

Г. К. Гетьман, д-р техн. наук, профессор (ДИИТ), В. Е. Васильев, ст. преп. (ДИИТ)

О расчетном определении экономии электроэнергии при частичном отключении тяговых двигателей электроподвижного состава

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

Особую актуальность вопросы энергосбережения приобрели в последние десятилетия в связи с ростом цен на энергоносители. Появились новые работы, посвященные исследованию ряда аспектов этой проблемы и, в частности, вопросам экономии электроэнергии на тягу поездов за счет эффективного использования рекуперации, применения рациональных режимов вождения поездов, рациональных режимов работы вспомогательных электрических машин и др.

Настоящая статья посвящена экономии электроэнергии на электроподвижном составе постоянного тока за счёт частичного отключения тяговых двигателей.

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 обеспечит

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 [1-4]. 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. Медлина [5, 6].

Однако, в отношении целесообразности частичного отключения тяговых двигателей нет единого мнения среди специалистов-электротяговиков. В подтверждение сказанному можно назвать статью «И всё же двигатели отключать не следует» [7], одним из авторов которой является видный 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 [8].

Противоречивость мнений по данному вопросу, по нашему мнению, обусловлена, главным образом, несовершенством методик, используемых при его решении.

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.

Покажем, что названные подходы к решению задачи приводят к одинаковым результатам, но не позволяют однозначно установить предпочтительный по энергозатратам вариант, что может приводить к некорректным выводам, к ошибкам и заблуждениям.

Пусть приведенные на рис. 1 кривые $F_{к1}(v)$ и $W_{к1}(v)$ представляют соответственно зависимости силы тяги и полного сопротивления движению поезда от скорости при числе включенных двигателей $m=m_1$, а кривые $F_{к2}(v)$ и $W_{к2}(v)$ – те же зависимости при $m=m_2 \neq m_1$. Причем, если m_1 равно числу ус-

тановленных 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 $W_{к2}(v) > W_{к1}(v)$.

Точки пересечения зависимостей $W_{к}(v)$ и $F_{к}(v)$, то есть кривых сопротивления движению и тяговых характеристик, определяют параметры (сила тяги и скорость) установившегося режима движения ($F_{к1} = W_{к1}$, v_1 и $F_{к2} = W_{к2}$, v_2).

Сила тяги электровоза, реализуемая при заданной скорости движения, определяется числом тяговых двигателей, уровнем напряжения на коллекторе и током возбуждения. Поэтому возможность реализации близких или совпадающих тяговых характеристик $F_{к1}(v)$ и $F_{к2}(v)$ при $m=m_1$ и $m=m_2$ зависит от используемого способа регулирования мощности тяги.

Из рис. 1 следует, что при отключении части тяговых двигателей скорость движения можно сохранить неизменной, если обеспечить реализацию тяговой характеристики

$$F'_{к2}(v) = F_{к1}(v) + \Delta W(v) \quad \text{или} \quad F'_{к2}(v) = F_{к1}(v) + [W_{к2}(v) - W_{к1}(v)].$$

Увеличение силы тяги на ΔW 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 $F_{к1}(v)$ и $F_{к2}(v)$, 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 пока-

занной на рис. 1 кривой $F_{к2}(v)$, то установившемуся режиму движения будет соответствовать сила тяги $F_{к2} \neq F_{к1}$ и скорость $v_2 \neq v_1$.

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:

$$P_{э1} = F_1 v_1 + P_1; \quad P_{э2} = F_2 v_2 + P_2,$$

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:

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

Значения P_1 и P_2 и их разность определяются как :

$$P_1 = m_1 p_1(v_1); \quad P_2 = (m_1 - m_2) p_{мх}(v_2) + m_2 p_2(v_2), \quad (2)$$

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

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;

$p_{мх}(v_2)$ – 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 ΔW , равную

$$\Delta W(v) = (m_1 - m_2) \cdot \frac{P_{\text{МХ}}(v)}{v}. \quad (4)$$

Если воспользоваться расчетными выражениями для определения удельного основного сопротивления движению электровоза под током $w'_0(v)$ и на выбеге $w_x(v)$, выраженных в Н/кН, то численное значение ΔW можно рассчитать как

$$\Delta W(v) = \frac{9,81(m_1 - m_2)}{m_1} m_3 [w_x(v) - w'_0(v)], \text{ Н}, \quad (5)$$

где m_3 – масса электровоза, т.

Разность мощности потерь энергии Δp 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:

$$P_{\text{Э1}} = \frac{W_1(v_1)v_1}{\eta_1(v_1)}; \quad P_{\text{Э2}} = \frac{W_2(v_2)v_2}{\eta_2(v_2)}, \quad (6)$$

а разность

$$P_{\text{Э1}} - P_{\text{Э2}} = v_1 W_1(v_1) + m p_1(v_1) - [v_2 W_2(v_2) + (m_1 - m_2) p_2(v_2)]. \quad (7)$$

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

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

находим

$$P_{\text{Э1}} - P_{\text{Э2}} = v_1 W_1(v_1) + m p_1(v_1) - [v_2 W_1(v_2) + v_2 \Delta W(v_2) + m_2 p_2(v_2)]. \quad (9)$$

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

$$\Delta p = P_{1э} - P_{2э} - [v_1 W_1(v_1) - v_2 W_1(v_2)]. \quad (10)$$

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 Δp 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 $\eta_2(v)$].

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 $\Delta p^*(v)$ [5]. По нашему мнению, предпочтительнее анализ зависимости Δp^* 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.

Допустим, требуется определить разность мощности потерь энергии при вождении поездов с массой состава 1400 т одной и двумя секциями электровоза 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. 2.

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 $i=1,93\%$ соответствуют:

$$v_1 = 70 \text{ км / ч}; \quad F_{к8} = 118,7 \text{ кН}; \quad v_2 = 67,8 \text{ км / ч}; \quad F_{к4} = 117,72 \text{ кН}.$$

Зависимости мощности потерь и к. п. д. от скорости движения для $m = 8$ и $m = 4$ приведены на рис. 3 и рис. 4. При расчете указанных зависимостей потери определялись по результатам квалификационных испытаний тягового двигателя ТЛ-2К [9], а потери в тяговой передаче согласно рекомендациям ГОСТ 2582-72.

Из рис. 3 находим:

$$8p_1(v = 70) = 270 \text{ кВт}; \quad 4p_2(v = 67,8) = 193 \text{ кВт}; \quad 4p_{\text{мх}}(v = 67,8) = 34 \text{ кВт}.$$

Механическая мощность:

$$P_{\text{мх8}} = \frac{F_1 v_1}{3,6} = \frac{118,7 \cdot 70}{3,6} = 2308 \text{ кВт}; \quad P_{\text{мх4}} = \frac{F_2 v_2}{3,6} = \frac{117,72 \cdot 67,8}{3,6} = 2217 \text{ кВт}.$$

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:

$$\Delta p = 270 - 193 - 34 = 43 \text{ кВт}; \quad \Delta p^* = \frac{43}{2578} \cdot 100 = 1,67\%.$$

Теперь определим разность Δp , используя данные о к. п. д. двигателя.

По данным рис. 4 находим:

$$\eta_8(v_1 = 70 \text{ км / ч}) = 0,895; \quad \eta_4(v_2 = 67,8 \text{ км / ч}) = 0,919.$$

Полная мощность:

$$P_{\text{э8}} = \frac{P_{\text{мх8}}}{\eta_8} = \frac{2308}{0,895} = 2579 \text{ кВт}; \quad P_{\text{э4}} = \frac{P_{\text{мх4}}}{\eta_4} = \frac{2217}{0,919} = 2412 \text{ кВт}.$$

Согласно графику $\Delta W(v)$, приведенному на рис. 1, 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 $W_2(v_2) = F_{к4}$, 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.

На рис. 5 показаны построенные по данным выполненных выше расчетов графики зависимостей $\Delta p^*(i)$, $v_{8(\text{ПВ})}(i)$ и $v_{4(\text{ОВ2})}(i)$. 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 $v > 65 \text{ км / ч}$.

Не отрицая полезности расчетов, методика которых изложена выше, следует указать, что в общем случае мощность потерь энергии не определяет однозначно расход электроэнергии на тягу (кроме ситуации, когда частичное отключение двигателей не приводит к изменению скорости движения поезда). Поэтому в общем случае, когда отключение части тяговых двигателей приводит к изменениям установившейся скорости движения, как в рассмотренном выше примере с электровозом ВЛ10, выводы, основанные на сравнении мощности потерь энергии, в отношении расхода электроэнергии могут оказаться неточными или даже ошибочными. К этому следует добавить, что при таком

подходе к решению задачи несколько 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 оценке разности мощности потерь энергии Δp^* , 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 поезд·км перевозочной работы) расход электроэнергии на тягу на данном участке.

Можно показать, что:

$$a_1 = \frac{10^3 P_{\text{эл1}}}{(m_{\text{э}} + m_{\text{с}}) v_1}; \quad a_2 = \frac{10^3 P_{\text{эл2}}}{(m_{\text{э}} + m_{\text{с}}) v_2}, \quad \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{т} \cdot \text{км}}, \quad (12)$$

где $m_{\text{с}}$ – масса состава, т.

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

$$\Delta a^* = 100 \left(1 - \frac{P_{\text{эл1}} \cdot v_2}{v_1 \cdot P_{\text{эл2}}} \right), \quad \% \quad (13)$$

Для рассмотренного выше численного примера получим:

$$a_1 = \frac{2579 \cdot 10^3}{(1400 + 184) \cdot 70} = 23,26 \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{т} \cdot \text{км}}; \quad a_2 = \frac{2412 \cdot 10^3}{(1400 + 184) \cdot 67,8} = 22,46 \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{т} \cdot \text{км}}.$$

Снижение расхода электроэнергии по формуле (11)

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

или по формуле (13)

$$\Delta a^* = 100 \left(1 - \frac{70}{2579} \cdot \frac{2412}{67,8} \right) = 3,44\% .$$

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 $P_{\text{э1}}$ и $P_{\text{э2}}$.

Выполнив подобные расчеты для ряда значений уклона, можно получить зависимость $\Delta a^* (i)$. Для рассмотренного выше примера график такой зависимости приведен на рис. 5. Он позволяет определить экономию электроэнергии как в относительных, так и в абсолютных величинах и установить условия (скорость движения и уклон пути), в которых экономия имеет место. Так в рассмотренном случае, как следует из графиков рис. 5, отключение четырех двигателей электровоза ВЛ10 в диапазоне изменения скорости движения 60÷80 км/ч за счёт 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.