

УДК 629.423.1 + 06

А. А. Андрющенко

ООО «ТРТранс»

А. А. Зарифьян, П. Г. Колпахчян

Ростовский государственный университет путей сообщения

ПОКАЗАТЕЛИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАССАЖИРСКИХ ЭЛЕКТРОВЗОВ С АСИНХРОННЫМ ТЯГОВЫМ ПРИВОДОМ ПРИ ПИТАНИИ ОТ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Проанализированы показатели энергетической эффективности пассажирских электровозов с асинхронным тяговым приводом в различных условиях эксплуатации при питании от сети постоянного тока. В качестве примеров рассмотрено движение на скоростном равнинном участке Октябрьской ж. д., горном участке Северо-Кавказской ж. д. и равнинном участке Московской ж. д., имеющем ограничение по скорости. Приведены полученные при помощи бортового регистратора графики скорости, силы тяги, полной потребленной мощности и мощности на тягу. Рассмотрены показатели энергоэффективности для различных условий, сформулированы предложения по их улучшению.

Пассажирский электровоз, асинхронный тяговый привод, сеть постоянного тока, показатель энергетической эффективности.

Под энергосбережением подразумевается комплекс организационно-правовых, производственных, научно-технических и экономических мер, направленных на эффективное использование и экономное расходование топливно-энергетических ресурсов (ТЭР).

Основные принципы энергосбережения едины для любых энергоустановок, в том числе локомотивных [2]:

- из технических средств и технологий должны применяться только те, которые реализуют наибольший коэффициент полезного действия (КПД) при наименьших затратах на ТЭР;
- режим работы технических средств должен быть близок к номинальному, обеспечивающему реализацию наибольшего КПД установки или технологического процесса;
- в отсутствие рабочего режима энергоустановка должна быть отключена или переведена в режим минимального потребления энергии холостого хода (при невозможности ее отключения по условиям перевозочного процесса).

Ключом к энергосбережению является приведение любой энергоустановки в соответствие номинальным параметрам по нагрузке, ориентированным на максимальный уровень КПД.

Необходимо различать КПД локомотива как силовой установки и КПД эксплуатационный, который зависит от времени работы локомотива в различных режимах при движении поезда и от расхода энергии на поддержание локомотива в работоспособном состоянии во время стоянок [4].

Коэффициент использования мощности (КИМ) представляет собой отношение мощности, реализованной локомотивом за определенный период времени, к его номинальной (часовой или продолжительной) мощности.

В настоящей работе проанализированы эксплуатационные показатели энергетической эффективности пассажирских электровозов с асинхронными тяговыми двигателями в реальных режимах движения при питании

от сети постоянного тока и сформулированы предложения по улучшению этих показателей.

Использование мощности пассажирских электровозов с АТП

В настоящее время на путях РЖД работают оснащенные асинхронным тяговым приводом двухсистемные пассажирские электровозы ЭП10 (всего выпущено 12 штук) и ЭП20, производство которых начато в 2011 г. [6, 7]. Оба этих электровоза имеют осевую формулу 2о-2о-2о и мощность продолжительного режима на валах тяговых двигателей 6600 кВт.

Электровоз ЭП20 обеспечивает ведение поезда из 24 вагонов со скоростью 160 км/ч или поезда из 17 вагонов со скоростью 200 км/ч на прямых участках пути, что достигнуто применением тяговых редукторов с разными пере-

даточными отношениями: $i = 5,167$ для скорости 160 км/ч, $i = 4,05$ для скорости 200 км/ч.

Основное преимущество двухсистемных пассажирских электровозов заключается в том, что при прохождении стыка участков, работающих на токе разных родов, не требуется смена локомотива. Особенно наглядно это проявляется на направлении Москва – Адлер, где род тока сменяется дважды: сначала с постоянного на переменный (ст. Рязань), а затем с переменного на постоянный (ст. Горячий Ключ), полный выигрыш по времени составляет около часа.

Электровоз ЭП20, в отличие от ЭП10, оборудован системой поосного регулирования силы тяги, благодаря чему он имеет лучшие тягово-энергетические характеристики. При питании от сети постоянного тока напряжение 3 кВ поступает на автономные инверторы напряжения, от которых питаются асинхронные тяговые двигатели [6]. Все приведенные далее

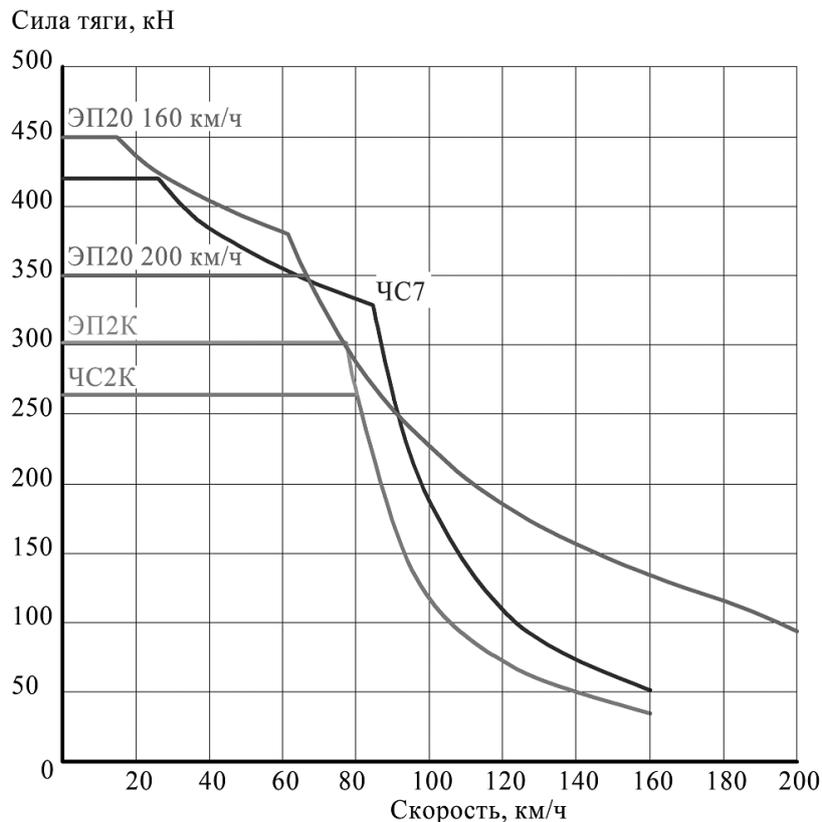


Рис. 1. Сравнительные тяговые характеристики электровоза ЭП20 и электровозов ЧС2К, ЧС7, ЭП2К

результаты получены на участках, электрифицированных на постоянном токе (материалы для участков на переменном токе будут представлены в отдельной публикации).

Сравнительные тяговые характеристики электровоза ЭП20 и оснащенных коллекторными ТЭД электровозов ЧС2К, ЧС7, ЭП2К показаны на рис. 1 (для продолжительного режима).

На основании результатов эксплуатации электровозов ЭП20 в 2012–2014 гг. выполнен детальный анализ расхода электроэнергии на тягу, потери и собственные нужды, а также на возврат в режиме рекуперации.

Показатели энергоэффективности на участке Санкт-Петербург – Москва

Основные параметры движения на участке Санкт-Петербург – Москва представлены в табл. 1. На рис. 2 показан фрагмент записи параметров электровоза пассажирского электровоза ЭП20-006 с фирменным поездом «Невский экспресс». Вес поезда 882 тс, поезд состоит из 12 вагонов. Машинист в данном случае управляет электровозом вручную при помощи задания мощности на тягу. Равнинный профиль и хорошее состояние пути позволяют двигаться со скоростью до 200 км/ч.

ТАБЛИЦА 1. Основные параметры участков

Параметр	Участок		
	СПб. – Москва	Туапсе – Горячий Ключ	Москва – Рязань
Расстояние, км	644,5	83	199
Время в пути, мин (ч)	278 (4,63)	85 (1,42)	176 (2,93)
Средняя скорость, км/ч	139,1	58,6	67,8
Максимальная скорость, км/ч	198	83	118

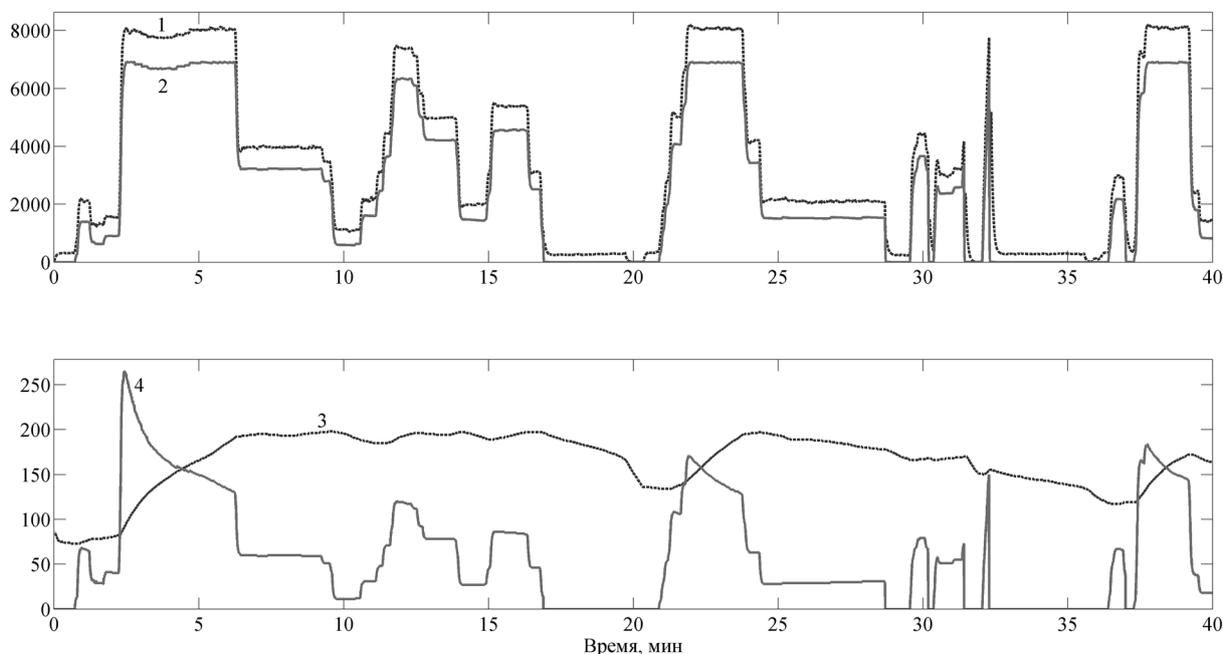


Рис. 2. Запись параметров электровоза на участке Санкт-Петербург – Москва. Здесь и далее вверху: 1) мощность, потребляемая из сети, кВт; 2) мощность на валах АД, кВт; внизу: 3) скорость, км/ч; 4) сила тяги, кН

На рис. 2 также показаны потребляемая из контактной сети мощность (без учета отопления поезда) и мощность на валах АТД, разность этих мощностей представляет собой суммарную мощность вспомогательных нужд и потерь.

Видно, что при наборе скорости доступная мощность электровоза используется практически полностью, значение мощности на валах АТД составляет 7000 кВт, что лишь немногим меньше мощности часового режима. Сила тяги при разгоне достигает 270 кН на скорости 100 км/ч.

Показатели энергетической эффективности на этом участке представлены в табл. 2, причем сначала во всех режимах, а затем только в режиме тяги.

Показатели энергоэффективности на участке Туапсе – Горячий Ключ

Этот участок протяженностью 83 км представляет собой часть линии Туапсе – Краснодар, для него характерны сложные план и профиль пути. Основные параметры движения

на участке представлены в табл. 1, показатели энергетической эффективности – в табл. 2.

От ст. Туапсе-Пассажирская дорога идет вверх по долине реки на протяжении более 26 км с уклонами до 9–15‰ и имеет множество кривых малого радиуса. На рис. 3 показан фрагмент записи параметров пассажирского электровоза ЭП20-023 с поездом Адлер – Москва, полученной за первые 20 мин поездки. Скорость 70 км/ч поддерживается автоматическим регулятором. При этом КИМ равен 0,166.

Затем начинается подъем с уклонами 23‰, дорога входит в Лысогорский (Чилипсинский) перевальный тоннель длиной 3,2 км (высота перевала более 400 м) и преодолевает Главный Кавказский хребет. На рис. 4 представлены записи параметров электровоза на перевальном участке. Скорость при подъеме на перевал не превышает 65 км/ч, мощность на валах АТД достигает 4500 кВт, сила тяги равна 250 кН. В среднем КИМ на подъеме составляет 0,338. После перевала начинается спуск с уклонами до 15–16‰, на спуске электровоз работает в режиме рекуперации.

ТАБЛИЦА 2. Показатели энергетической эффективности

Параметр	Участок		
	СПб. – Москва	Туапсе – Горячий Ключ	Москва – Рязань
По всем режимам (за всю поездку)			
Полная энергия, потребленная из контактной сети, кВт·ч	11 055	1523	2841
Потенциально возможная энергия, потребленная из контактной сети (исходя из часовой мощности 7200 кВт), кВт·ч	33 342	10 152	21 059
Энергия на валах АТД, кВт·ч	8218	1089	1620
КИМ = (3)/(2)	0,246	0,107	0,077
Только в режиме тяги (за всю поездку)			
Энергия, потребленная из контактной сети, кВт·ч	10 442	1430	2494
Потенциально возможная энергия, потребленная из контактной сети (исходя из часовой мощности 7200 кВт), кВт·ч	20 261	4776	10 361
КИМ = (3)/(6)	0,406	0,228	0,156

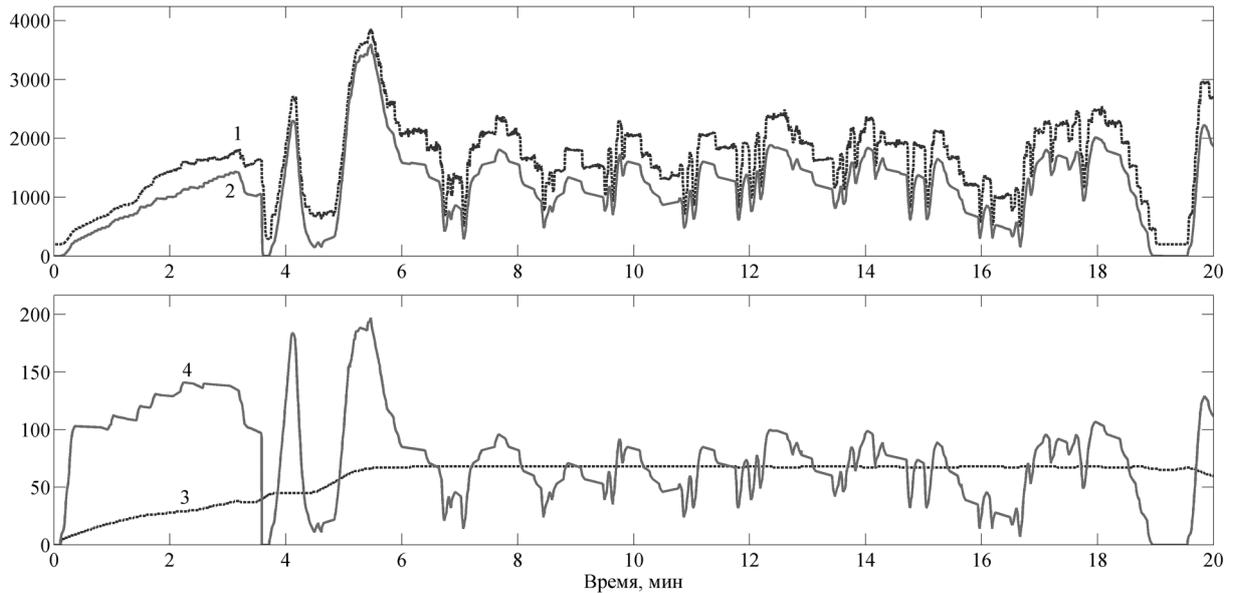


Рис. 3. Запись параметров электровоза после ст. Туапсе (обозначения см. на рис. 2)

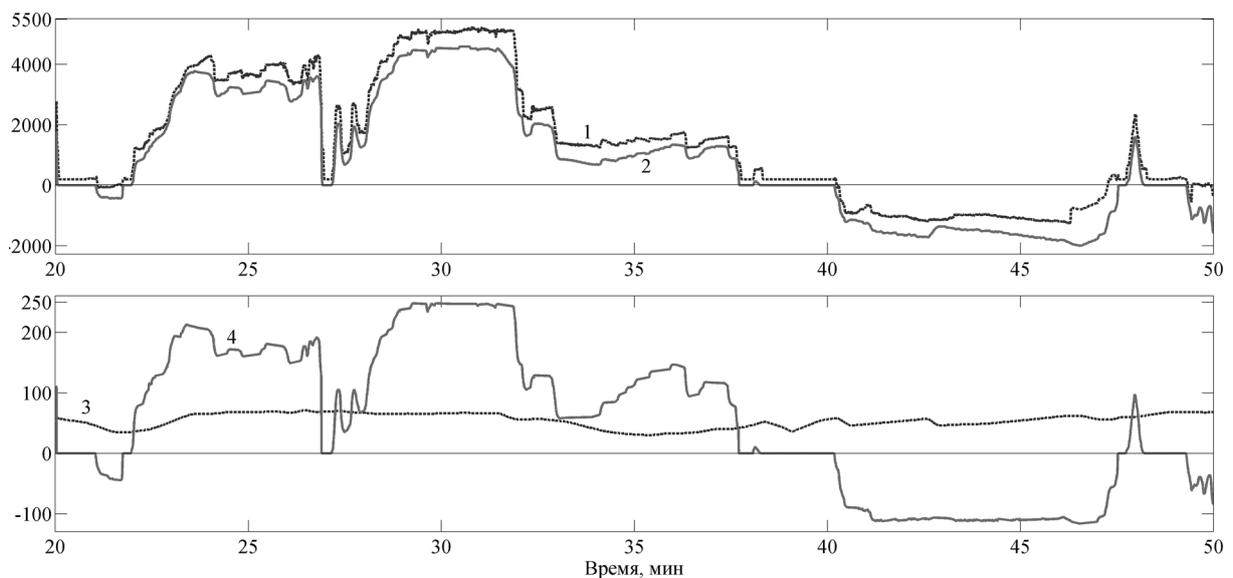


Рис. 4. Запись параметров электровоза на перевальном участке (обозначения см. на рис. 2)

Далее гораздо более пологий спуск продолжается до ст. Горячий Ключ, который электровоз проходит практически на выбеге с небольшим подтормаживанием.

Показатели энергоэффективности на участке Москва – Рязань

На рис. 5 показан фрагмент записи параметров пассажирского электровоза ЭП20-015 с поездом № 104, полученной на равнинном

участке Москва – Рязань, параметры участка приведены в табл. 1. Продолжительность записи около 30 мин.

Так как на этом участке имеются ограничения по скорости (70 км/ч), что видно на нижней диаграмме, автоматический регулятор поддерживает заданную скорость, периодически включая тягу (49% полного времени движения, которое равно 2 ч 46 мин), остальное время движение происходит на выбеге.

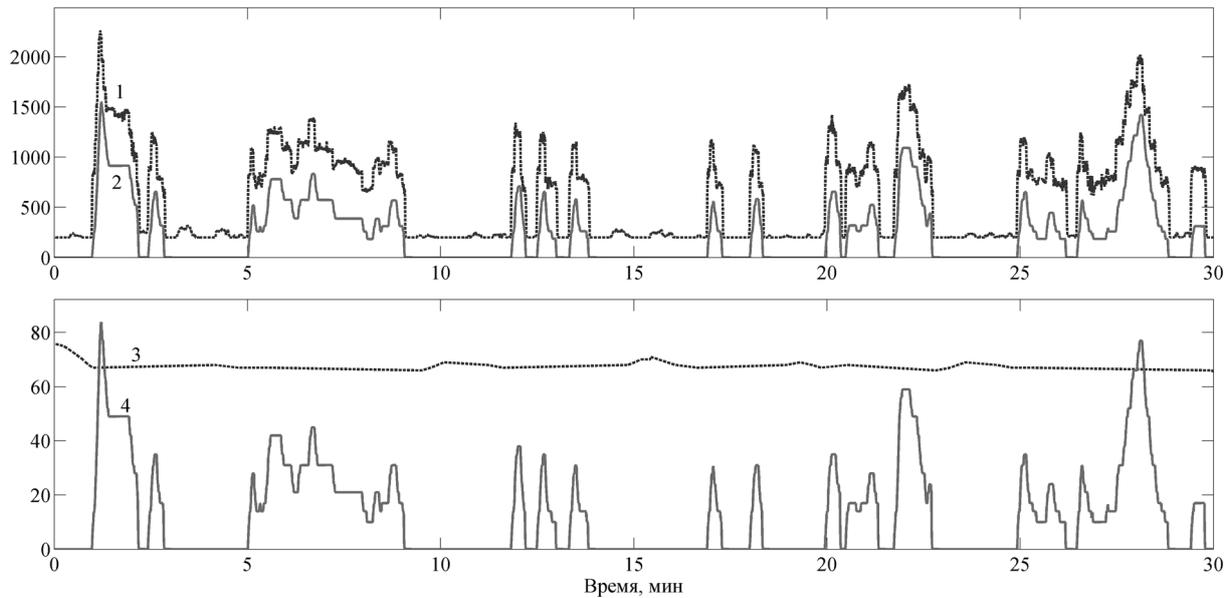


Рис. 5. Фрагмент записи параметров электровоза на участке Москва – Рязань (обозначения см. на рис. 2)

Показатели энергетической эффективности представлены в табл. 2.

Пути повышения показателей энергоэффективности

Таким образом, как показывает опыт эксплуатации пассажирских электровозов с АТП, работающих на железных дорогах, их доступная мощность используется полностью далеко не всегда. Причины заключаются в том, что такие электровозы ведут поезда без смены локомотива на всем протяжении маршрута (например, 1760 км для линии Москва – Адлер), который проходит по территориям с разнообразным рельефом местности и состоянием пути, и вес поезда меньше расчетного. Как следствие, условия для обеспечения высокой энергоэффективности на всем маршруте далеки от оптимальных.

Рассмотрим возможные варианты решения этой проблемы.

Движение с полной загрузкой на высоких скоростях

Одной из кардинальных мер улучшения эксплуатационной энергоэффективности электровозов ЭП20 может быть вождение поездов

из максимального числа вагонов с высокими скоростями, что даст повышение реализуемой мощности и тем самым – увеличение КИМ.

Для этого требуется, во-первых, стабильный пассажиропоток, во-вторых, хорошее состояние пути, позволяющее поддерживать высокую скорость движения. Если на линии Санкт-Петербург – Москва пассажиропоток в основном стабилен, то на линии Центр – Юг, где перевозки носят сезонный характер, этого нет.

Кроме того, на южном направлении имеются многочисленные ограничения по скорости движения, в том числе обусловленные сложным горным рельефом. В перспективе по мере модернизации инфраструктуры скорость должна возрасти.

Отключение части двигателей при неполной нагрузке

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

В [1] по этому поводу сказано: «При применении бесколлекторного тягового привода актуальным становится вопрос об обеспечении нагрузки тягового оборудования, близкой к оптимальной (регулирование числа работающих тяговых двигателей в зависимости от загрузки электровоза, в том числе и на разных участках пути)».

Сошлемся здесь на практический опыт. Отключение секций грузовых многосекционных тепловозов при неполной нагрузке (при порожнем или легковесном составе) широко практикуется и предписывается инструкциями по вождению поездов с целью экономии топлива. Секции отключаются заранее, перед началом движения. Например, у тепловоза 3ТЭ116У могут быть вручную отключены одна или две секции [5]. В отключенных секциях дизель работает на холостом ходу (нулевая позиция), причем топливо подается только в половину цилиндров. Возбуждение тягового генератора обеспечивает питание трехфазным переменным током асинхронных мотор-вентиляторов охлаждения ТЭД. В результате в корпусах ТЭД создается избыточное давление, благодаря этому попадание туда снега, воды и пыли становится невозможным.

На Северо-Кавказской ж. д. для экономии электроэнергии проводится опытная эксплуатация грузовых электровозов 1,5ВЛ80с при вождении неполновесных или порожних грузовых поездов. Водить такие поезда предписано на шести ТЭД из двенадцати, т. е. работать на «полсхемы» при всех включенных мотор-вентиляторах также во избежание попадания влаги и загрязнений.

Как показали расчеты, расход электроэнергии электровоза ЭП20 на участке Москва – Рязань с ограничением по скорости 70 км/ч при 6, 5, 4 и 3 работающих двигателях составил бы, соответственно, 100, 91, 81 и 73%. Во всех случаях электровоз ведет состав из 15 пассажирских вагонов и сохраняет заданный график движения. Наилучшая энергоэффективность здесь будет при движении с тремя отключенными тяговыми двигателями (снижение расхода энергии до 27%). Это также существенно

лучше показателей электровозов ЧС2К и ЧС7, работающих на данном участке с аналогичными поездами.

Изменение эксплуатационного КПД в зависимости от загрузки локомотива

Обратим внимание на то, что в технической документации значение КПД электровоза приводится для работы в продолжительном (6600 кВт) или часовом (7200 кВт) режимах. Однако электровоз работает в переменных режимах. Как следствие, его КПД изменяется в зависимости от мгновенной мощности (рис. 6).

Диаграмма построена по результатам обработки параметров электровоза, полученных во время поездок на участках, электрифицированных на постоянном токе. Здесь учитывается работа преобразователей и двигателей, тепловые и электромагнитные потери, затраты на собственные нужды. Можно сказать, что это результат многократно повторенного натурного эксперимента, условия которого определены режимами эксплуатации.

Тяговый привод электровоза ЭП20 является многодвигательным, причем имеется возможность индивидуального регулирования мощности каждого двигателя вплоть до его отключения, поэтому для улучшения показателей энергетической эффективности представляется целесообразным разработать адаптивную автоматическую систему регулирования числа тяговых осей. Работа этой системы должна быть построена таким образом, чтобы оставшиеся в тяге оси обеспечивали максимально возможный КПД электровоза, опираясь на диаграмму рис. 6.

Необходимость модификации схемы вспомогательного привода

На электровозах ЭП20 применена схема питания вспомогательных нужд от звена постоянного напряжения тягового преобразователя [3]. Использован разделительный транс-

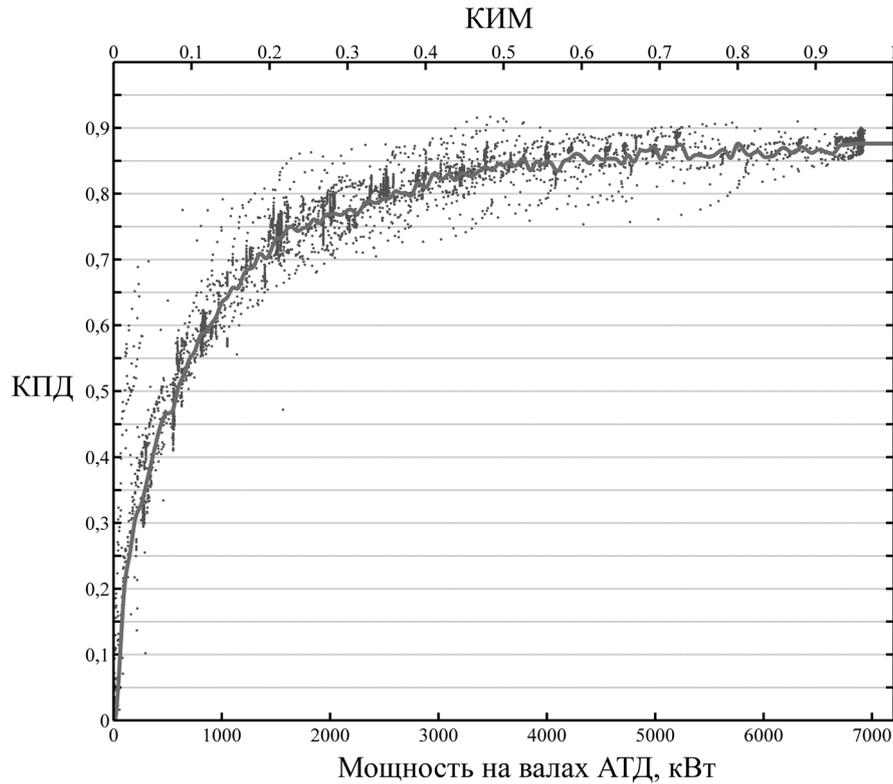


Рис. 6. КПД электровоза ЭП20 в зависимости от мощности на валах АТД (внизу) и от КИМ (вверху) в режиме тяги

форматор, обеспечивающий гальваническое разделение высоковольтных цепей источника питания и низковольтных потребителей. Используются четыре независимо регулируемых по частоте канала питания вспомогательных нужд. Из них второй канал питает четыре вентилятора охлаждения АТД, а четвертый – еще два вентилятора охлаждения АТД.

Поскольку должно быть обеспечено минимально необходимое давление воздуха в корпусах отключенных тяговых двигателей, в схему вспомогательного привода необходимо внести изменения, предусматривающие индивидуальное питание мотор-вентиляторов.

Выводы

Современные пассажирские электровозы, оснащенные АТП, имеют большой запас мощности, а вес поездов далек от оптимальных значений. Анализ записей параметров

электровозов при эксплуатации на участках, электрифицированных на постоянном токе, позволяет сделать следующие выводы:

1) мощность электровоза используется не полностью. Наибольшее значение КИМ получено при эксплуатации электровоза на скорости до 200 км/ч на равнинном участке Москва – Санкт-Петербург. КИМ в режиме тяги на данном участке равен 0,406;

2) на участке с большим количеством кривых, с подъемом до 9–15‰ и с ограничением скорости КИМ электровоза имеет значение 0,166;

3) на перевальном участке при подъеме с уклоном до 23‰ КИМ равен 0,338;

4) на равнинном участке с ограничением скорости значение КИМ 0,156;

5) наилучшие мгновенные показатели энергоэффективности достигаются при разгоне до скорости 200 км/ч на прямом равнинном участке и при подъеме на перевал с уклоном до 23‰;

б) зависимость КПД от мощности и КИМ (рис. 6) показывает, что для увеличения энергоэффективности необходимо более полно использовать мощность тяговых двигателей в течение длительного времени.

Для оптимизации показателей энергетической эффективности пассажирских электропоездов с АТП предлагается разработать адаптивную автоматическую систему изменения числа тяговых осей. Частота вращения одной из отключенных осей (которая в этом случае будет представлять собой «бегунковую ось») послужит входным сигналом для системы управления тягой и поможет отслеживать возникновение боксования и юза.

Библиографический список

1. Бахвалов Ю. А. Моделирование электромеханической системы электропоезда с асинхронным тяговым приводом / Ю. А. Бахвалов, А. А. Зарифьян,

П. Г. Колпахчян и др. ; под ред. Е. М. Плохова. – М. : Транспорт, 2001. – 286 с.

2. Гапанович В. А. Энергосбережение на железнодорожном транспорте / В. А. Гапанович, В. Д. Авилов, Б. А. Аржанников и др. ; под ред. В. А. Гапановича. – М. : МИСиС, 2012. – 620 с.

3. Зарифьян А. А. Особенности схем вспомогательного привода современных локомотивов с асинхронными тяговыми двигателями / А. А. Зарифьян // Бюл. результатов науч. исследований. – 2014. – № 4 (13) – С. 29–35. – URL: www.brmi.info.

4. Ильинский Н. Ф. Основы электропривода / Н. Ф. Ильинский. – М. : Изд-во МЭИ, 2003. – 224 с.

5. Сергеев С. В. Знакомьтесь: тепловоз 3ТЭ116У / С. В. Сергеев, М. В. Федотов, А. Л. Ткаченко и др. // Локомотив. – 2014. – № 3. – С. 38–42.

6. Система управления и диагностики электропоезда ЭП10 / под ред. С. В. Покровского. – М. : Интекст, 2009. – 356 с.

7. Солтус К. П. Знакомьтесь : электропоезд ЭП20 / К. П. Солтус // Локомотив. – 2013. – № 4–6.

УДК 004.056.53

Г. А. Бекбаев, Н. В. Евглевская, А. А. Привалов, Е. В. Скуднева

Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I

СПОСОБ МОНИТОРИНГА ПРОЦЕССА ПЕРЕДАЧИ СООБЩЕНИЙ ПО КАНАЛАМ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ ОАО «РЖД»

Для обеспечения устойчивой работы телекоммуникационных устройств и, как следствие, предоставления потребителям услуг требуемого качества создана система мониторинга. Известны способы построения систем мониторинга, при реализации которых следует передавать по каналам телекоммуникационной системы (ТКС) большой объем дополнительной информации, что удлиняет цикл управления ТКС. Для сокращения цикла управления ТКС авторы статьи разработали оценку состояния ТКС ОАО «РЖД» по спектральным характеристикам процесса передачи сообщений (пакетов или кадров данных). Изменение времени передачи сообщений (пакетов или кадров данных) и вида распределения его отклонений от среднего значения, как правило, обусловлены изменением условий функционирования каналов ТКС.

Телекоммуникационная система, нормальный закон распределения, экспоненциальный закон распределения, длительность цикла управления ТКС.