

АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ЭНЕРГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВАГОНОВ МЕТРОПОЛИТЕНА С АЛЬТЕРНАТИВНЫМИ СИСТЕМАМИ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Ле Суан Хонг, В.Д. Тулупов

Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», г. Москва

На основании анализа известных технико-экономических результатов создания и эксплуатации электроподвижного состава метрополитенов, железных дорог и городского электрического транспорта с различными системами тягового электропривода (ТЭП) с учётом обоснованных теоретически и проверенных в эксплуатации технических решений по повышению их экономической эффективности показана недостаточная обоснованность распространённого среди части специалистов убеждения о безальтернативности использования на метропоездах только асинхронных тяговых машин (АТМ), а также показаны возможности существенного повышения эффективности применения на них системы тягового электропривода постоянного тока (ТЭП ПТ).

Ключевые слова: технико-экономическая эффективность, стоимость поезда, расход электроэнергии, срок окупаемости, энергетические показатели.

1. Актуальность и значимость проблемы улучшения энергетических показателей электропоездов метрополитена (ЭПМ)

Постоянно и интенсивно растущие затруднения с обеспечением городских пассажирских перевозок обуславливают объективную необходимость увеличения в них доли метрополитенов. Особенно актуальна эта проблема для крупных городов из-за ухудшения условий работы наземного городского пассажирского транспорта вследствие резкого увеличения количества движущихся по тем же дорогам троллейбусов и автобусов. В частности, в Москве, по сведениям ее мэра С.С. Собянина, «по дорогам ежедневно движутся от 2,5 до 3 миллионов автомобилей» и «москвичи проводят в пробках до пяти суток в год», то есть 120 часов, что превышает половину средней месячной нормы рабочего времени на производстве. Это обстоятельство вместе с другими его очевидными следствиями приводит к большим непроизводительным материальным потерям, что и вынуждает интенсивно увеличивать долю метрополитенов в городских пассажирских перевозках, даже в случае их убыточности из-за большой стоимости реализации по отношению к традиционным городским транспортным средствам – трамваям, троллейбусам и автобусам. Неизбежность такого решения проблемы обеспечения городских пассажирских перевозок в крупных городах прогнозировалась в СССР в самом начале освоения ЭПМ. В частности, в Москве метрополитен был открыт уже 15 мая 1935 г., а сегодня его доля в перевозке пассажиров среди предприятий городского пассажирского транспорта столицы превышает 56 %. По сведениям официального сайта Мосметрополитена «его услугами в среднем ежедневно пользуются более 7 млн пассажиров, а в будние дни этот показатель

превышает 9 млн пассажиров. Это наивысший показатель в мире». На этом же сайте утверждается, что сегодня «по интенсивности движения, надежности и объёмам перевозок Московский метрополитен стабильно занимает первое место в мире. Он в первой тройке метрополитенов мира практически по всем другим показателям». При наименьшей протяженности линий среди метрополитенов крупнейших городов мира Московское метро перевозит максимальное количество пассажиров. Мосметро станет в 1,5 раза больше и по протяженности превзойдет старейшее в мире – Лондонское (см. рисунок).

Вместе с тем, действующими планами предусматривается резкое увеличение темпов и объемов строительства новых линий Мосметрополитена. В частности, в брошюре «Мобильный город» в статье «Москва – город удобный для жизни» сказано, что «в 2011 г. Правительство Москвы начало реализацию крупнейшей в Европе программы развития общественного транспорта и реконструкции дорог. За 2 года было построено 13 км новых линий и 6 новых станций метро».

Программа развития транспортной системы рассчитана на период с 2011 по 2020 г., т. е. на 10 лет. В этот период предстоит в 1,5 раза увеличить протяженность Московского метрополитена. Намечается строительство более 160 км новых линий, т. е. планируется ежегодное увеличение длины линий на 16 км.

Предполагалось, что с 305,6 км в 2010 г. длина линий в Мосметро в 2013 г. увеличится до 332,6 км, а в 2020 г. – до 467 км, причем в 2013 г. планировалось построить 14 км путей (см. таблицу). Таким образом, темп строительства метрополитена резко возрастёт: с 6,5 км/год в начале 10-х гг. XXI в. до 19 км/год по реализуемой сегодня (2015 г.) программе.



Количество перевозимых пассажиров в год и протяженность линий метро на 1 тыс. жителей

Программа развития Московского метрополитена

Год	2010	2013	2020
Протяженность линий, км	305,6	332,6	467
Доля населения, не обслуживаемого метро, %	25	20	7
Доля вагонов новых серий, %	15	27	64

Вместе с тем, и этот показатель предполагается увеличить. В озвученных по телевидению сведениях в процессе анализа причин аварии в метро 22.07.2014 г. сказано, что в Мосметро к 2020 г. длина линий увеличивается более чем на 160 км, т. е. темп роста существенно возрастёт и превысит 25 км в год. При оценке влияния увеличения темпа роста длины линий метрополитена на изменение энергетики метро следует учитывать, что рост темпа строительства новых линий в определенной степени обусловлен расширением строительства вылетных веток. В оценке энергетики метрополитенов следует использовать показатели Мосметрополитена, в котором уже давно установились стабильные условия движения: скорость сообщения порядка 42 км/ч, средняя длина перегона между станциями – около 1700 м и предельное число пар поездов. Можно без большой ошибки считать, что средние условия движения поездов в Мосметро в относительно короткие сроки существенно не изменятся.

Если предположить, что энергетические показатели ЭПМ и условия их эксплуатации не изменятся (что, видимо, и будет в ближайшие годы), то потребление электроэнергии из внешнего электроснабжения Мосметро на тягу увеличится пропорционально росту длины линий.

По известным данным в 2007 г. длина линий (L) Мосметрополитена составляла около 305 км, а потребление энергии (A_п) из внешнего электроснабжения около 1,6 млрд кВт·ч в год. При этом удельное потребление электроэнергии составляло A_{уд} = A_п/L = 5,246 млн кВт·ч/км линий и в случае сохранения существующих условий эксплуатации, включая и энергетические показатели мет-

ропоездов, приращение потребления или электроэнергии у внешнего электроснабжения при росте длины линий до 467 км (плановая цифра), т. е. на 162 км, составит A_п = 162A_{уд} ≈ 850 млн кВт·ч, а общее потребление энергии в контрольном – 2020 г. достигнет 2,5 млрд кВт·ч. Эта же цифра, естественно, получится умножением удельного потребления энергии на 1 км пути и его плановой длины (A_п = 467A_{уд} ≈ 2,5 млрд кВт·ч). При цене электроэнергии около 3 руб./кВт·ч затраты Мосметрополитена на оплату потребляемой на тягу электроэнергии составят в 2020 г. около 7,5 млрд руб. По известным данным можно прогнозировать, что потребление энергии одним вагоном «Метровагон-маш» (МВМ) в год составит около 2,5 млн кВт·ч стоимостью около 7,5 млн руб.

Эти цифры показывают значимость проблемы улучшения энергетических показателей ЭПМ.

2. Сопоставление технико-экономической эффективности альтернативных систем ТЭП вагонов метрополитена

Сегодня некоторыми специалистами активно пропагандируется тезис о безусловном преимуществе использования на МВМ только АТМ, якобы имеющих решающее превосходство над тяговыми машинами постоянного тока (ТМ ПТ). Вероятная ошибочность такого подхода к выбору системы ТЭП для перспективных ЭПМ показана еще в [1].

Анализ известных данных теоретических исследований и результатов эксплуатации позволяет утверждать, что применение АТМ на ЭПМ окажется ещё одним примером ошибочности поверхностных оценок технико-экономической эффективности (ТЭЭ) составляемых систем ТЭП [2].

Основными показателями, определяющими ТЭЭ электропоездов метрополитена, являются их стоимость и расход ими электроэнергии на выполнение одной и той же работы. Дополнительными показателями являются динамика ЭПМ, их надёжность и расходы на обслуживание в эксплуатации. Казалось бы, эти показатели получить легко: цена ЭПМ безусловно известна производителем и эксплуатации, а остальные показатели можно получить из ведущегося учёта их составляющих. Однако под предлогом необходимости соблюдения «коммерческой тайны» все показатели ЭПМ официально не разглашаются. Но для выбора рациональных систем ТЭП необходима объективная оценка технико-экономических показателей. Это вынуждает произвести нижеприведенные косвенные оценки их показателей.

2.1. Оценка экономических показателей альтернативных систем тягового электропривода вагонов метрополитена

Сегодня в Мосметрополитене эксплуатируются около 5000 вагонов, в частности серийный вагон 81-717/714 с ТМ ПТ и перспективный вагон «Ока» серии 81-760/761 с АТМ (выпуск заводом ОАО «Метровагонмаш» с 2010 г.). Кроме этого, для более подробной информации об оценке экономической эффективности альтернативных систем ТЭП необходимо рассмотрение сведений о стоимости, расходе электроэнергии и сроке окупаемости вагонов «Русич» серии 81-740/741 с АТМ (выпуск с 2003 года), электропоездов и также электровозов (с ТМ ПТ и АТМ).

Стоимость поезда. По опубликованным в интернете сведениям за 2003 г. один 4-осный вагон серии 81-717/714 с ТМ ПТ стоил 10,3 млн рублей, а 6-осный вагон поезда «Русич» с АТМ – 30,5 млн руб. Эквивалентные по пассажироместимости (при плотности 10 чел./м²) ЭПС с ТМ ПТ и с АТМ, а именно 7-вагонный поезд с вагонами серии 81-717/714 и 5-вагонный поезд «Русич» стоили порядка 72,1 и 152,5 млн рублей, из чего можно сделать вывод, что эквивалентный по производительности поезд с АТМ стоил почти в 2 раза дороже. Такое же соотношение рассматриваемых цен (даже больше) называют специалисты, знакомые с этой проблемой.

При учете существенного различия конструкций механической части сравниваемых моделей выпущенные данные вызывают сомнения. Но мы забываем о важном обстоятельстве – у «Русича» 1/3 тележек необмоторена, что существенно снижает стоимость поезда.

По расценкам на вагоны от завода «Метровагонмаш» в 2009 г., известны следующие стоимости ЭПМ: вагон «Русич» 81-740.4 и 81-741.4 (с АТМ) стоили порядка 67,9 и 60,5 млн руб.; серийный вагон (с ТМ ПТ) 81-717.5 и 81-714.5 стоили 25,5 и 22,5 млн руб.; 81-717.6 и 81-714.6 стоили 30,0 и 26,0 млн руб. В 2010 г. промежуточный вагон

«Русич.1» стоил около 50 млн руб., головной – 56 млн руб. Вагоны «Русич.4» (с большим количеством дверей и кондиционерами) стоили, соответственно, 60 и 67 млн руб.

В статье «Поставки вагонов в Московское метро в 2011 году» (газета «Метростроевец») генеральный директор ЗАО «Трансмашхолдинг» Андрей Андреев и начальник ГУП «Московский метрополитен» Дмитрий Гаев подписали договоры на поставку и капитальный ремонт вагонов для Мосметро в 2011 г. В соответствии с подписанными документами в течение 2011 г. столичный метрополитен получил 67 вагонов метро модели 81-740.4/741.4 «Русич», а также состав, состоящий из восьми вагонов нового поколения модели 81-760/761, производство которых освоено в 2010 г. Таким образом, в общей сложности Московский метрополитен намерен приобрести у «Трансмашхолдинга» в 2011 г. 75 новых вагонов на общую сумму 5,6 млрд руб. Это тоже утверждалось в газете «Юго-восточный курьер» за апрель 2011 г., где сообщается, что «в этом году из городского бюджета будет выделено 12 млрд руб. на замену 160 новых вагонов (с АТМ) на Кольцевой и Калининской линиях» Мосметрополитена, а на замену всех 4 тысяч нужно около 300 млрд руб. Каждый последующий год вагоны стоят на 10 % дороже, чем в предыдущем. В статье «Новые метровагоны для Москвы – 81-760А со сквозным проходом» («Метромост – транспортный журнал») было сказано, что «21 мая состоялся пресс-тур на завод «Метровагонмаш» в г. Мытищи, в ходе которого был продемонстрирован состав со сквозным проходом из вагонов модели 81-760А «Ока». Именно данный тип вагонов является главным фаворитом городского конкурса на поставку более чем 2700 вагонов в 2016–2023 гг. по контракту жизненного цикла (КЖЦ). Стоимость такого контракта рекордная для рынка – около 300 млрд руб.»

Естественно, что стоимость ЭПМ обусловлена не только системой его ТЭП, но и конструкцией механической части. По известным данным других типов ЭПС, в частности для электропоездов и электровозов замена ТЭП с ТМ ПТ на привод с АТМ тоже приводит к росту цены единицы ЭПС примерно вдвое.

Реальное подтверждение увеличения стоимости ЭПС при замене ТМ ПТ на АТМ – опыт электровозостроения. Цена электровоза с подобной механической частью в результате применения на нём вместо ТЭП с ТМ ПТ привода с АТМ увеличилась также в разы, по отношению к «Ермаку» ЭП10 в 1,75; ЭП20 в 2,5 раза и проектируемый грузовой в 2,7 раза дороже.

По данным, приведенным в материале «Новая техника и ресурсосберегающие технологии на Свердловской ЖД» (Екатеринбург), в 2012 г. цена вагона электропоезда типа «Desiro RUS» с АТМ составила 125,5 млн рублей, в то время как цена

моторного вагона повышенной комфортности ЭД4МКМ с ТМ ПТ составила 32,3 млн руб. Таким образом, вагон электропоезда с АТМ дороже в 3,88 раза.

Расход электроэнергии поездами в эксплуатации. По известным данным на тягу поездов в Мосметрополитене из внешнего электроснабжения потребляется порядка 1,6 млрд кВт·ч электроэнергии в год. Всего в эксплуатации находятся 4,5 тыс. вагонов – порядка 643 × 7-вагонных поездов с вагонами типов 81-717/714 с ТМ ПТ.

По полученным в МЭИ [3] теоретическим данным при скорости сообщения 43 км/ч поезда с ТМ ПТ имеют удельный расход энергии в тяге 42,5 Вт·ч/т·км. При годовом пробеге поезда 130 тыс. км и массе с пассажирами 395 т поезд потребляет на тягу в год порядка 2,2 млн кВт·ч электроэнергии. При потерях в тяговом электроснабжении порядка 10 % потребление энергии из внешнего электроснабжения одним поездом составит 2,42 млн кВт·ч, а всеми 643 поездами – порядка 1,56 млрд кВт·ч электроэнергии в год, что практически «точно» совпадает с отчетными данными Мосметрополитена. Следовательно, эти сведения можно использовать в оценке ТЭЭ замены поездов с ТМ ПТ на поезда с АТМ.

Примем, что поезд «Русич» с АТМ имеет почти такой же показатель удельного потребления электроэнергии, как и поезд с вагонами типов 81-717/714. Его потребление энергии на тягу благодаря меньшей массе (ниже на 40 т) будет меньше, чем у серийного поезда на 10,13 % и из внешнего электроснабжения он будет потреблять не 2,42, а 2,17 млн кВт·ч в год.

По данным Мосметрополитена рекуперативное торможение на поездах «Русич» обладает высочайшей эффективностью, обеспечивая возврат энергии вплоть до 30 % и даже более. Данная величина вряд ли достижима, но все же поверим в ее достоверность. Тогда общее снижение потребление энергии из внешнего электроснабжения поездами «Русич» с АТМ по отношению к серийным с ТМ ПТ может достигать 40 % с учетом их меньшей массы и экономия составит $2,42 \cdot 0,4 = 0,968$ млн кВт·ч в год.

Сроки окупаемости замены серийных ЭПМ 81-717/714 с ТМ ПТ поездами с АТМ за счёт улучшения их энергетических показателей. По проведению недостижимой экономии энергии срок окупаемости «Русича» с АТМ многократно превышает нормативный. Опираясь на вышеуказанные данные, для расчета примем, что один вагон «Русич» стоит 75 млн рублей, а 5-вагонный поезд стоит 375 млн руб. Допустим, что 7-вагонный поезд серии 81-717/714 с ТМ ПТ даже при цене в 2 раза меньшей по отношению к поезду с АТМ будет стоить порядка 187 млн руб.

При цене электроэнергии 3 руб./кВт·ч (по РЭК Москвы во время расчета) сокращение за-

трат на ее оплату составит соответственно $C_{сэ} = 3 \cdot 0,968 = 2,904$ млн руб. в год на один поезд. При увеличении цены «Русича» по отношению к серийному поезду на $\Delta C = 375 - 187 = 188$ млн руб, следовательно его срок окупаемости в анализируемых условиях составит

$$T = \Delta C / C_{сэ} = 188 / 2,904 \approx 65 \text{ лет.}$$

Предположим, что экономия составляет 100 %, то $T = \Delta C / C_{сэ} = 188 / (3 \cdot 2,42) \approx 26 \text{ лет.}$

Очевидно, что эти сроки неприемлемы и поэтому применение поездов «Русич» с АТМ даже взамен серийных с разработанной более четверти века назад системой ТЭП экономически невыгодно. Такой подход имеет место также для вагона «Ока» серии 81-760/761. При оценке этих показателей нельзя не учитывать, что и на ЭПМ с ТМ ПТ легко реализовать рекуперативное торможение с энергетической эффективностью, не уступающей возможной на ЭПМ с АТМ.

С экономической стороны ЭПС, включая вагон метро, с ТЭП ПТ выгоднее, чем с асинхронным приводом. Цена самого состава с АТМ больше в 2–4 раза. Расход энергии тоже больше на подвижном составе с АТМ, особенно с учетом энергосберегающего тягового электропривода (ЭС ТЭП), которым могут быть оборудованы все ЭП ПТ. Затраты на ЭПС с АТМ не окупаются до полной амортизации состава, все это говорит о невыгодности данного типа привода с экономической точки зрения.

2.2. Анализ и оценка технических показателей альтернативных систем тягового электропривода вагонов метрополитена

Сегодня очевидно, что вагоны метрополитена (ВМ) с АТМ много дороже ВМ с ТМ ПТ. Менее очевидно, что они имеют и худшие тягово-энергетические показатели.

В написанной на основе экспериментальных данных статье [4] Ф. Нувьон подчеркивает, что по энергетическим показателям локомотивы с ТМ ПТ имеют лучшие показатели, а с АТМ – наихудшие. Разница в их «энергетической эффективности» превышает 3 %. При большей цене и увеличенном расходе энергии применение АТМ на ВМ вместо ЭС ТЭП может быть экономически оправдано только в случае резкого сокращения других расходов, в частности за счет повышения надёжности и снижения затрат на обслуживание ТМ. Некоторыми специалистами активно пропагандируется тезис о фантастической экономической эффективности этих факторов. Однако известные факты показывают, что ее нет.

Известно, что на построенных с конца 1960-х гг. многих опытных образцах отечественного подвижного состава (электровозы, тепловозы, электропоезда и поезда метрополитена) не удалось обеспечить даже приемлемую работоспособность ТЭП с АТМ.

Если в 1979 г. Ф. Нувьон [5] предупреждал, что для локомотивов постоянного тока использование АТМ неизбежно вызовет рост отказов, а экономия от снижения стоимости обслуживания ТМ будет ничтожной, если вообще будет, то в 1987 г. он приводит данные, свидетельствующие не только о снижении надёжности ЭПС с АТМ, но и о меньшей надёжности самих АТМ по сравнению с ТМ ПТ, а также сообщает количественные показатели, подтверждающие тезис о ничтожности экономической эффективности возможного снижения затрат на обслуживание ТМ. В частности, расходы на обслуживание мономоторных электровазов с ТМ мощностью 2200 кВт составляют 8,1 % от общих эксплуатационных расходов (из них только 10 % приходится на обслуживание ТМ ПТ), а стоимость энергии составляет 29,6 %, в 36 раз больше затрат на обслуживание ТМ. В цитируемой статье сделана оговорка, что соотношения для ЭПС с ТМ меньшей мощности могут быть другими, но это не может изменить принципиальных выводов. Тем более, что в [4] указано, что во Франции затраты на обслуживание ТМ составляют 10 % от общих затрат на обслуживание локомотивов и только 3 % от затрат на обслуживание электропоездов.

Очевидно, что структура эксплуатационных расходов в отечественных условиях не может отличаться кардинально. В частности, выполненный МЭИ и ВНИИВ в конце 1970-х гг. анализ расходов на обслуживание ВМ в Мосметрополитене показал, что, несмотря на низкую надёжность ТМ (в то время в эксплуатации было мало более надёжных ТМ типа ДК-117), затраты на их обслуживание составляли 10–20 % расходов на обслуживание ВМ. С тех пор стоимость энергии резко возросла и поэтому расходы на обслуживание ТМ типа ДК-117, вероятно, как и во Франции, не превысят 1 % от общих эксплуатационных затрат, но при этом даже их полное устранение не компенсирует неизбежного при использовании АТМ увеличения расхода энергии.

Асинхронные электрические машины по сравнению с машинами постоянного тока при равных мощности и частоте вращения имеют меньший КПД. Это обосновывается рядом их особенностей, а именно низким коэффициентом мощности. В подтверждение этого приведем данные полученные в нашем проекте – данные из расчетов Д.А. Солдатенко [6] и других сторонних источников. Опираясь на все данные, можно сделать первоначальные выводы о том, что КПД АТМ не больше, чем КПД ТМ ПТ и для АТМ значения КПД будут снижаться со значением мощности. Применение АТМ оправдано лишь при мощности привода более 430 кВт и использовании для его питания источника синусоидального напряжения. Только в этом случае КПД АТМ будет на 2 % выше КПД ТМ ПТ, что увеличит силу тяги примерно

на 3 % при движении ЭПС со скоростью в интервале от 20 до 40 км/ч. Оценка эффективности тяговых машин по значениям их КПД на номинальных режимах работы показала, что при мощности привода до 300 кВт ТМ ПТ эффективнее АТМ, так как имеет более высокие значения КПД. АТМ плохо охлаждаются из-за малого зазора ($\delta < 2\text{ мм}$), что говорит о необходимости использовать вентиляторы большей мощности. Потребление энергии вентиляторами такой мощности, как известно, в процентном отношении значительно выше процентного значения их мощности в общей мощности ЭПС в номинальном режиме. Можно без ошибки предположить увеличение расхода энергии ЭПС с АТМ в среднем на 10 %.

Конечно, нельзя обойти стороной режимы пуска на ТМ ПТ. Пуск осуществляется с помощью реостатного или импульсного преобразователя. При разгоне на пусковые реостаты приходится большой расход энергии, при асинхронном приводе они не нужны. Реостатные пусковые потери (одноступенчатый пуск) составляют у серийных поездов порядка 20 % [7].

Тягово-энергетические расчёты показывают, что применение ЭС ТЭП на ВМ серии 81.717/81.714 обеспечивает при движении по расчетному перегону со скоростями сообщения 45; 46 и 48 км/ч снижение расхода энергии благодаря улучшению динамики и применению рекуперации соответственно на 21, 27 и 33 %. В частности, одна перегруппировка двигателей позволяет снизить потери до 10 %. Кроме того, использование энергосберегающего алгоритма управления режимом пуска способствует снижению потерь в 3,5 раза, а эффективность рекуперации увеличивается ориентировочно вдвое благодаря снижению скорости ее окончания с 50 до 25 км/ч. В итоге потери в пусковом реостате снижаются до 5 %. Соответственно, экономия энергии увеличивается до 24–35 %. Этот результат достигается заменой одноступенчатого пуска и торможения двухступенчатыми за счет объединения схем силовых цепей двух моторных вагонов одним межвагонным соединением в так называемую сплотку.

Очевидно, что у ВМ с АТМ потери энергии в тяге будут существенно выше, а ее возврат при рекуперации много ниже. Это обстоятельство подтверждается как косвенными, так и непосредственными данными.

Известно [8], что энергетические показатели ВМ с плавным импульсным (ПИУ) значительно хуже, чем у вагонов с дискретным резисторным управлением (ДРУ) и ЭС ТЭП. Но у ВМ с АТМ потери энергии выше, а её возврат при рекуперации ниже, чем у вагонов с ПИУ из-за дополнительного преобразования энергии (инвертор) и невозможности выключения преобразователей, а также его вентиляторов большой мощности после достижения максимального напряжения питания

тяговой машины. Реостатные потери при пуске ТМ ПТ кратковременны (пусковой реостат отключается по достижении номинального напряжения питания).

Некоторые специалисты на первое место в эффективности применения АТМ ставят возможность увеличения силы тяги за счет большой динамической жесткости тяговых характеристик. В статье А.М. Солодунова и др. [9] утверждается, что «применение АТМ позволит увеличить расчетный коэффициент сцепления на 40 %». Это предположение о преимуществах АТМ перед ТМ ПТ очевидно ошибочно, так как применение ТМ ПТ с независимым возбуждением (НВ) позволяет иметь динамическую жесткость тяговых характеристик, достаточную для полной реализации преимуществ жестких характеристик по повышению противобуксовочных свойств локомотивов и моторных вагонов. При замене последовательного возбуждения (ПВ) на независимое на ЭПС с ТМ ПТ сила тяги на участке её ограничения условиями сцепления может быть увеличена на 20 %.

Более того, есть основания полагать, что на ЭПС с АТМ достигаемое увеличение силы тяги по сравнению с ЭПС с ТМ ПТ с ПВ будет меньше, чем соответствующий показатель ЭПС с ТМ ПТ с НВ. Это объясняется большим разбросом нагрузок АТМ при их питании от общего источника, применение которого признано практически неизбежным из-за большой сложности оборудования ЭПС индивидуальными инверторами для каждой АТМ. В частности, и при индивидуальном регулировании непросто достичь равенства нагрузок АТМ. Еще в упомянутой статье Ф. Каспарека [10] сообщается, что при разнице диаметров бандажей колесных пар в 5 мм разброс вращающих моментов АТМ при совместном регулировании составляет 19 %, а при индивидуальном – 26 %.

Некоторые специалисты, которые пропагандируют тяговый привод с АТМ, считают, что при параллельном включении нескольких АТМ к одному источнику питания нагрузки ТМ будут с течением времени «автоматически» выравниваться за счёт большего износа бандажей колесных пар, развивающих большую силу тяги. Реально такого самовыравнивания нагрузок не будет. Для вагонов метрополитена и наземных электропоездов, имеющих малые силы тяги на ось, трудно предположить возможность необходимого для самовыравнивания нагрузок АТМ износа бандажей колес за счёт проскальзывания, а французский опыт показывает, что его не было и на электровозах. В упомянутой ранее статье Ф. Нувьон говорится, что опыт эксплуатации электровозов серии 14000 с АТМ показал невозможность параллельной работы нескольких АТМ при питании от одного источника. По техническим показателям асинхронный тяговый привод уступает тяговому приводу постоянного тока. Заметно существенное сниже-

ние эффективности асинхронного привода, что делает его менее востребованным на подвижном составе.

Заключение

Приведенные в выполненном анализе сведения и соображения подтверждают, что ТЭП с АТМ очевидно хуже ТЭП с ТМ ПТ по итоговой цене ВМ и расходу электроэнергии и, вероятно, не имеет преимуществ по тяговым свойствам и расходам на обслуживание. Из этого следует, что АТМ можно применять только тогда, когда без их использования нельзя получить требующиеся тяговые характеристики, в частности – на высокоскоростных ЭП [11].

В работах МЭИ [1] и [12] показана возможность резкого улучшения энергетических показателей ЭПМ с ТМ ПТ за счет применения на них рекуперативного торможения и энергосберегающего алгоритма управления тяговым электроприводом, достигаемого при относительно малых затратах и с использованием большей части установленного на них электрооборудования. В публикациях В.А. Мнацаканова утверждается, что применение используемого в разработанной МЭИ системе ТЭП бесконтактного реостатного контроллера на базе полупроводниковых вентилях повышает надежность ЭПМ с ТМ ПТ до уровня, существенно превышающего этот показатель поездов с АТМ [13]. В целом же изложенные в выполненном анализе факты и соображения показывают ущербность применения в Мосметрополитене поездов с АТМ (вагон «Русич», «Ока» серии 81-760/761 и др.) и являются достаточным основанием для массового внедрения разработанной МЭИ системы ТЭП с ТМ ПТ. Одним из её важнейших преимуществ является простота и малая стоимость использования для модернизации во время капитальных ремонтов тех «4 тысяч вагонов, которые ещё не отработали срок годности». Внедрение предложенной МЭИ и опробованной на 5 опытных вагонах системы ТЭП обеспечило бы Мосметрополитену значительный экономический эффект в короткие сроки.

Литература

1. Тулупов, В.Д. Улучшение энергетических показателей электропоездов / В.Д. Тулупов // Железнодорожный транспорт. – 1991. – № 9. – С. 38–41.
2. Ле Суан Хонг. Оценка эффективности применения систем асинхронного тягового привода электроподвижного состава / Ле Суан Хонг, В.Д. Тулупов // Энергетика и энергосбережение: теория и практика: материалы I Всерос. науч.-практ. конф. – Кемерово, 2014.
3. Тулупов, В.Д. Тяговый электропривод постоянного тока с наилучшими технико-экономическими показателями / В.Д. Тулупов //

Электросила: сб. – СПб., 2002. – Вып. 41. – С. 196–210.

4. Nouvion, F.F. Consideration on the use of d.c. and three-phase traction motors and transmission system in the context of motive power development / F.F. Nouvion // Proc. Inst. Mech. Engrs. – 1987. – Vol. 201, no. 2. – P. 99–113.

5. Nouvion, F.F. Into the second century / F.F. Nouvion // Railway Gazette International. – April 1979. – P. 296–300.

6. Солдатенко, Д.А. Разработка методов выбора параметров тяговых приводов тепловозов по уровню энергетической эффективности: автореф. ... канд. техн. наук / Д.А. Солдатенко. – М., 2008. – 24 с.

7. Тулунов, В.Д. Эффективность рекуперативного торможения электропоездов постоянного тока / В.Д. Тулунов, Д.В. Минаев // Железнодорожный транспорт. – 2005. – № 10. – С. 47–50.

8. Тулунов, В.Д. Эффективность ЭПС с импульсным управлением / В.Д. Тулунов // Железнодорожный транспорт. – 1994. – № 3. – С. 46–55; № 4. – С. 49–58.

9. Асинхронный привод электропоездов / А.М. Солодунов, Ю.М. Иньков, Ф.И. Сеничев и др. // Железнодорожный транспорт. – 1987. – № 1. – С. 43–46.

10. Kasperek, F. Die elektrische Ausrüstung der neuen Wiener U-Bahn-Wagen / F. Kasperek // Eisenbahntechnik. – 1985. – № 4.

11. Мугинштейн, Л.А. О выборе типа тягового электропривода электроподвижного состава / Л.А. Мугинштейн, В.А. Кучумов, О.Н. Назаров // Железнодорожный транспорт. – 2005. – № 5. – С. 42–48.

12. Ле Суан Хонг. Моделирование системы тягового электропривода вагонов метрополитена с наилучшими энергетическими показателями / Ле Суан Хонг // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. V междунар. науч.-техн. конф., г. Томск, 10–14 ноября 2014 г. Т. 1 / Мин-во образования и науки РФ; Томский политехнический университет. – Томск, 2014. – С. 407–411.

13. Мнацаканов, В.А. Будущее – за бесконтактными аппаратами / В.А. Мнацаканов // Локомотив: массовый производственный журнал. – 2005. – № 9. – С. 32–33.

Ле Суан Хонг, аспирант, кафедра «Электротехнические комплексы автономных объектов и электрический транспорт», Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», г. Москва; tenbigstar1209@yahoo.com.

Тулунов Виктор Дмитриевич, д-р техн. наук, профессор, кафедра «Электротехнические комплексы автономных объектов и электрический транспорт», Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», г. Москва; tulupovVD@mpei.ru.

Поступила в редакцию 21 июня 2015 г.

DOI: 10.14529/power150310

ANALYSIS AND EVALUATION OF ENERGY-ECONOMIC EFFICIENCY OF METRO WITH ALTERNATIVE ELECTRIC TRACTION SYSTEMS

Le Xuan Hong, National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russian Federation, tenbigstar1209@yahoo.com,

V.D. Tulupov, National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russian Federation, tulupovVD@mpei.ru

Based on the analysis of known technology and economic results of the establishment and operation of Metro, railways and urban electric transport with different electric traction systems on theoretically sound and proven technical solutions to improve the economic efficiency shows a lack of validity of the common beliefs among professionals about no alternative to the use on Metro only asynchronous traction machines, and shows the exact same capabilities significantly increase the effectiveness of their use in traction drive DC.

Keywords: technical and economic efficiency, the cost of the train, electric energy consumption, payback period, energy performance.

References

1. Tulupov V.D. [Improving Energy Performance of Trains]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway Transport], 1991, no. 9, pp. 38–41. (in Russ.)
2. Le Xuan Hong, Tulupov V.D. [Evaluating the Effectiveness of Asynchronous Traction Drive Systems of Electric rolling]. *Energetika i energosberezhenie: teoriya i praktika: materialy I Vseros. nauch.-prakt. konf.* [Energy and Energy Efficiency: Theory and Practice. Proceedings of the I All Russian Scientific-Practical Conference]. Kemerovo, 2014. (in Russ.)
3. Tulupov V.D. [Traction System DC with the Best Technical and Economic Parameters]. *Elektrosila: sbornik* [Collection “Electric power”]. St. Petersburg, 2002, iss. 41, pp. 196–210. (in Russ.)
4. Nouvion F.F. Considerations on the Use of D.C. and Three-Phase Traction Motors and Transmission System in the Context of Motive Power Development. *Proc. Inst. Mech. Engrs*, 1987, vol. 201, no. 2, pp. 99–113.
5. Nouvion F.F. Into the second century. *Railway Gazette International*, April 1979, pp. 296–300.
6. Soldatenko D. A. *Razrabotka metodov vybora parametrov tyagovykh privodov teplovozov po urovnyu energeticheskoy effektivnosti: avtoref. ... kand. tekhn. nauk* [Development of Methods for Selecting Parameters of the Traction Systems of Locomotives in the Level of Energy Efficiency. Abstract of Doctor of Science]. Moscow, 2008. 24 p.
7. Tulupov V.D. [Efficiency of Regenerative Braking Electric with DC]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway Transport], 2005, no. 10, pp. 47–50. (in Russ.)
8. Tulupov V.D. [Efficiency of Electric Rolling Composition with Impulse Control]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway Transport], 1994, no. 3, pp. 46–55; no. 4, pp. 49–58. (in Russ.)
9. Solodunov A.M., Inkov Y.M., Senichev F.I. et al. [Asynchronous Traction Motor of Electric]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway Transport], 1987, no. 1, pp. 43–46. (in Russ.)
10. Kasperek F. Die elektrische Ausrüstung der neuen Wiener U-Bahn-Wagen. *Eisenbahntechnik*, 1985, no. 4.
11. Muginshteyn L.A., Kuchumov V.A., Nazarov O.N. [The Choice of the Type of Traction Drive Systems of Electric Rolling Composition]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway Transport], 2005, no. 5, pp. 42–48. (in Russ.)
12. Le Xuan Hong. [Simulation of Traction Drive Systems of Metro with the Best Energy Performance]. *Elektroenergetika glazami molodezhi: nauch. tr. V mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., g. Tomsk, 10–14 noyabrya 2014 g. T. 1* [Power Eyes of Youth: Research Papers of 5 International Scientific-Technical Conference. Vol. 1, Tomsk, 10–14 November 2014]. Tomsk, 2014, pp. 407–411. (in Russ.)
13. Mnatsakanov V.A. [Future – for the Non-contact Devices]. *Lokomotiv: massovyy proizvodstvennyy zhurnal* [Locomotive: Mass Production Journal], 2005, no. 9, pp. 32–33. (in Russ.)

Received 21 June 2015

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Ле Суан Хонг. Анализ и оценка энерго-экономической эффективности вагонов метрополитена с альтернативными системами тягового электропривода / Ле Суан Хонг, В.Д. Тулупов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2015. – Т. 15, № 3. – С. 74–81. DOI: 10.14529/power150310

FOR CITATION

Le Xuan Hong, Tulupov V.D. Analysis and Evaluation of Energy-Economic Efficiency of Metro with Alternative Electric Traction Systems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2015, vol. 15, no. 3, pp. 74–81. (in Russ.) DOI: 10.14529/power150310