

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ БЕЗРЕЛЬСОВОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА НА БАЗЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Хрипач Н.А.¹, Шустров Ф.А.¹, Петриченко Д.А.¹

¹ФГБОУ ВПО «Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)», Университет машиностроения, Москва, e-mail: shustrov@yandex.ru

В статье проведен краткий анализ существующих и перспективных видов безрельсового пассажирского транспорта на базе тягового электропривода. Представлен расчетный ездовой цикл пассажирского транспорта, построенный на основании мониторинга движения автобуса по репрезентативному городскому маршруту. Описаны результаты оценки эффективности энергопотребления безрельсового пассажирского транспорта на базе тягового электропривода с различными подходами к энергообеспечению при движении по расчетному ездовому циклу, приближенному к реальным эксплуатационным условиям. Определена наиболее эффективная концепция безрельсового городского пассажирского транспорта на базе тягового электропривода и соответствующий ей способ пополнения бортовых накопителей электрической энергии.

Ключевые слова: безрельсовый пассажирский транспорт, тяговый электропривод, энергоэффективность.

ANALYSIS OF THE ENERGY EFFICIENCY OF ROAD PASSENGER TRANSPORT ON THE BASIS OF THE TRACTION ELECTRIC DRIVE

Khripach N.A.¹, Shustrov F.A.¹, Petrichenko D.A.¹

¹ Federal State Educational Institution of Higher Professional Education "Moscow state university of mechanical engineering (MAMI)", Moscow, e-mail: shustrov@yandex.ru

The article gives a brief analysis of existing and future types of road passenger transport on the basis of the traction electric drive. Presents estimated driving cycle passenger transport, based on monitoring the bus for a representative urban route. Describes the results of evaluating the energy efficiency of road passenger transport on the basis of the traction electric drive with different approaches to the power supply when moving along the calculated riding the cycle, close to real operating conditions. The most effective concept trackless urban passenger transport on the basis of the traction electric drive and the corresponding payment method on-Board drives electrical energy.

Keywords: road passenger transport, traction electric drive, energy efficiency.

Непрерывный рост населения крупных городов приводит к увеличению интенсивности дорожного движения, вследствие чего повышается концентрация вредных веществ в воздушном бассейне. Современный уровень развития технологий позволяет частично уменьшать рост негативного воздействия пассажирского транспорта путем внедрения бортовых энергетических установок с более совершенными экономическими и экологическими показателями, однако согласно оценке интегральных выбросов всего парка пассажирских транспортных средств, в основном это относится к автобусам, эффект от их внедрения постепенно ставится все менее заметным. Неоспоримое преимущество, с точки зрения минимизации вредных выбросов в местах непосредственной эксплуатации, находится у электрического транспорта, в особенности у электробусов, являющихся альтернативой используемым сегодня автобусам, но их широкому внедрению в транспортную инфраструктуру препятствует отсутствие на данный момент развитой инфраструктуры и необходимость определения наиболее эффективной, в том числе с точки зрения

энергопотребления, концепции организации энергообеспечения. В настоящей статье будут представлены результаты анализа эффективности энергопотребления безрельсового пассажирского транспорта на базе тягового электропривода, в котором проведено сравнение удельных мощностных показателей троллейбусов и электробусов с различными концепциями зарядки бортовых накопителей энергии.

Определение перспективных видов безрельсового пассажирского транспорта на базе тягового электропривода и методов их энергообеспечения

Основным видом безрельсового пассажирского транспорта, составляющим немалую часть парков в большинстве крупных городов России, являются троллейбусы. Активное внедрение данного вида транспорта в РФ, начавшееся во второй половине XX века и продолжающееся по настоящее время, обусловлено рядом преимуществ, которыми обладают троллейбусы в сравнении с автобусами. Во-первых, троллейбус является более экологически совершенным видом транспорта ввиду отсутствия при его работе непосредственных вредных выбросов, если не брать в рассмотрение тот негативный вклад в загрязнение окружающей среды, который вызван производством электроэнергии на ТЭЦ или других объектах энергоснабжения, необходимой для его эксплуатации. Во-вторых, троллейбусы имеют возможность рекуперировать свою кинетическую энергию в ходе торможения, при этом на современных образцах величина рекуперированной энергии торможения, которая возвращается в контактную сеть, может достигать до 70% от общей кинетической энергии. В-третьих, ресурс эксплуатации троллейбусов превосходит аналогичный параметр автобусов, что объясняется меньшими вибрационными нагрузками на элементы кузова вследствие отсутствия в составе энергоустановок двигателей внутреннего сгорания.

Несмотря на вышеуказанные преимущества, рассматривать троллейбусы как основу перспективной городской инфраструктуры общественного транспорта не корректно, что объясняется рядом недостатков при их эксплуатации. Во-первых, это плохая маневренность, вызванная привязкой к контактным электрическим линиям, при этом вопрос зависимости троллейбусов от линий электропередач наиболее остро возникает в ходе организации новых транспортных маршрутов, т.к. это требует больших финансовых затрат на первоначальном этапе. Во-вторых, троллейбус чувствителен к состоянию дорожного покрытия и контактной сети. При необходимости проехать повреждённый участок дороги приходится значительно снижать скорость, чтобы избежать схода токоприемников с контактной сети. Также конструкция соединительных частей контактной сети (пересечений, стрелок, разделяемых соединений на разводных мостах) требует значительного снижения скорости при их прохождении. В-третьих, не стоит забывать, что троллейбус чувствителен к обледенению

контактной сети, вследствие чего возникает плохой электрический контакт, в свою очередь приводящий к быстрому износу контактных вставок токоприемников.

Сочетание всех вышеуказанных преимуществ и отсутствие перечисленных недостатков троллейбусов можно получить при использовании в качестве общественного транспорта электробусов. Данный вид транспорта обладает, помимо высоких экологических и энергоэффективных показателей, хорошими маневренными качествами, позволяющими ему свободно перемещаться по заданному маршруту с определенными допустимыми отклонениями. Ограничивающими факторами в данном случае являются только ёмкость накопителей электроэнергии электробусов и концепция организации их подзарядки.

Для проведения анализа энергопотребления безрельсового пассажирского транспорта в настоящей работе были выбраны следующие его типы:

- 1) троллейбус, питаемый от контактной сети;
- 2) электробус с накопителями электрической энергии большой ёмкости, обеспечивающими автономный пробег до 200 км, заряжаемый в депо;
- 3) электробус с накопителями электрической энергии ограниченной ёмкости, обеспечивающими автономный пробег до 50 км, при этом их зарядка осуществляется на конечных остановочных пунктах маршрута методом быстрой (10-30 минут) зарядки;
- 4) электробус с накопителями электрической энергии минимальной ёмкости, обеспечивающими автономный пробег до 5 км, при этом кратковременные сеансы заряда осуществляются на пассажирских остановках маршрута следования транспортного средства, и их длительность сопоставима с продолжительностью процесса посадки и высадки пассажиров.

Определение расчетного ездового цикла безрельсового пассажирского транспорта, приближенного к реальным условиям городского движения

При проведении анализа эффективности энергопотребления особое внимание необходимо уделять коррелированию расчетных данных с реальными эксплуатационными показателями, получаемыми в ходе движения общественного транспорта в условиях интенсивного городского трафика. Для проведения расчетных исследований необходимо разработать расчетный ездовой цикл, который наиболее точно позволит описать реальные условия городского движения безрельсового пассажирского транспорта.

Первым шагом в определении расчетного ездового цикла являлся выбор репрезентативного маршрута городского общественного транспорта на примере крупного мегаполиса. В настоящей статье выбор производился на основании действующих на момент проведения исследований автобусных маршрутов г. Москвы, как города РФ, обладающего

наибольшей интенсивностью трафика, для которого характерна высокая концентрация дорожных заторов.

Для выбора конкретного маршрута, позволяющего наиболее точно описать городской цикл движения общественного транспорта, был определен ряд оценочных критериев. Во-первых, выбор репрезентативного маршрута осуществлялся исключительно из перечня автобусных маршрутов. Это объясняется необходимостью поиска технических решений по улучшению экологических показателей действующего безрельсового городского общественного транспорта путем перевода его на тяговый электропривод. Во-вторых, все промежуточные остановочные пункты требуемого маршрута должны находиться в черте города, не выходя за его пределы. В-третьих, при выборе маршрута учитывался территориальный фактор нахождения промежуточных остановочных пунктов. Наибольшее внимание уделялось тем маршрутам, движение по которым осуществлялось в центральной и исторических частях города. Таким образом, приоритет был отдан маршрутам, каким-либо способом проходящим или пересекающим Садовое кольцо г. Москвы. В результате была составлена выборка из наиболее подходящих под вышеописанные критерии действующих маршрутов автобусов и на основании данных о загруженности дорожной сети г. Москвы был определен базовый маршрут, в качестве которого выбран маршрут городского автобуса № 12ц (Метро «Китай-город» - Дворец спорта «Мегаспорт»).

По результатам мониторинга движения городского общественного транспорта по выбранному маршруту была проведена интерполяция мгновенных значений скорости, высоты нахождения и загрузки автотранспортного средства (АТС) за цикл, на основании чего был построен расчетный ездовой цикл движения, включающий в себя график изменения скорости АТС от пройденного расстояния, представленный на рисунке 1, график изменения высоты местоположения АТС относительно уровня моря в зависимости от пройденного пути, представленный на рисунке 2, а также график изменения загрузки АТС, представленный на рисунке 3.

На основании разработанного расчетного ездового цикла движения пассажирского транспорта в условиях интенсивного городского трафика был выполнен анализ энергоэффективности различных концепций реализации движения безрельсового общественного транспорта, использующего в качестве основы тяговый электропривод.

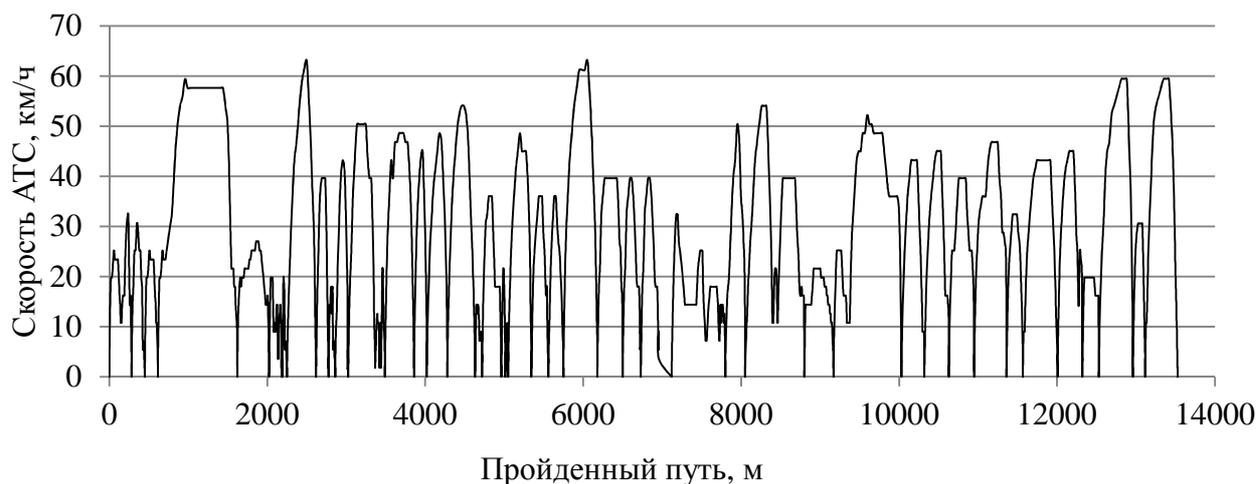


Рис. 1. График изменения скорости АТС от пройденного расстояния по расчетному ездовому циклу движения городского пассажирского транспорта.

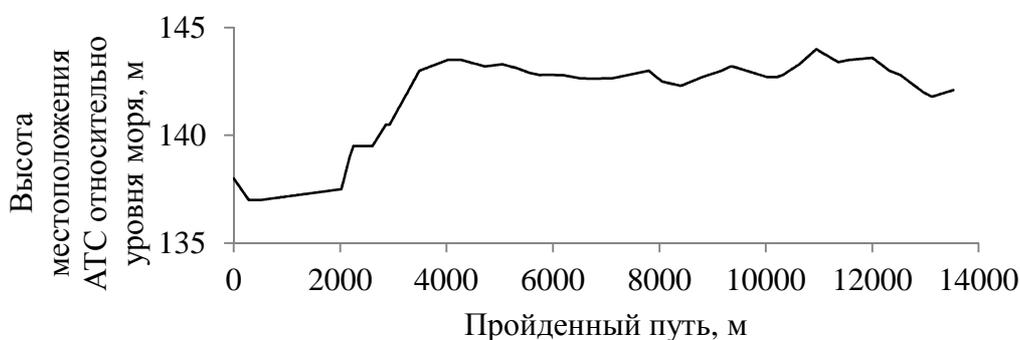


Рис. 2. График изменения высоты местоположения АТС относительно уровня моря в зависимости от пройденного пути по расчетному ездовому циклу движения городского пассажирского транспорта.

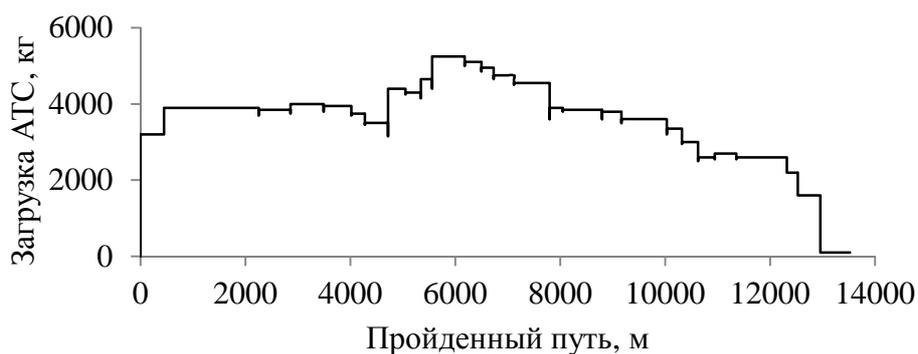


Рис. 3. График изменения загрузки АТС от пройденного расстояния по расчетному ездовому циклу движения городского пассажирского транспорта.

Анализ энергоэффективных показателей пассажирского транспорта на базе тягового электропривода при движении по расчетному ездовому циклу

Для проведения сравнительного анализа показателей эффективности использования электроэнергии при движении троллейбуса и электробуса с различной организацией

пополнения бортовых накопителей по расчетному ездовому циклу был проведен тягово-динамический расчет АТС для всех рассматриваемых концепций в соответствии с [1]. Для этого в качестве базовых транспортных средств были выбраны серийно выпускаемые образцы пассажирского транспорта со схожими техническими характеристиками, в том числе с близкими параметрами пассажироместимости: для троллейбуса - троллейбус Тролза-5265 «Мегаполис» производства ЗАО «Тролза»; для электробуса - электробус ЛиАЗ-6274 производства компании «Русские Автобусы - Группа ГАЗ».

С учетом величин максимального автономного пробега, указанных в принятых ранее методах пополнения бортовых электронакопителей электробусов, были пересчитаны массовые показатели для концепций с зарядкой на конечных остановочных, а также с подзарядкой на промежуточных остановочных пунктах.

На основании принятых исходных данных были определены средние значения потребляемой мощности без учета рекуперации и со 100%-ной рекуперацией для АТС на базе тягового электропривода, движущихся по расчетному ездовому циклу, для четырех методов энергообеспечения. Полученные данные представлены в таблице 1.

Таблица 1

Показатели энергопотребления АТС на базе тягового электропривода

№	Параметр	Тип безрельсового пассажирского транспорта			
		Троллейбус Тролза-5265	Электробус ЛиАЗ-6274	Электробус с зарядкой на конечных остановочных пунктах	Электробус с подзарядкой на промежуточных остановочных пунктах
1	Масса снаряженная, кг	10520	12100	10820	10585
2	Максимальный запас хода на накопителях без подзарядки, не менее, км	-	200	25	5
3	Средняя потребляемая мощность без учета рекуперации, кВт	25,72	28,64	26,45	26,04
4	Средняя потребляемая мощность с учетом 100%-ной рекуперации, кВт	16,17	17,95	16,68	16,43

Для более адекватной оценки показателей эффективности расходования электрической энергии АТС на базе тягового электропривода с различными концепциями энергообеспечения необходимо провести сравнительную оценку эффективности преобразования электроэнергии при ее передаче от источника до электропривода.

Рассмотрим детально каждый из используемых в сравнительном анализе способов энергообеспечения АТС на базе тягового электропривода.

Троллейбус

Троллейбус, как транспортное средство без буферного накопителя энергии, имеет максимальное количество компонентов преобразования энергии на пути к электроприводу. В общем случае последовательность преобразования энергии от сети до колес троллейбуса имеет вид: электросеть → подстанция → выпрямитель → распределительная контактная сеть → электропривод → колеса. При торможении в ходе рекуперации кинетической энергии АТС процесс электропередачи протекает в обратной последовательности.

Подстанция представляет собой трансформатор и выпрямитель. Трансформатор преобразует подающееся на него среднее второе напряжение [2] (класс СН-2: 1-20 кВ, чаще 6.3-10 кВ). Выпрямитель преобразует его в постоянное напряжение 600 В, которое и подается на сегмент контактной сети. В качестве средних значений можно выделить:

- КПД современных силовых трансформаторов находится в диапазоне 0.95-0.996 (выше для больших мощностей). Для уровня подстанции можно принять 0.98;
- КПД современных выпрямителей сильно различается в зависимости от схемы, но находится в диапазоне 0.97-0.98.

Надежность энергоснабжения троллейбуса во многом зависит от принятых схем питания и секционирования контактной сети. Участки контактной сети могут получать питание посредством контактной линии как от одной тяговой подстанции (односторонняя схема питания), так и от двух (двусторонняя) [3; 4]. В последнем случае напряжения на шинах постоянного тока обеих питающих подстанций должны быть равны, а характеристики преобразователей одинаковы. Согласно правилам технической эксплуатации потеря напряжения от подстанции до токоприемника троллейбуса, находящегося в любом месте трассы, не должна превышать 15% номинального напряжения сети [3], т.е. 90 В. Это напряжение будет создавать активные потери в проводах. Таким образом, КПД контактной сети составляет 0.85. К потерям же контактной сети можно отнести и потери в токоъемнике троллейбуса, т.к. они имеют ту же природу, но ввиду малых размеров больших потерь не добавляют.

Существующие троллейбусы используют современный электрический привод. Преобразователь-инвертор осуществляет преобразование постоянного напряжения, поступающего из контактной сети, в переменное, необходимое для работы электрической машины. Для современного электропривода, работающего в широком диапазоне частот и выходных напряжений, КПД является величиной переменной. Его значение колеблется в диапазоне 0.93-0.98 [5].

Коэффициент полезного действия электрической машины зависит от ее типа и, так же как и для инвертора, от режима работы – насколько он отличается от номинального. В современных троллейбусах применяют в основном асинхронные тяговые электродвигатели. КПД данного типа машин на номинальных режимах имеет в среднем значение 0.88-0.97, что верно и для других типов электрических машин [6]. Следует отметить, что в генераторном режиме КПД асинхронной машины падает на 1-2%.

Электробус

Последовательность преобразования энергии от сети в современном электробусе имеет вид: электросеть → подстанция → зарядное устройство → накопитель энергии. Далее на борту при разгоне: накопитель энергии → электропривод → колеса. При торможении: колеса → электропривод → накопитель энергии.

Силовая подстанция для электробуса, так же как и для троллейбуса, будет состоять из трансформатора и зарядного устройства (вместо выпрямителя для троллейбуса). Несмотря на небольшое отличие, эффективность этих устройств аналогична рассмотренным выше инверторам и составляет 0.93-0.98.

В отличие от преобразователей энергии эффективность накопителя энергии определяется как соотношение энергии заряда за определенный период к энергии разряда за тот же период. Значения КПД основных типов электрических накопителей составляют:

- для литий-ионных аккумуляторов, к примеру, марки КОКАМ [7], имеем КПД 0.908-0.955 в зависимости от конфигурации батареи;

- для суперконденсаторов имеем практически аналогичные показатели эффективности: свыше 0.9 [8].

Инвертор и тяговый электродвигатель в электробусе может применяться аналогичный троллейбусу.

Электробус с зарядкой на конечных остановочных пунктах

Последовательность преобразования энергии от сети для данного типа электробусов выглядит следующим образом: электросеть → подстанция → зарядное устройство → зарядка накопителя. Далее на борту при разгоне: накопитель энергии → электропривод → колеса. При торможении: колеса → электропривод → накопитель энергии.

Рассмотрим различия с электробусом с накопителями электрической энергии большой ёмкости. Силовая подстанция и зарядное устройство, располагающееся на конечной остановке маршрута, будет функционировать таким же образом, что и для предыдущего случая. Однако преобразователь будет иметь более высокую пропускную мощность и/или ток для быстрой зарядки, вследствие чего возможно незначительное повышение его КПД на 0,2-0,3% относительно предыдущей конструкции.

В электробусах с зарядкой на конечных остановочных пунктах применяются аналогичные накопители энергии, что и в предыдущей конструкции, однако более уместно делать акцент на суперконденсаторы.

Электробус с подзарядкой на промежуточных остановочных пунктах

Последовательность преобразования энергии от сети при данной стратегии энергообеспечения следующая: электросеть → подстанция → контактная сеть → зарядное устройство → дозарядка накопителя. Далее на борту при разгоне: накопитель энергии → электропривод → колеса. При торможении: колеса → электропривод → накопитель энергии.

Рассмотрим отличия от вышеописанных конструкций электробусов.

Подстанция должна обеспечивать подачу электроэнергии на фидеры контактной сети. Выпрямитель в данной схеме отсутствует.

Контактная сеть имеет такую же структуру, как и для троллейбусов: фидеры, подводящие ток к сегментам, но сегменты имеют более короткую длину, а фидеры подводят ток к остановкам, при этом используется переменный ток, т.к. это более эффективно, что позволит увеличить КПД этой части предположительно до 0.98.

Зарядное устройство для данной концепции может быть как стационарное и конструктивно располагаться на остановке, так и мобильное – ездить с каждым электробусом. Так как и в том и в другом случае заряжать одновременно будет необходимо только один электробус, то характеристики в обоих случаях будут одинаковыми. Зарядное устройство должно быстро заряжать электробус, находящийся на остановке, и должно обеспечивать большой ток. КПД такого зарядного устройства будет равен КПД преобразователя и составит, предположительно, 0.97-0.98.

Еще один вариант конструкции самого зарядного устройства – со своим собственным буферным накопителем энергии. Это позволит уменьшить потребляемый ток от сети, накапливать энергию, пока нет электробуса, и быстро ее отдавать электробусу во время зарядки. Естественно, КПД такого зарядного устройства упадет за счет КПД буферного накопителя.

В описываемом типе электробуса может применяться любой накопитель энергии, только меньшего масштаба. Наиболее эффективным следует признать использование суперконденсаторов, обеспечивающих очень высокие токи зарядки и разрядки. КПД таких накопителей были указаны ранее.

Принимая во внимание общие значения КПД зарядки и рекуперации, полученные в ходе проведенного анализа эффективности преобразования электроэнергии для каждой концепции энергообеспечения безрельсового электрического пассажирского транспорта, были определены средние значения потребляемой мощности АТС по расчетному ездовому

циклу без учета и с учетом рекуперации, представленные в таблице 2. Приведенные данные демонстрируют, что наиболее эффективное потребление электроэнергии от электросети, а также более высокая степень рекуперации электроэнергии (до 26% от требуемой для движения АТС энергии) соответствует электробусам.

Таблица 2

Показатели эффективности преобразования электроэнергии и энергопотребления
электрического пассажирского транспорта

Параметр	Тип безрельсового пассажирского транспорта				
	Троллейбус	Электробус	Электробус с зарядкой на конечных остановочных пунктах	Электробус с подзарядкой на промежуточных остановочных пунктах	
Общий КПД заряда	0,702	0,823	0,825	0,779	
Общий КПД рекуперации	0,691	0,848	0,848	0,848	
Средняя потребляемая мощность без учета рекуперации, кВт	36,64	34,8	32,06	33,43	
Средняя потребляемая мощность с учетом рекуперации, кВт	30,04	25,73	23,78	25,28	
Удельная потребляемая мощность с учетом рекуперации	кВт/км	2,22	1,9	1,76	1,87
	кВт/ч	2,66	2,28	2,11	2,24

Таким образом, подводя итоги оценки эффективности преобразования электроэнергии при ее передаче от источника до электропривода для АТС на базе тягового электропривода с различными концепциями энергообеспечения, следует выделить в качестве наиболее эффективной концепцию использования электробусов с зарядкой на конечных остановочных пунктах, т.к. данная схема организации энергообеспечения имеет наивысшие значения КПД как в случае прямого использования электроэнергии, так и в случае рекуперации кинетической энергии торможения АТС. Также необходимо подчеркнуть, что значение удельной потребляемой мощности у всех рассмотренных методов выше, чем при использовании электробусов с зарядкой на конечных остановочных пунктах, в частности: у троллейбуса - на 26%, у электробуса с запасом хода 200 км - на 8%; у электробуса с подзарядкой на промежуточных остановочных пунктах - на 6%.

Заключение

В ходе проведения сравнительного анализа энергопотребления троллейбуса и электробусов с различными концепциями зарядки бортовых накопителей энергии было установлено, что наиболее энергоэффективной концепцией пассажирского транспорта на

базе тягового электропривода является использование электробусов с зарядкой на конечных остановочных пунктах. Реализация такого метода энергообеспечения в условиях реального городского движения позволит минимизировать значение удельной потребляемой электрической мощности в сравнении с другими вышеописанными подходами.

Кроме того, стоит отметить, что в качестве аналога концепции заряда электробусов на конечных остановочных пунктах может быть использован способ автоматизированной замены накопителей электрической энергии, в том числе реализованных в качестве отдельного прицепного элемента электробуса, на конечных остановках. Указанная технология позволяет существенно сократить время простоя пассажирского транспорта за счет оптимизации времени зарядки.

Работа проведена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках реализации государственного задания в сфере научной деятельности, регистрационный номер 10.9099.2014.

Список литературы

1. Вахламов В.К. Конструкция, расчет и эксплуатационные свойства автомобилей : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. — М. : Издательский центр «Академия», 2007. - 560 с.
2. ГОСТ 19431-84 «Энергетика и электрификация. Термины и определения».
3. СНиП 2.05.09-90 «Трамвайные и троллейбусные линии».
4. Афанасьев А.С. Контактные сети трамвая и троллейбуса : учебник для СПТУ. – М. : Транспорт, 1988.
5. Овчинников И. Электромеханические и мехатронные системы. – СПб. : Корона. Век, 2012. – Ч. 1.
6. Копылов И., Клоков Б., Морозкин В. и Токарев Б. Проектирование электрических машин : учебник для вузов. – М. : Высшая школа, 2002.
7. Edison, «WP 1.5 Battery Modelling – Final Report».
8. Сорокин А. Суперконденсаторы // electrosad.ru. 2011. - URL: <http://www.electrosad.ru/Electronics/SuperCon.htm> (дата обращения: 29.10.2014).

Рецензенты:

Химич В.Л., д.т.н., профессор, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород.

Ютт В.Е., д.т.н., профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», г. Москва.