



УДК 629.423.1+06

А. А. Андриященко, А. А. Зарифьян, П. Г. Колпахчян

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАССАЖИРСКИХ ЭЛЕКТРОВЗОВ С АСИНХРОННЫМ ТЯГОВЫМ ПРИВОДОМ

Дата поступления: 09.10.2015

Решение о публикации: 10.11.2015

Цель: Сформулировать предложения для улучшения показателей энергоэффективности пассажирских электровозов с асинхронным тяговым приводом при работе с неполной нагрузкой. **Методы:** Сделан критический анализ публикаций в технической литературе, позволивший выбрать направление исследований. Применен метод статистической обработки массивов записей данных бортового регистратора параметров движения. **Результаты:** Получена аналитическая зависимость КПД электровоза от реализуемой мощности. Сформулирован алгоритм регулирования числа тяговых двигателей, обеспечивающий стабилизацию КПД электровоза во всем диапазоне нагрузок. Построена компьютерная модель поезда, состоящего из электровоза и вагонов, причем электровоз представляет собой управляемую электромеханическую систему, в которой реализована возможность поосного (индивидуального) регулирования силы тяги. Результаты компьютерного моделирования показали высокую эффективность предлагаемой адаптивной автоматической системы управления многодвигательным тяговым приводом электровоза с использованием типовых профилей пути, утвержденных ОАО «РЖД». Снижено энергопотребление на тягу поезда за счет регулирования числа двигателей электровоза, находящихся в режиме тяги. **Практическая значимость:** Получен экономический эффект от снижения расхода электрической энергии на тягу.

Энергетическая эффективность, локомотивная тяга, неполная нагрузка, пассажирский электровоз, асинхронный тяговый привод, алгоритм, адаптивное автоматическое управление, многодвигательный тяговый привод.

Andrey A. Andryushchenko, Cand. Sci. (Eng.), department head (TRTrans LLC); ***Aleksandr A. Zarifyan**, postgraduate student, zar.plgrph@gmail.com; **Pavel G. Kolpakhchyan**, D. Eng., associate professor, department chairman, kolpakhchyan@mail.ru (Rostov State Transport University) INCREASING ENERGY EFFICIENCY OF ELECTRIC PASSENGER LOCOMOTIVES WITH ASYNCHRONOUS LOCOMOTIVE DRIVING UNIT

Objective: To formulate proposals for improving energy efficiency indices of electric passenger locomotives with asynchronous towline driving unit when operating with partial load. **Methods:** Critical analysis of technical publications was conducted to determine the direction of studies. Method of statistical processing of data massives of movement parameters on-board recorder was used. **Results:**

Analytical dependency of electric locomotive's efficiency coefficient on actual power capacity was obtained. An algorithm for regulating the number of traction engines which ensures stabilisation of the electric locomotive's efficiency coefficient across the range of loads was formulated. A computer model of a train consisting of an electrical locomotive and several carriages was built, with the locomotive presented as a controllable electromechanical system in which possibility of axial (individual) regulation of locomotive power is realised. Computer simulation results indicated high efficiency of the proposed adaptive automated system for managing multi-engine locomotive driving units with the use of standard track profiles approved by the Russian Railways JSC. Power consumption for train traction was reduced through regulating the number of electric locomotive engines in traction regime. **Practical importance:** Reduction of electrical power consumption for traction produced economic effect.

Energy efficiency, locomotive traction, partial load, electric passenger locomotive, asynchronous towline driving unit, algorithm, adaptive automated management system, multi-engine locomotive driving unit.

К настоящему времени на путях ОАО «Российские железные дороги» работает около 50 пассажирских электровозов двойного питания серии ЭП20 «Олимп», оснащенных асинхронным тяговым приводом. Особенности конструкции этого электровоза обеспечивают экономический и технологический эффект за счёт увеличения полигонов обращения и снижения потребного парка электровозов на маршрутах. Например, участок Москва – Адлер (две пары поездов) сегодня обслуживается восемью электровозами ЭП20. При ранее существовавшей схеме тягового обслуживания на два указанных поезда требовалось 18 локомотивов ЧС2К/ЧС7, ЭП1М и 2ЭС4К [2].

Вместе с тем, в процессе эксплуатации выявлен ряд проблем. Например, на равнинном участке Москва – Рязань, где средняя скорость движения составляет менее 70 км/ч, наблюдается повышенный расход электроэнергии (отметим, что здесь применяются электровозы ЭП20 с конструкционной скоростью 160 км/ч). Анализ показателей энергетической эффективности приведен в [1].

В данной статье сформулированы предложения по повышению энергетической эффективности современных скоростных пассажирских электровозов, основанные главным образом на изменении алгоритмов управления тяговым приводом.

Состояние вопроса

Проблема недостаточного использования доступной мощности локомотива при легком профиле пути и небольшой скорости движения для неполновесных и порожних составов неоднократно поднималась в связи с грузовыми перевозками [3, 5, 7, 8 и др.]. Многие участки железных дорог характеризуются неравномерностью грузопотоков в четном и нечетном направлениях, особенно в местах зарождения грузов с энергетическим, рудным и т. п. сырьем.

Лишь 4–5% продолжительности тягового режима реализуется с мощностью, близкой к номинальной, 70–75% – с нагрузками 0,5–0,8 номинальной, остальное время использование силы тяги и мощности локомотивов не превышает 0,5 номинальных значений. Таким образом, все возрастающая мощность многосекционных локомотивов усиливает проблему ее полной реализации в эксплуатации, а следовательно, и проблему повышения эксплуатационного КПД электрической тяги.

Диапазон изменения КПД в режиме тяги охватывает значения от 0,3 до 0,875. Численные значения КПД функционально зависят от значений касательной силы тяги F_k , скорости движения V и мощности P , реализуемой на ободах движущих колес, которая равна произведению силы тяги на скорость. С уве-

личением силы тяги, скорости и мощности повышается эффективность преобразования энергии. Оптимальным по КПД является использование мощности в диапазоне от $0,6 P$ до P длительного режима работы локомотива.

Было установлено, что одним из способов повышения энергетической эффективности является частичное отключение тяговых тележек (или секций) электровоза в периоды работы с явным недоиспользованием его силы тяги и мощности.

Идея отключать часть тяговых двигателей воплотилась в системе оптимального регулирования мощности локомотива [6]. Посекционное регулирование применялось на электровозах ВЛ80С, работающих по системе многих единиц, и других. Мощность регулировалась за счет оперативного отключения/включения тяговых электродвигателей (ТЭД) по группам. Машинисту во время движения приходилось вручную отключать или подключать группы тяговых двигателей, подбирая мощность локомотива под вес поезда, профиль пути и заданный режим движения, т. е. регулирование числа тяговых двигателей было полностью возложено на машиниста. Экономия электрической энергии при этом составляла 15–20%.

Основные требования к процессу отключения/включения тяговых двигателей таковы: 1) должно обеспечиваться выравнивание ресурса всех ТЭД локомотива; 2) не допускается перегрев ТЭД, температура двигателей должна оставаться в определенном диапазоне; 3) не допускается срыв КП в боксование при возрастании нагрузки на работающие ТЭД; 4) не допускается возникновение дополнительных продольно-динамических нагрузок (плавное изменение мощности работающих ТЭД при переключении).

Зависимость КПД электровоза от его мгновенной мощности

Применительно к пассажирским перевозкам, для которых – в отличие от грузовых –

масса состава изменяется незначительно, проблема энергетической эффективности обострилась лишь при вводе в эксплуатацию электровоза ЭП20, часовая мощность которого составляет 7200 кВт и позволяет вести поезд из 24 вагонов со скоростью 160 км/ч или поезд из 17 вагонов со скоростью 200 км/ч на прямых участках пути.

КПД электровоза может быть представлен как

$$\eta_{\text{э}} = \frac{P_{\text{пол}}}{P_{\text{затр}}} = \frac{P_{\text{т}}}{P_{\text{т}} + P_{\text{п}} + P_{\text{сн}}},$$

где $P_{\text{пол}}$ – полезная мощность; $P_{\text{затр}}$ – затраченная мощность; $P_{\text{т}}$ – мощность на тягу поезда; $P_{\text{п}}$ – мощность потерь; $P_{\text{сн}}$ – мощность, затрачиваемая на собственные нужды.

Мощность на тягу поезда $P_{\text{т}}$, кВт, равна

$$P_{\text{т}} = F_{\text{к}} V,$$

где $F_{\text{к}}$ – касательная сила тяги электровоза, кН; V – скорость движения, м/с.

Энергетическая диаграмма электровоза ЭП20 в номинальном режиме при питании от сети постоянного тока показана на рис. 1.

Видно, что расходы на собственные нужды $P_{\text{сн}}$ составляют 184 кВт (2,29%). Мощность, затрачиваемая электровозом ЭП20 на собственные нужды, оптимизирована за счет применения регулируемого вспомогательного привода (имеются четыре скорости вращения мотор-вентиляторов охлаждения силового электрооборудования).

Мощность потерь $P_{\text{п}}$ складывается из потерь в электрической (электрический монтаж и силовая аппаратура, сетевой дроссель, тяговый преобразователь, тяговые двигатели и пр.) и в механической частях. Эти потери оценены с использованием технической документации. Потери в силовой электрической цепи составляют 860 кВт (10,67%); потери мощности после ТЭД – 144 кВт (1,79%) за счет сопротивления в зубчатой тяговой передаче и подшипниках.

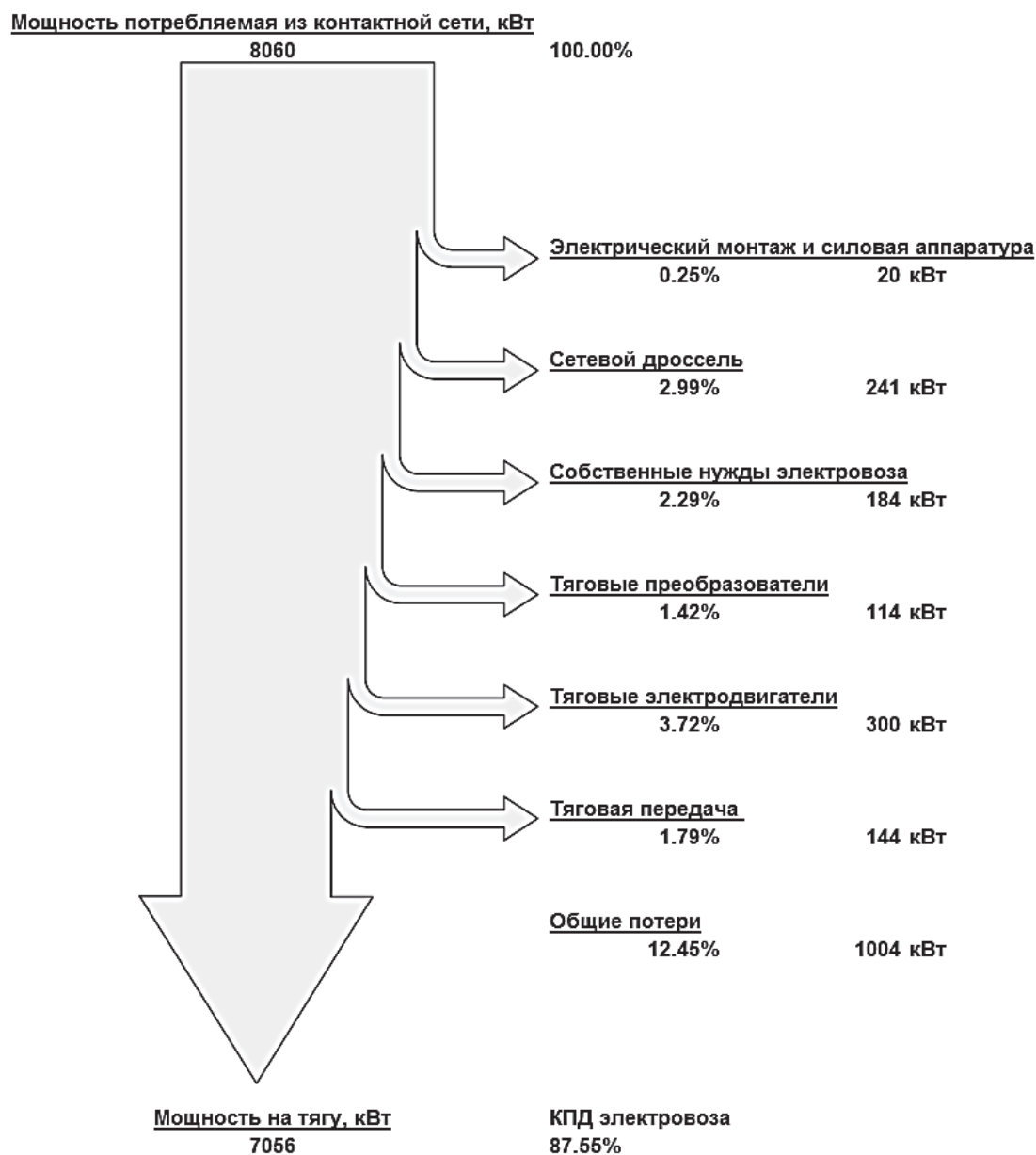


Рис. 1. Энергетическая диаграмма электровоза ЭП20 в номинальном режиме при питании от сети постоянного тока

В итоге КПД электровоза в номинальном режиме при питании от сети постоянного тока составляет 87,55%.

В [1] путем обработки записей бортового регистратора параметров движения получена зависимость КПД электровоза от мгновенной реализуемой мощности. На рис. 2 показана зависимость КПД электровоза от коэффициента использования мощности (КИМ), равного отношению мгновенной мощности локомотива к его номинальной мощности. Здесь отражена

работа всей системы преобразования электроэнергии, механические и электромагнитные потери, а также затраты на собственные нужды. Можно сказать, что это результат многократно повторенного натурального эксперимента, условия которого определены режимами эксплуатации.

Построена аппроксимация полученной опытным путем зависимости КПД локомотива η от коэффициента использования мощности γ в виде

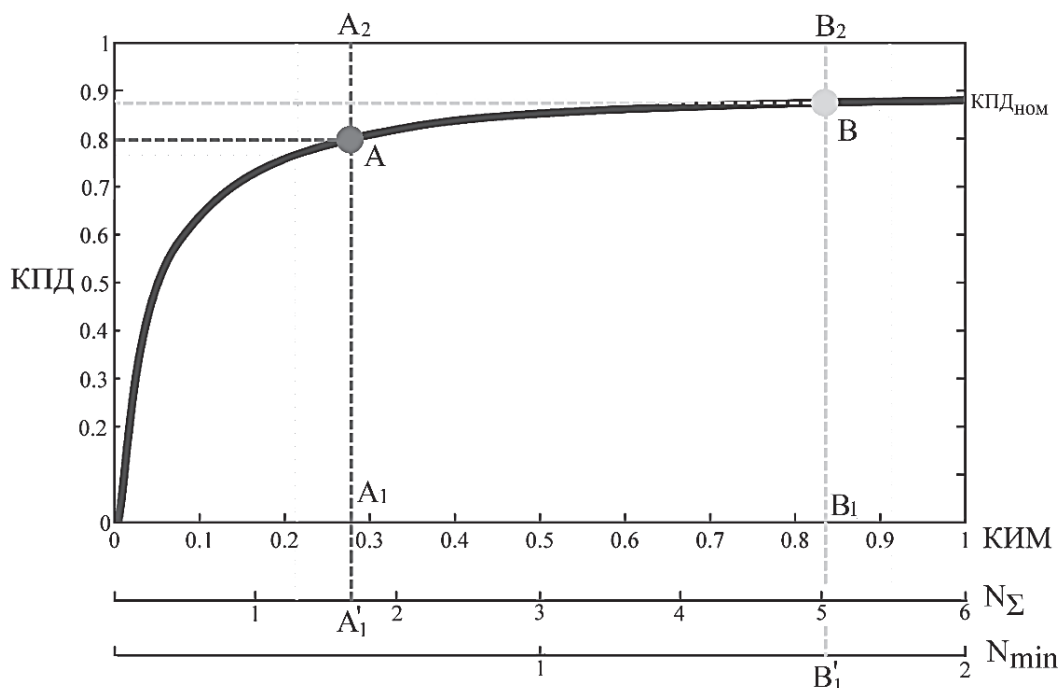


Рис. 2. КПД электровоза ЭП20 в зависимости от КИМ в режиме тяги

$$\eta = \frac{\gamma}{1,098311\gamma + 0,044546} \quad (1)$$

Поскольку на электровозе ЭП20 имеется возможность поосного регулирования силы тяги, вопрос оперативного отключения/подключения одного или нескольких тяговых двигателей в автоматическом режиме может быть решен на верхнем уровне системы управления.

Ось с отключенным двигателем (которая будет представлять собой бегунковую ось) можно использовать для нахождения линейной скорости электровоза, что увеличит эффективность работы противобоксовочной системы и позволит максимально реализовать его тяговые свойства.

Алгоритм регулирования числа тяговых двигателей для повышения энергетической эффективности

Предлагается следующий алгоритм выбора числа тяговых двигателей в зависимости от мгновенного значения мощности.

Число тяговых двигателей локомотива в общем случае обозначим как N_{Σ} (рис. 2), в данном случае $N_{\Sigma} = 6$. Номинальную мощность одного тягового двигателя обозначим как $P_{ТЭД}$, примем $P_{ТЭД} = 1200$ кВт. Тогда полная номинальная мощность локомотива составит $P_{\Sigma} = N_{\Sigma} \cdot P_{ТЭД} = 6 \cdot 1200 = 7200$ кВт.

Предположим, что в некоторый момент времени мощность, фактически затрачиваемая локомотивом на тягу при работе всех двигателей, составляет P_{Φ} , например, $P_{\Phi} = 2000$ кВт. В этом случае КИМ локомотивом составит

$$\gamma_{\Sigma} = OA_1 = \frac{P_{\Phi}}{P_{\Sigma}} = \frac{2000}{7200} = 0,278,$$

этому режиму соответствует эксплуатационный КПД локомотива (рис. 2) $\eta_{\Sigma} = A_1A = 0,795$.

При использовании предлагаемого способа управления энергетической эффективностью локомотива при работе с неполной нагрузкой программа бортового компьютера по фактической мощности P_{Φ} определяет необходимое для работы локомотива минимальное число

тяговых двигателей N_{\min} , в данном случае это число равно двум, $N_{\min} = 2$, и отключает остальные тяговые двигатели. В этом случае мощность локомотива составит $P_{\min} = N_{\min} \cdot P_{\text{ТЭД}} = 2 \cdot 1200 = 2400$ кВт.

Значение КИМ в данном режиме – при работе двух тяговых двигателей – составит

$$\gamma_{\min} = OB_1 = \frac{P_{\Phi}}{P_{\min}} = \frac{2000}{2400} = 0,833,$$

а эксплуатационный КПД локомотива будет равен, согласно (1), $\eta = B_1 B = 0,868$.

Таким образом, увеличение эксплуатационного КПД локомотива составит (см. рис. 2) $\Delta_{\eta} = \eta - \eta_{\Sigma} = B_1 B - A_1 A = 0,868 - 0,795 = 0,074$, т. е. 7,4 %.

Компьютерное моделирование движения поезда

В программном комплексе «Универсальный механизм» [11] создана компьютерная модель, предназначенная для исследования процессов, протекающих при движении поезда.

Электровоз ЭП20 рассмотрен как управляемая электромеханическая система [9, 10], причем реализована схема индивидуального (поосного) регулирования тяговых двигателей.

На первом этапе расчетов в тяге находились все шесть ТЭД, было воспроизведено движение по участкам, рассмотренным в [1]. В программу были введены спрямленные профили этих участков и соблюден скоростной режим. Число вагонов выбиралось в соответствии с конкретной ситуацией, силы сопротивления движению взяты согласно ПТР. Полученные результаты показали, что отклонение расчетных значений энергетических показателей от записей регистратора находится в пределах нескольких процентов.

Отсюда сделан вывод об адекватности модели и выполнен переход ко второму этапу расчетов. Компьютерная модель электровоза была дополнена блоком, позволяющим регу-

лировать число тяговых двигателей в зависимости от мгновенной реализуемой мощности согласно изложенному выше алгоритму.

Согласно [4], были взяты условные профили следующих типов: I–II тип, равнинный, с уклонами не более 6 ‰; III тип, холмистый, с уклонами до 9 ‰; IV тип, горный, с уклонами до 11 ‰.

Было смоделировано движение поезда по этим участкам как при всех шести включенных ТЭД, так и при переменном числе работающих ТЭД. Число вагонов было принято равным 11 (согласно зимнему расписанию) и 17 (по летнему расписанию). Скорость последовательно задавали равной 72, 126 и 180 м/ч. Выяснили, что при тяге с помощью всех шести ТЭД эксплуатационный КПД электровоза варьируется от 55,5 до 86,2 % в зависимости от скорости движения и типа продольного профиля пути. При регулировании числа ТЭД эксплуатационный КПД составляет от 81,2 до 87,2, что близко к КПД электровоза в номинальном режиме.

Экономия энергии за поездку составляет до 32 %.

Также необходимо обратить внимание на экономию электроэнергии в стоимостных величинах. При стоимости 1 кВт·ч постоянного тока около 4 руб. экономия средств на пассажирские перевозки составит значительную сумму благодаря применению системы регулирования числа ТЭД.

Для оценки энергоэффективности в [4] рекомендуется участок с условным профилем, в котором доля профилей I–II типа составляет 49,3 %, III типа – 37,6 %, IV типа – 13,1 %. Для такого участка длиной около 150 км были выполнены расчеты (см таблицу).

Результаты вычислений из таблицы представлены в виде графиков на рис. 3–5. На рис. 3 показан расход электроэнергии при движении по участку с условным профилем для составов из 11 и 17 вагонов. Видно, что расход электроэнергии во всем диапазоне скоростей при регулировании числа ТЭД существенно меньше, чем при тяге всеми шестью ТЭД.

Энергетические показатели электровоза ЭП20 при регулировании числа ТЭД на участке с условным профилем

Скорость, км/ч	Энергия на тягу, кВт·ч	Шесть тяговых двигателей		Регулируемое число ТЭД		Повышение КПД, %	Снижение энергопотребления	
		Потребленная энергия, кВт·ч	КПД, %	Потребленная энергия, кВт·ч	КПД, %		кВт·ч	%
11 вагонов – зимнее расписание								
72	1449	2242	64,6	1675	86,5	21,9	567	25,3
126	2057	2632	78,2	2391	86,0	7,8	241	9,2
180	3038	3598	84,4	3491	87,0	2,6	107	3,0
17 вагонов – летнее расписание								
72	2094	2951	71	2461	85	14	490	16,6
126	2934	3595	81,6	3390	86,5	4,9	205	5,7
180	4128	4804	85,9	4738	87,1	1,2	66	1,4

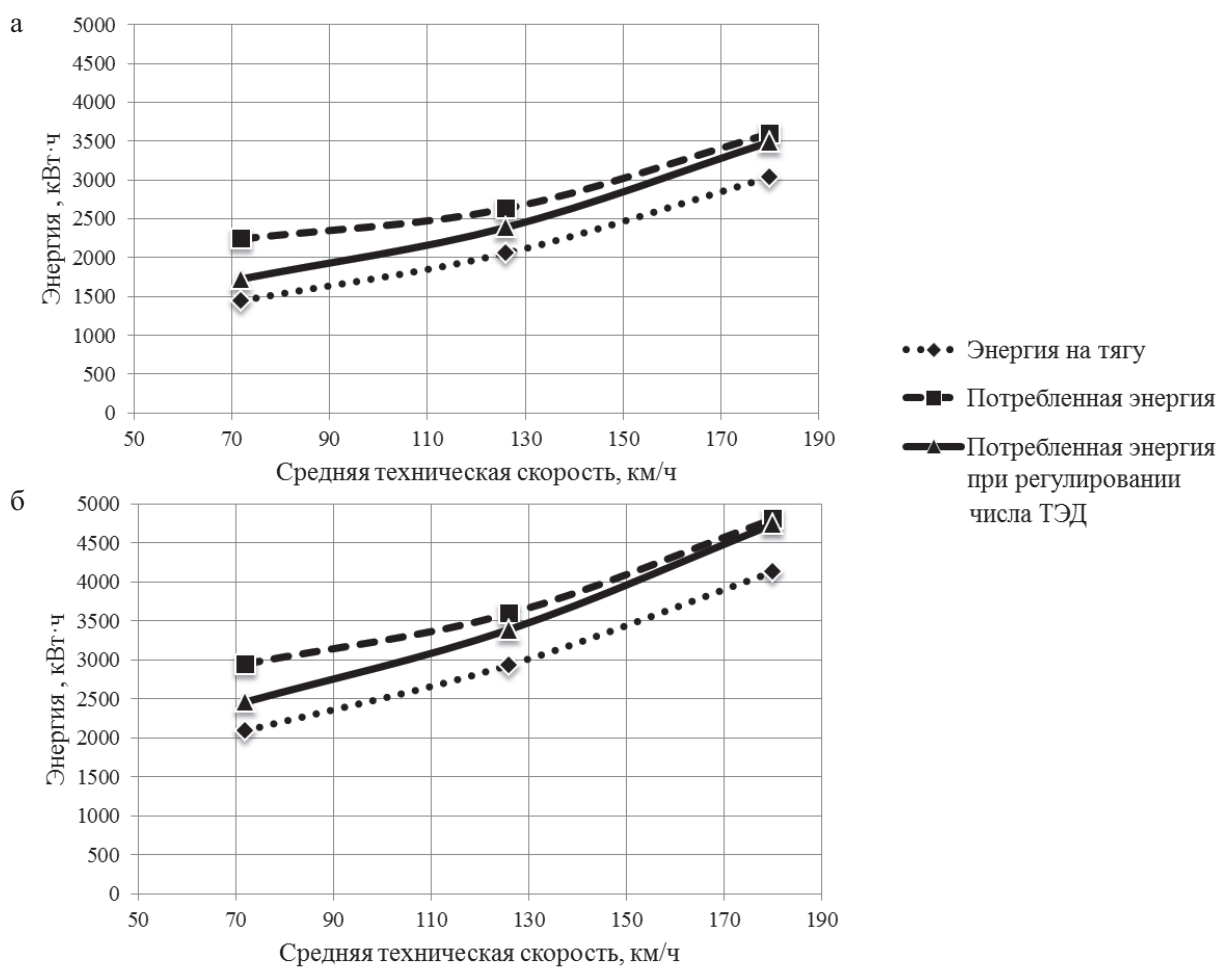


Рис. 3. Расход электроэнергии при движении по участку с условным профилем: а) 11 вагонов, б) 17 вагонов

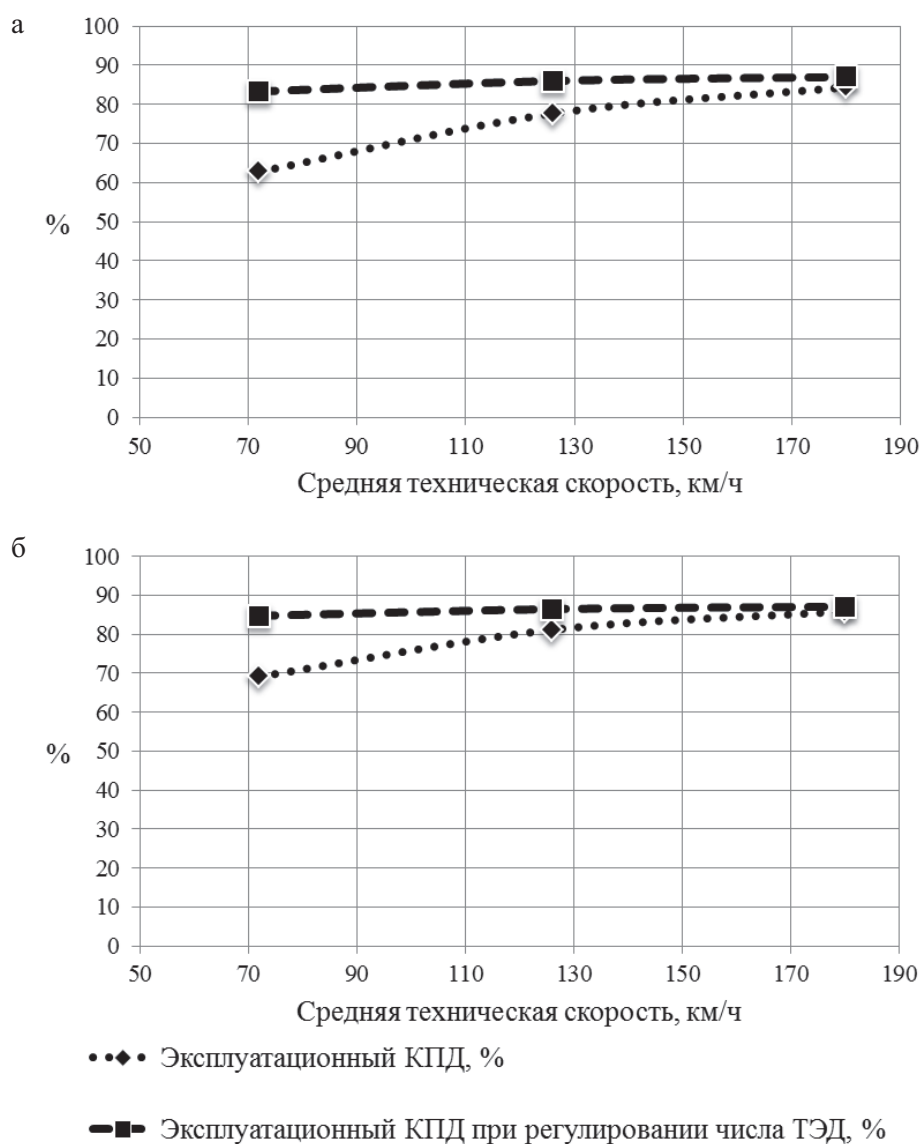


Рис. 4. Эксплуатационный КПД при движении по участку с условным профилем:
а) 11 вагонов, б) 17 вагонов

На рис. 4 показан эксплуатационный КПД при движении по участку с условным профилем для составов из 11 и 17 вагонов. Видно, что регулирование числа ТЭД обеспечивает стабилизацию эксплуатационного КПД на уровне, близком номинальному, во всем диапазоне скоростей.

Относительное снижение энергопотребления (%) на условном профиле при регулировании числа ТЭД по сравнению со штатным вариантом (все шесть осей в тяге) показано

на рис. 5. Видно, что при движении с невысокой скоростью (72 км/ч) экономия составляет от 16 до 25%, при скорости 126 км/ч – от 6 до 9%, на высокой скорости (180 км/ч) – в пределах 3%.

Заключение

Применение автоматической системы управления мощностью путем регулирова-

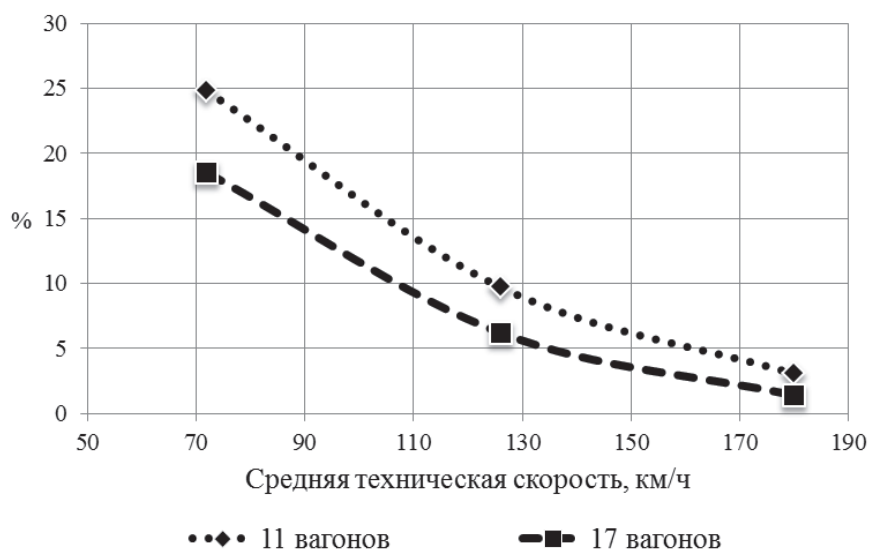


Рис. 5. Относительная экономия электроэнергии при регулировании числа ТЭД

ния числа работающих тяговых двигателей позволяет значительно сократить потребление энергии.

Экономия электроэнергии за поездку зависит от скорости движения, профиля пути и составности поезда. При тяге с помощью всех ТЭД эксплуатационный КПД электровоза варьируется от 55,5 до 86,2% в зависимости от скорости и типа продольного профиля пути, а при использовании предлагаемого алгоритма регулирования числа ТЭД он стабилизируется и составляет 81,2–87,2%, что близко к КПД электровоза в номинальном режиме.

Предлагаемая система регулирования числа тяговых двигателей может применяться и на грузовых электровозах. Поскольку при грузовых перевозках нагрузка крайне неравномерна, ожидается значительный экономический эффект.

Библиографический список

1. Андриященко А. А. Показатели энергетической эффективности пассажирских электровозов с асинхронным тяговым приводом при питании от сети постоянного тока / А. А. Андриященко,

А. А. Зарифьян, П. Г. Колпахчян // Изв. ПГУПС. – 2015. – № 2. – С. 21–29.

2. Газизов Ю. В. Выпустить новый локомотив – это только начало / Ю. В. Газизов // Гудок. – 2015. – № 74 (25743). – 30 апр.

3. Крыгин А. Н. Способы повышения эксплуатационной энергетической эффективности магистральных электровозов переменного тока : автореф. дисс. ... канд. техн. наук / А. Н. Крыгин. – Омск : ОмГУПС, 1998. – 22 с.

4. Методика расчета индикатора энергоэффективности электровоза (утв. ОАО «РЖД») 26.12.2014, № 519).

5. Мурзин Д. В. Пути и средства расширения функциональных возможностей и повышения эффективности эксплуатируемых магистральных электровозов : автореф. дисс. ... канд. техн. наук / Д. В. Мурзин. – Омск : ОмГУПС, 2000. – 21 с.

6. Пыров А. Е. Современные системы управления электровозами / А. Е. Пыров // Железнодорожный транспорт. – 2005. – № 2. – С. 64–66.

7. Сорокин С. В. Повышение экономичности многосекционных электровозов переменного тока при вождении грузовых поездов : автореф. дисс. ... канд. техн. наук / С. В. Сорокин. – М. : МИИТ, 1991. – 24 с.

8. Фадеев С. В. Повышение экономичности электровозов переменного тока за счет примене-

ния новых электронных систем управления : автореф. дисс. ... канд. техн. наук / С.В. Фадеев. – М. : МИИТ, 2003. – 24 с.

9. Kolpachyan P. G. Study of the asynchronous traction drive's operating modes by computer simulation. P. 1 : Problem formulation and computer model / P. G. Kolpachyan, A. A. Zarifyan (Jr) // *Transp. Prob. Int. Sci. J.* – 2015. – Vol. 10, Is. 2. – P. 125–136.

10. Kolpachyan P. G. Study of the asynchronous traction drive's operating modes by computer simulation. P. 2: Simulation results and analysis / P. G. Kolpachyan, A. A. Zarifyan (Jr) // *Transp. Prob. Int. Sci. J.* – 2015. – Vol. 10, Is. 3. – P. 5–15.

11. Universal Mechanism. – URL : www.umlab.ru.

References

1. Andryushchenko A. A., Zarifyan A. A. & Kolpachyan P. G. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ.*, 2015, Is. 2, pp. 21-29.

2. Gazizov Yu. V. *Gudok – Siren*, Apr. 30, 2015, no. 74 (25743).

3. Krygin A. N. Sposoby povysheniya ekspluatatsionnoy energeticheskoy effektivnosti magistralnykh elektrovozov peremennogo toka [Methods for Increasing Operational Energy Efficiency of Long-Distance Alternating-Current Electrical Locomotives]. Omsk, OmGUPS, 1998. 22 p.

4. Metodika rascheta indikatora energoeffektivnosti elektrovoza [Method for Calculation of Electrical Locomotive's Energy Efficiency Indicator]. Approved by Russian Railways JSC on Dec. 26, 2014, no. 519.

5. Murzin D. V. Puti i sredstva rasshireniya funktsionalnykh vozmozhnostey i povysheniya effektivnosti ekspluatiruyemykh magistralnykh elektrovozov [Ways and Means for Expanding Functional Possibilities and Increasing Efficiency of Long-Distance Electrical Locomotives in Operation]. Omsk, OmGUPS, 2000. 21 p.

6. Pyrov A. Ye. *Zheleznodorozhny transport – Railway Transport*, 2005, no. 2, pp. 64-66.

7. Sorokin S. V. Povysheniye ekonomichnosti mnogosektsionalnykh elektrovozov peremennogo toka pri vozhdennii gruzovykh poyezdov [Increasing Economic Efficiency of Multi-Sectional Alternating-Current Electrical Locomotives when Driving Freight Trains]. Moscow, MIIT, 1991. 24 p.

8. Fadeyev S. V. Povysheniye ekonomichnosti elektrovozov peremennogo toka za schet primeneniya novykh elektronnykh sistem upravleniya [Increasing Economic Efficiency of Alternating-Current Electrical Locomotives through Application of New Electronic Control Systems]. Moscow, MIIT, 2003. 24 p.

9. Kolpachyan P. G. & Zarifyan (Jr) A. A. *Transp. Prob. Int. Sci. J.*, 2015, Vol. 10, Is. 2, pp. 125-136.

10. Kolpachyan P. G. & Zarifyan (Jr) A. A. *Transp. Prob. Int. Sci. J.*, 2015, Vol. 10, Is. 3, pp. 5-15.

11. Universal Mechanism, available at: www.umlab.ru.

АНДРЮЩЕНКО Андрей Александрович – канд. техн. наук, начальник отдела, andrewa62@mail.ru (ООО «ТРТранс»); *ЗАРИФЬЯН Александр Александрович – аспирант, zar.plgrph@gmail.com; КОЛПАХЧЬЯН Павел Григорьевич – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, kolpachyan@mail.ru (Ростовский государственный университет путей сообщения).