оказаться неточными или даже ошибочными.

В самом деле, расход электроэнергии на тягу можно представить как [4]

$$A = \frac{1}{\eta(s)} \int_{s_n}^{s_k} F_k(s) ds,$$

где  $s_n$ ,  $s_k$  – координаты пути, соответствующие началу и концу участка;  $F_k$  – сила тяги электровоза на ободе колес;  $\eta$  – к. п. д. электровоза без учета расхода электроэнергии на питание цепей собственных нужд.

Сила тяги, необходимая для реализации заданного режима движения  $v(s)$ , определяется как [16]

$$F_k = m_n \left[ \frac{1+\gamma}{\xi} \frac{v dv}{ds} + w_k(s, v) \right],$$

где  $m_n$  – масса поезда;  $1+\gamma$  – коэффициент инерции вращающихся частей поезда;  $\xi$  – размерный коэффициент, зависящий от исполь-

зуемых единиц измерения физических величин;  $w_k$  – удельное сопротивление движению поезда.

Приведенные выражения показывают, что данные о значении к. п. д. или потерь мощности не позволяют сделать однозначный вывод в отношении экономичности в пользу того или иного режима нагружения тягового средства. Исключение составляют только случаи, когда в сравниваемых вариантах реализуются идентичные режимы движения поезда  $v(s)$ , что в реальных условиях для электровозов с дискретным регулированием мощности тяги практически всегда недостижимо (как в рассмотренном выше примере с электровозом серии ВЛ10).

К сказанному следует добавить, что при таком подходе к решению задачи затруднен учет изменения затрат энергии на питание цепей собственных нужд.

Чтобы обойти указанные выше затруднения и получить корректное суждение о целесообразности частичного отключения тяговых двигателей, методика решения задачи должна базироваться не на сравнении к. п. д. или разности мощности потерь энергии  $\Delta p^*$ , а на оценке разности расхода электроэнергии для сравниваемых вариантов

$$\Delta a^* = 100 \frac{a_1 - a_2}{a_1}, \quad (11)$$

где  $a_1$  и  $a_2$  – удельный (отнесенный к 1 т·км или 1 поездо·км перевозочной работы) расход электроэнергии на тягу на данном участке.

Можно показать, что:

$$a_1 = \frac{10^3 P_{\Sigma 1}}{(m_3 + m_c) v_1};$$

$$a_2 = \frac{10^3 P_{\Sigma 2}}{(m_3 + m_c) v_2}, \quad \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{т} \cdot \text{км}} \quad (12)$$

где  $m_c$  – масса состава, т.

Относительная величина снижения расхода электроэнергии на тягу независимо от протяженности участка составляет

$$\Delta a^* = 100 \left( 1 - \frac{P_{\Sigma 1}}{v_1} \cdot \frac{v_2}{P_{\Sigma 2}} \right), \quad \% \quad (13)$$

Для рассмотренного выше численного примера получим:

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

$$a_1 = \frac{2\,579 \cdot 10^3}{(1\,400 + 184) \cdot 70} = 23,26 \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{т} \cdot \text{км}};$$

$$a_2 = \frac{2\,412 \cdot 10^3}{(1\,400 + 184) \cdot 67,8} = 22,46 \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{т} \cdot \text{км}}.$$

Снижение расхода электроэнергии по формуле (11)

$$\Delta a^* = 100 \frac{23,26 - 22,46}{23,26} = 3,44 \%$$

или по формуле (13)

$$\Delta a^* = 100 \left( 1 - \frac{70}{2\,579} \cdot \frac{2\,412}{67,8} \right) = 3,44 \%.$$

Отметим, что при использовании формул (12) и (13) легко учесть возможное изменение затрат энергии на собственные нужды. Для этого достаточно соответствующим образом увеличить значения мощности  $P_{31}$  и  $P_{32}$ .

### Выводы

Выполнив подобные расчеты для ряда значений уклона, можно получить зависимость  $\Delta a^*(i)$ . Для рассмотренного выше примера график такой зависимости приведен на рис. 6. Он позволяет определить экономию электроэнергии как в относительных, так и в абсолютных величинах и установить условия (скорость движения и уклон пути), при которых экономия имеет место. Так, в рассмотренном случае, как следует из графиков рис. 6, отключение четырех двигателей электровоза серии ВЛ10 в диапазоне изменения скорости движения 60...80 км/ч за счет снижения потерь в тяговых двигателях обеспечивает экономию электроэнергии в пределах 1...5 %, причем более заметная экономия соответствует работе на более легких элементах профиля.

В заключение подчеркнем, что вопрос о целесообразности частичного отключения тяговых двигателей всегда следует разделять на две части – исследовательскую и организационную: сначала необходимо установить возможность экономии электроэнергии, а затем с учетом конкретных условий вождения поездов принять решение об использовании этого способа. Изложенная в настоящей статье методика

позволяет решить первую часть обсуждаемого вопроса. Причем расчетная экономия электроэнергии нуждается в подтверждении опытными поездками, поскольку метод ее расчета базируются на ряде допущений. Последние на ряду с упрощением решения задачи могут приводить к некоторому искажению результатов (допущения о постоянстве питающего напряжения, неучет разброса характеристик тяговых двигателей и диаметров движущих колес, разброса значений удельного сопротивления движению и некоторые другие), влияние которых не изучено.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Анализ затрат электроэнергии на тягу электровозами со схемой дистанционного отключения части двигателей / Г. Я. Классен, Р. Я. Медлин, С. М. Рождественский, Ю. А. Усманов // Сб. науч. тр. ОМИИТа. – Омск, 1974. – Вып. 163. – С. 45–50.
2. Варламов, А. А. Частичное отключение тяговых двигателей на электровозах переменного тока / А. А. Варламов, Н. Г. Тарасов // Электрическая и тепловозная тяга. – 1969. – № 12. – С. 8–9.
3. Гетьман, Г. К. О расчетном определении экономии электроэнергии при частичном отключении тяговых двигателей электроподвижного состава / Г. К. Гетьман, В. Е. Васильев // Заліз. трансп. України. – 2011. – № 4. – С. 51–54.
4. Гетьман, Г. К. Теория электрической тяги : монография : в 2 т. / Г. К. Гетьман – Д. : Изд-во Маковецкий, 2011. – Т. 2. – 363 с.
5. Гетьман, Г. К., Анализ расхода электроэнергии на тягу карьерных поездов / Г. К. Гетьман, В. Е. Васильев // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2011. – Вип. 36. – С. 70–74.
6. Загорюкин, В. Л. Авторегулирование мощности электровоза ВЛ22М при двойной тяге / В. Л. Загорюкин, В. И. Гончаров // Электрическая и тепловозная тяга. – 1969. – № 7. – С. 21–23.
7. И все же двигатели отключать не следует / П. И. Борцов, З. Н. Дубровский, А. С. Курбасов, Х. Я. Быстрицкий // Электрическая и тепловозная тяга. – 1978. – № 10. – С. 35–37.
8. Красовський, П. Ю. Складові втрати електроенергії в елементах систем електропостачання / П. Ю. Красовський // Вісн. Дніпро-



## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

- петр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2009. – Вип. 27. – С. 77–80.
9. Кузнецов, В. Г. Дослідження впливу показників транспортного потоку на втрати електроенергії в тяговій мережі / В. Г. Кузнецов, О. М. Полях, А. О. Полях // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2011. – Вип. 36. – С. 84–88.
  10. Кузнецов, В. Г. Нормування витрат електроенергії на власні потреби постів секціонування та пунктів паралельного з'єднання постійного струму / В. Г. Кузнецов, М. О. Іванов, О. О. Магусевич // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2008. – Вип. 25. – С. 30–33.
  11. Кулиш, В. Ф. О частичном отключении тяговых двигателей / В. Ф. Кулиш // Электрическая и тепловозная тяга. – 1977. – № 2. – С. 44.
  12. Легостаев, В. А. Экономия электрической энергии на электроподвижном составе / В. А. Легостаев. – М.: Транспорт, 1956. – 34 с.
  13. Логвінова, Н. О. Зменшення експлуатаційних витрат за допомогою енергооптимального руху поїздів / Н. О. Логвінова, Д. О. Босій, О. М. Полях // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2012. – Вип. 42. – С. 110–113.
  14. Медлин, Р. Я. Экономия энергии при отключении части тяговых двигателей на электровозах постоянного тока и методика ее определения / Р. Я. Медлин, С. М. Рождественский, Ю. А. Усманов // Сб. науч. тр. ОМИИТа. – Омск, 1974. – Вып. 163. – С. 33–44.
  15. Некрасов, О. А. О расчетном определении эффективности средств экономии энергии при электрической тяге / О. А. Некрасов, В. И. Рахманинов // Тр. ВНИИЖТа. – М., 1977. – Вып. 578. – С. 57–74.
  16. Саблин, О. И. Рациональное регулирование установленной мощности тягового средства в процессе движения / О. И. Саблин, О. И. Бондарь // Электрификация трансп. – 2011. – № 2. – С. 68–71.
  17. Технический отчет ВЭЛНИИ № ЭМ-3-74. Типовые испытания тягового двигателя ТЛ-2К. – Новочеркасск: Типография НЭВЗ, 1974. – 36 с.
  18. Dalla Chiara, B. Sostenibilita energetica dei trasporti: analisi dei consumi e della soluzione ferroviaria / B. Dalla Chiara, R. Ricagno, M. Santarelli // Ingegneria ferroviaria. – 2008. – № 6. – P. 531–543.
  19. Muller, A. Energieeinkauf und -bereitstellung der Deutschen Bahn AG jetzt aus einer Hand / A. Muller // Die Eisenbahntechnik. – 2001. – № 3. – P. 121.
  20. Netz, M. Technische Assistenzsysteme der Deutschen Bahn unterstützen Energie sparendes Fahrer / M. Netz // Eisenbahntechnische Rundschau. – 2005. – № 10. – P. 595–598.
  21. Niessen, M. Elektrischer Betrieb bei der Deutschen Bahn im Jahre 1996 / M. Niessen, J. Schaarschmidt // Elek. Bahnen. – 1997 – № 1–2. – P. 3–11.

Г. К. ГЕТЬМАН<sup>1</sup>, В. Є. ВАСИЛЬЄВ<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 31, ел. пошта wasiljew@ukr.net

<sup>1</sup>Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 31, ел. пошта getman-gk@i.ua

## ЩЕ РАЗ ПРО ВИЗНАЧЕННЯ ЕКОНОМІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ТЯГУ ЗА РАХУНОК ЧАСТКОВОГО ВІДКЛЮЧЕННЯ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ

**Мета.** Відомі методи визначення економії електроенергії за рахунок відключення частини тягових двигунів, що базуються на порівнянні їх к. к. д. або потужності втрат енергії, у загальному випадку не дозволяють отримати об'єктивну оцінку корисності даного заходу, а в певних випадках призводять до помилкових результатів і похибок. Необхідний пошук нових, досконаліших методів визначення економії електроенергії при частковому відключенні тягових двигунів. **Методика.** Запропоновано метод розрахункового визначення економії електроенергії при частковому відключенні тягових двигунів, що базується на використанні показника раціональності режиму навантаження витрати електроенергії на вимірник перевізної роботи. **Результати.** Наведено математичні вирази, за якими можливо визначити економію електроенергії як у відносних, так і в абсолютних величинах і встановити умови (швидкість руху

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

і ухил колії), за яких наявна економія. **Наукова новизна.** Запропонована методика вирішення задачі, яка базується не на порівнянні к. к. д. або різниці потужності втрат енергії, а на оцінці різниці витрати електроенергії для порівнюваних варіантів. **Практична значимість.** Наведена методика дозволяє отримати точніші висновки відносно витрати електроенергії, оскільки порівняння потужності втрат енергії або к. к. д. не визначають однозначно витрату електроенергії на тягу, тому висновки, що базуються на порівнянні потужності втрат енергії або к. к. д., можуть виявитися неточними й навіть хибними.

*Ключові слова:* витрата електроенергії; тяга поїздів; електрична тяга; відключення частини тягових двигунів

G. K. GETMAN<sup>1</sup>, V. YE. VASILIEV<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Electric Rolling Stock of Railways», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazarian St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 31, e-mail wasiljew@ukr.net

<sup>1</sup>Dep. «Electric Rolling Stock of Railways», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazarian St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 31, e-mail getman-gk@i.ua

## ONCE AGAIN ABOUT DETERMINATION OF SAVING OF ENERGY FOR TRACTION DUE TO PARTIAL CUT-OFF OF TRACTION ENGINES OF ELECTRIC ROLLING STOCK

**Purpose.** In general the well known methods for determination of energy saving due to the partial traction engines cut-off based on their comparison to efficiency coefficient or to the power of energy losses do not allow objective estimation of efficiency of these measures and in a number of cases result in erroneous results and errors. The search for new more advanced methods for determination of energy saving at the partial cut-off of the traction engines is needed. **Methodology.** The method of calculation determination of energy saving when partial cutting-off of the traction engines is offered. It is based on the use of rationality coefficient as the loading mode of the electric power consumption for the measuring instrument of transportation activity. **Findings.** Using the given mathematical expressions it is possible to determine the energy saving in both the relative and absolute values and set the terms (motion speed and route gradient), under which the energy saving will take place. **Originality.** The method of the task solving, which is based on the evaluation of energy consumption differences for the compared variants (not on the comparison of efficiency coefficient or differences of power of energy losses) is offered. **Practical value.** The given methodology allows obtaining more exact conclusions in relation to the electric power consumption, as the comparison of energy losses power or the efficiency coefficient does not determine precisely the electric power consumption for traction. Therefore the conclusions based on the comparison of power of energy losses or efficiency coefficient can appear inexact.

*Keywords:* electric power consumption; train traction; electric traction; cut-off of the part of traction engines

### REFERENCES

1. Klassen G.Ya., Medlin R.Ya., Rozhdestvenskiy S.M., Usmanov Yu.A. Analiz zatrat elektroenergii na tyagu elektrovozami so skhemoy distantsionnogo otklyucheniya chasti dvigateley [Analysis of the energy consumption for traction of electric locomotives with the scheme of remote cut-off of the part of engines]. *Sbornik nauchnykh trudov OMIITa* [Proc. of Omsk Institute of Railway Engineers], 1974, issue 163, pp. 45-50.
2. Varlamov A.A., Tarasov N.G. Chastichnoye otklyucheniye tyagovykh dvigateley na elektrovozakh peremennogo toka. *Elektricheskaya i teplovoznaya tyaga – Electric and diesel traction*, 1969, no. 12, pp. 8-9.
3. Getman G.K., Vasilyev V.Ye. O raschetnom opredelenii ekonomii elektroenergii pri chastichnom otklyuchenii tyagovykh dvigateley elektropodvizhnogo sostava [On the determination of the effectiveness of the calculated energy savings for electric traction]. *Zaloznychnyi transport Ukrainy – Railway Transport of Ukraine*, 2011, no. 4, pp. 51-54.
4. Getman G.K. *Teoriya elektricheskoy tyagi: v 2 t.* [Theory of electric traction in 2 vol.]. Dnipropetrovsk, Makovetskiy Publ., 2011. 363 p.
5. Getman G.K., Vasilyev V.Ye. Analiz raskhoda elektroenergii na tyagu karyernykh poyezdov [Analysis of the energy consumption for the traction of trains]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaloznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 36, pp. 70-74.

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

6. Zakoryukin V.L., Goncharov V.I. Avtoregulirovaniye moshchnosti elektrovoza VL22M pri dvoynoy tyage [Automatic control of the power of electric locomotive VL22M with double-heading]. *Elektricheskaya i teplovoznaya tyaga – Electric and diesel traction*, 1969, no. 7, pp. 21-23.
7. Bortsov P.I., Dubrovskiy Z.N., Kurbasov A.S., Bystritskiy Kh.Ya. I vse zhe dvigateli otklyuchat ne sleduyet [And still you should not cut-off the engines]. *Elektricheskaya i teplovoznaya tyaga – Electric and diesel traction*, 1978, no. 10, pp. 35-37.
8. Krasovskiy P.Yu. Skladovi vtrat elektroenerhii v elementakh system elektropostachannia [Components of the power losses in the elements of power supply systems]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2009, issue 27, pp. 77-80.
9. Kuznetsov V.H., Poliakh O.M., Poliakh A.O. Doslidzhennia vplyvu pokaznykiv transportnoho potoku na vtraty elektroenerhii v tiahovii merezhi [The influence of traffic flow values on the energy losses in the traction network]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 36, pp. 84-88.
10. Kuznetsov V.H., Ivanov M.O., Matusyevych O.O. Normuvannia vytrat elektroenerhii na vlasni potreby postiv seksionuvannia ta punktiv paralelnoho ziednannia postiinoho strumu [Rationing of electric energy consumption for the own needs of sectioning points and the points of parallel connection of DC]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2008, issue 25, pp. 30-33.
11. Kulish V.F. O chastichnom otklyuchenii tyagovykh dvigateley [About partial cut-off of the traction engines]. *Elektricheskaya i teplovoznaya tyaga – Electric and diesel traction*, 1977, no. 2, p. 44.
12. Legostayev V.A. *Ekonomiya elektricheskoy energii na elektropodvizhnom sostave* [Electric energy saving on the electric roling stock]. Moscow, Transport Publ., 1956. 34 p.
13. Lohvinova N.O., Bosyi D.O., Poliakh O.M. Zmenshennia ekspluatatsiinykh vytrat za dopomohoiu enerhooptymalnoho rukhu poizdiv [Reducing of operating costs using the energy-optimal train movement]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 42, pp 110-113.
14. Medlin R.Ya., Rozhdestvenskiy S.M., Usmanov Yu.A. Ekonomiya energii pri otklyuchenii chasti tyagovykh dvigateley na elektrovozhakh postoyannogo toka i metodika yeye opredeleniya [Energy saving when cutting-off the part of traction engines on the electric locomotives of DC and the methodology of energy saving determination]. *Sbornik nauchnykh trudov OMIITa* [Proc. of Omsk Institute of Transport Engineers], 1974, issue 163. pp. 33-44.
15. Nekrasov O.A., Rakhmaninov V.I. O raschetnom opredelenii effektivnosti sredstv ekonomii energii pri elektricheskoy tyage [On the effectiveness determination of the measures of energy savings for electric traction]. *Trudy VNIIZhTa* [Proc. of VNIIZhT], 1977, issue 578, pp. 57-74.
16. Sablin O.I., Bondar O.I. Ratsionalnoye regulirovaniye ustanovlennoy moshchnosti tyagovogo sredstva v protsesse dvizheniya [Sound management of the set capacity of the traction plant in the process of motion]. *Elektrifikatsiia transportu – Transport electrification*, 2011, no. 2, pp. 68-71.
17. *Tekhnicheskii otchet VEINII № EM-3-74. Tipovyye ispytaniya tyagovogo dvigatelya TL-2K* [Technical report no. EM-3-74. Standard tests of traction engine TL-2K]. Novocherkassk, Tipografiya NEVZ Publ., 1974. 36 p.
18. Dalla Chiara B., Ricagno R., Santarelli M. Sostenibilita energetica dei trasporti: analisi dei consumi e della soluzione ferroviaria. *Ingegneria ferroviaria*, 2008, no. 6, pp. 531-543.
19. Muller A. Energieeinkauf und -bereitstellung der Deutschen Bahn AG jetzt aus einer Hand. *Die Eisenbahntechnik*, 2001, no. 3, pp. 121.
20. Netz M. Technische Assistenzsysteme der Deutschen Bahn unterstützen Energie sparendes Fahrer. *Eisenbahntechnische Rundschau*, 2005, no. 10, pp. 595-598.
21. Niessen M., Schaarschmidt J. Elektrischer Betrieb bei der Deutschen Bahn im Jahre 1996. *Elektrische Bahnen*, 1997, no. 1-2, pp. 3-11.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. В. Г. Сыченко (Украина); д.т.н., проф. В. Т. Заикой (Украина)

Поступила в редколлегию 04.09.2013

Принята к печати 19.09.2013