
УДК 62-838; 621.333

А. И. Сафонов

ОБОСНОВАНИЕ ТЯГОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ПРОБЛЕМА ВЫБОРА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ ТРОЛЛЕЙБУСА

UDC 62-838; 621.333

A. I. Safonau

JUSTIFICATION OF THE TRACTION CHARACTERISTIC AND THE PROBLEM OF CHOICE OF THE TROLLEYBUS ELECTRIC MOTOR AND ITS AUXILIARY POWER SOURCES

Аннотация

Обоснована необходимость и заданы критерии формирования методики определения требуемой характеристики и основных параметров тягового электродвигателя троллейбуса. Для повышения мобильности и экономичности подвижного состава обосновано применение гибридных тяговых приводов, даны рекомендации по выбору и формированию методики расчета основных параметров автономных источников энергии.

Ключевые слова:

троллейбус, характеристика электродвигателя, гибридный привод.

Abstract

The necessity is proved and the criteria of formation of techniques for defining the required characteristic and key parameters of the trolleybus traction electric motor are set. To increase mobility and efficiency of the rolling stock, the application of hybrid traction drives is justified, and recommendations on the choice and formation of methods to calculate the key parameters of autonomous power sources are made.

Key words:

trolley bus, characteristic of electric motor, hybrid drive.

Как известно, тяговая механика как научная дисциплина начала формироваться во второй половине XIX в. Первый курс «Тяговые расчеты» был опубликован в 1903 г. в литографическом издании в Киеве. В этом курсе затрагивались почти все главные вопросы тяговой механики и были заложены основы этой научной дисциплины. В числе первых ученых, разрабатывающих вопросы электрической тяги, были Б. С. Якоби и Ф. А. Пирозский. Большая заслуга в деле разработки основ тяговой механики применительно к городскому электрическому транспорту принадлежит А. В. Вульффу. Он создал первую в

России кафедру по электрической тяге и выпустил в 1909 г. труд «О методике расчета нагревания тяговых электродвигателей», а в 1912 г. – учебник «Электрическая тяга» с изложением основных принципов тяговых расчетов трамваев. Тяговым расчетам посвящен большой раздел в курсе «Электрическая тяга поездов» профессора В. Е. Розенфельда, изданном первоначально в 1949 г. с последующим переизданием [1], а в 1952 г. В. А. Изьюров опубликовал работу по тяговым расчетам городского электрического транспорта [2]. Следует отметить, что большинство из этих работ относились к железнодорожному транспорту.

Первые же работы, отражающие особенности тяговых расчетов городского электрического транспорта, т. е. троллейбусов и трамваев, начали появляться с середины 50-х гг. XX столетия. В то время электрические трансмиссии находят применение не только на подвижном составе городского электрического транспорта, но и на большегрузных самосвалах, строительных самоходных колесных землеройно-транспортных машинах, тракторах. Это новое направление применения электрических трансмиссий нашло отображение в трудах И. С. Ефремова, Б. П. Гущо-Малкина, А. П. Пролыгина, В. М. Труханова, П. П. Исакова, Н. А. Ульянова [3–8] и др., в целом посвященных дальнейшему развитию теории тягового расчета как в автономном режиме движения, так и в режиме получения электрической энергии от контактной сети, а также вопросам согласования выходных характеристик дизель-генераторной установки с тяговым электродвигателем.

При проектировании тягового электропривода первоочередной задачей является установление связи эксплуатационных показателей, тяговой характеристики троллейбуса с параметрами и характеристиками тягового электродвигателя, который будет использоваться для привода ведущих колес. Эти данные служат для обоснова-

ния выбора расчетной мощности тягового электродвигателя, силовой цепи, диапазона регулирования напряжения, магнитного потока и др. величин [3].

Основными эксплуатационными показателями троллейбуса, оказывающими влияние на выбор параметров системы тягового электропривода, являются: полная масса подвижного состава, номинальная и максимальная скорость, показатели динамики разгона, например, время разгона до заданной скорости. Величины перечисленных показателей обычно указываются в техническом задании на проектирование троллейбуса, либо устанавливаются по результатам анализа транспортной работы подвижного состава на городских маршрутах, условий его эксплуатации и технико-экономических расчетов, либо подтверждаются опытом эксплуатации подобных или близких по назначению транспортных средств.

Предельная тяговая характеристика $F_k(v)$, в общем виде представленная на рис. 1 [4], может быть описана выражением

$$F_k = P \cdot \eta_{\Sigma} / v,$$

где F_k и v – сила тяги и скорость движения троллейбуса; P – мощность тягового электродвигателя (ТЭД), отводимая на тягу; η_{Σ} – суммарный КПД тягового привода [4].

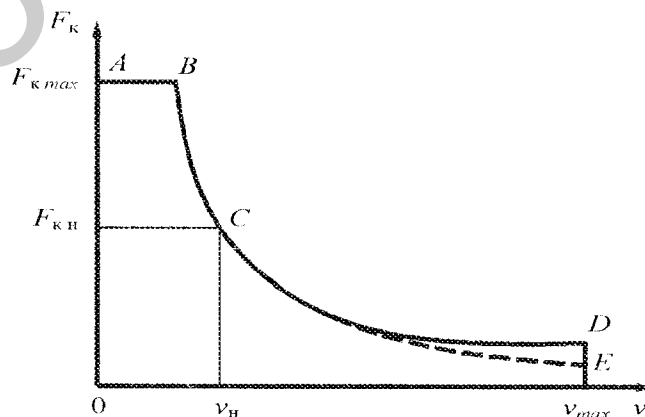


Рис. 1. Предельная тяговая характеристика подвижного состава с электрической трансмиссией

Если учесть, что касательная сила тяги ведущих колес и скорость движения определяются выражениями

$$F_k = M_{дв} \cdot \eta_{тр} / r_d / u_{тр}; v = 2\pi \cdot n_{дв} \cdot u_{тр} \cdot r_d,$$

где $M_{дв}$ – крутящий момент, развиваемый тяговым электродвигателем; $n_{дв}$ – частота вращения вала электродвигателя; r_d – динамический радиус ведущих колес; $u_{тр}$ и $\eta_{тр}$ – передаточное число и механический КПД трансмиссии соответственно, то от предельной тяговой характеристики можно перейти к механической характеристике тягового электродвигателя $M_{дв}(n_{дв})$.

На кривой $F_k(v)$ выделяют следующие основные точки, характеризующие заданные параметры подвижного состава. Точка A (см. рис. 1) соответствует максимальному значению касательной силы тяги $F_{k\max}$, которая в современных моделях подвижного состава соответствует силе тяги по сцеплению $F_{кф}$ ведущих колес с опорной поверхностью. Сила сцепления ведущих колес с опорной поверхностью для современных моделей троллейбусов меньше касательной силы тяги колес, рассчитанной по максимальному моменту $M_{дв\max}$ тягового электродвигателя:

$$F_{k\max} = F_{кф} = \lambda \cdot \varphi \cdot G \leq M_{дв\max} \cdot \eta_{тр} / r_d / u_{тр},$$

где λ – коэффициент нормальной нагрузки на ведущие колеса, $\lambda = G_{сц} / G$; $G_{сц}$ – вес машины, приходящийся на ведущие колеса, G – вес троллейбуса; φ – коэффициент сцепления ведущих колес с опорной поверхностью.

Точка B соответствует началу реализации мощности тягового электродвигателя подвижного состава в рабочем диапазоне скоростей движения. Точка C соответствует скорости v_n при тяговом усилии ведущих колес $F_{кн}$, которое определяется требованиями длительной работы с номинальным динамическим фактором, обуславливающим тяговые свойства подвижного состава

при его движении на наиболее часто встречающемся профиле маршрута. Точка D или E соответствует заданной максимальной скорости движения v_{max} . В итоге кривая $ABCD$ является графическим отображением первого, а кривая $ABCE$ – второго вариантов задания параметров тяговой характеристики, когда при максимальной скорости не используется полная мощность тягового электродвигателя.

Таким образом, зависимость $F_k(v)$ содержит три участка:

- 1) линия AB характеризует постоянство максимальной пусковой силы тяги;
- 2) кривая BCD (BCE) отражается функцией

$$F_k v^\chi = \text{const}, \quad (1)$$

где χ – коэффициент жесткости, значения которого, как правило, не остаются постоянными и зависят от многих факторов: свойств и параметров агрегатов привода, преобразующих и передающих энергию, принятых способов регулирования и управления ТЭД и др. [3];

- 3) точка D (E) ограничивает тяговую характеристику при максимальной скорости движения подвижного состава.

Подвижной состав городского электрического транспорта по условиям эксплуатации часть времени может работать при неполной мощности тягового электродвигателя. Это означает, что наряду с предельными тяговыми характеристиками необходимо иметь частичные, расположенные внутри области $OABCD$ на рис. 1. Семейства таких характеристик представлены на рис. 2 [4], где в различных сочетаниях учитывается возможность получения как максимального тягового усилия, так и максимальной скорости движения при использовании части мощности тягового электродвигателя. Необходимость регулирования тягового усилия в соответствии с характеристиками, представленными на рис. 2, диктуется в первую очередь технологическими циклами работы подвижного состава и усло-

виями его эксплуатации (постоянно меняющаяся нагрузка салона и дорожные условия). Реализация частичных характе-

ристик различного вида обеспечивается соответствующим управлением тяговым электродвигателем.

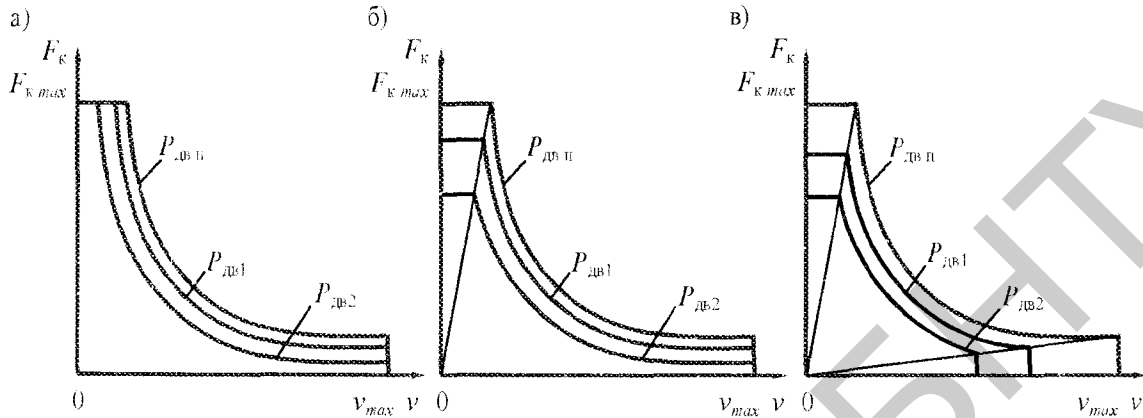


Рис. 2. Семейство тяговых характеристик подвижного состава: $P_{дв.п}$, $P_{дв.1}$, $P_{дв.2}$ — значения мощности двигателя, соответствующие предельной и частичным характеристикам

Анализируя, прежде всего, предельные тяговые характеристики подвижного состава городского электрического транспорта и способы их получения, отраженные в [3, 4], очевиден следующий вывод. Относительно просто определяется координата точки *A* исходя из реализуемой силы тяги, а также максимальная скорость движения троллейбуса. Но далеко неоднозначно определение координат других точек, т. е. точки *B* и точки *D* (*E*). Координаты этих точек в конечном итоге и должны обеспечить требуемую динамику разгона, заданную в технических условиях или других нормативных документах. Решение данной задачи в рамках проектирования тягового электропривода (ТЭП) троллейбуса нередко проводится по схеме энергетическая установка – ТЭД – тяговая характеристика, заимствованной из практики разработки ТЭП тепловозов [3]. То есть по заданной мощности, отводимой на тягу, определяются механическая характеристика ТЭД $M(\omega)$ и тяговая характеристика $F(v)$. Это зачастую требует использование громоздких и трудоемких методов последовательных приближений при расчете характеристик ТЭП и в целом усложняет оптими-

зацию его параметров [3]. Более рациональной является обратная схема проектирования ТЭП, когда на основании статистического материала эксплуатации ТЭП уже на начальной стадии создания троллейбуса получают наиболее оптимальную зависимость $F(v)$ и на ее базе формируют общие требования к ТЭП, затем определяют характеристики ТЭД и системы управления, исходные данные для их расчета и выбора. Очевидно, что такой подход методологически более оправдан и позволяет свести к минимуму количество вариантов расчетов, исключить ряд неопределенностей, затрудняющих обеспечение требуемой тяговой характеристики [3]. Однако и такой вариант обладает очевидным недостатком, а именно получением среднестатистической тяговой характеристики с учетом уже имеющейся (предполагаемой) механической характеристики ТЭД.

Таким образом, ни один из вариантов не дает однозначной взаимосвязи между требуемыми параметрами тяговой динамики конкретной машины и необходимыми для этого характеристиками ТЭД, позволяющей относительно просто определять не только мощность

электродвигателя, но и оптимальный закон управления ТЭД.

Следует отметить, что общий вид такой зависимости известен [9] и представляет собой выражение интегрального вида

$$t_{\text{разг}} = \int_{v_0}^{v_1} \frac{dv}{j} = (1 + \gamma) \int_{v_0}^{v_1} \frac{dv}{f_y},$$

где $t_{\text{разг}}$ – время разгона; j – ускорение; γ – коэффициент инерции вращающихся частей трансмиссии; f_y – удельная ускоряющая сила.

Очевидно, что решение данного уравнения возможно лишь при наличии аналитической зависимости $j(v)$ или $f_y(v)$ и поэтому обычно его решают с помощью приближенных графических и графоаналитических методов [9]. При этом определяют лишь $t_{\text{разг}}$ или пройденный при разгоне путь в зависимости от j или f_y , полученных, как уже отмечалось, на основании статистических данных эксплуатации подобных машин. Следует также учесть, что современные тиристорно-импульсные и транзисторные цифровые системы управления позволяют получать практически любые

тяговые характеристики, удовлетворяющие различным условиям эксплуатации. Эти характеристики ограничены лишь предельно допустимыми режимами, а это ограничения по допустимым значениям напряжения и тока для конкретного ТЭД, а также по условиям сцепления колес конкретного троллейбуса с дорогой. В зоне между этими ограничениями возможны любые характеристики, определяемые системой автоматического регулирования. Однако рекомендации по выбору того или иного варианта этих характеристик, в том числе с учетом работы ТЭД в зоне максимальных значений КПД, представленных на рис. 3 [10], отсутствуют.

В этой связи очевидна необходимость в наиболее эффективной методике, позволяющей не только быстро и точно определить требуемые для конкретной машины параметры ТЭД (мощность, моменты и др.), но и формировать как количественно, так и качественно предельную тяговую характеристику $M(\omega)$ ТЭД, обеспечивающую оптимальные параметры и характеристики троллейбуса в целом.

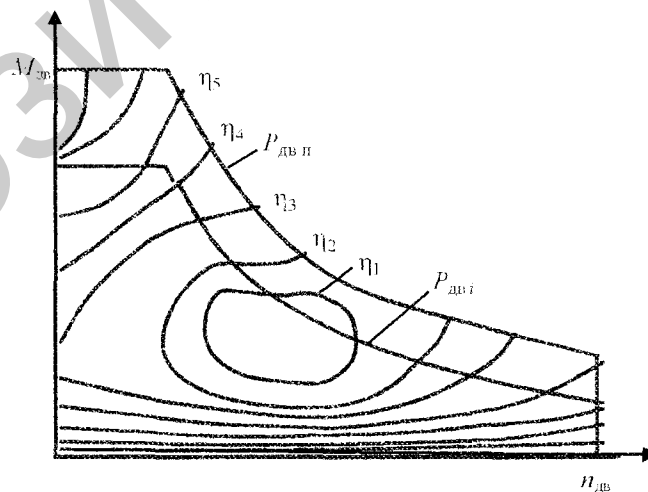


Рис. 3. Тяговые характеристики электродвигателя при постоянных значениях $P_{\text{дв } n}$, $P_{\text{дв } i}$ мощности и постоянных значениях η_i ($\eta_i > \eta_{i+1}$) коэффициента полезного действия

Как известно, основной путь развития современного автомобилестроения – повышение экономичности и экологической чистоты транспортных средств. И одним из технических решений данной проблемы является разработка и применение гибридных силовых приводов, активно используемых в последнее время на автомобилях и представляющих собой различные сочетания контактной сети, двигателя внутреннего сгорания (ДВС), дизель-генераторной установки, накопителей энергии, электродвигателя (электродвигателей). При этом целесообразность того или иного автономного источника питания следует оценивать по обобщенному критерию, характеризующему экономическую эффективность троллейбуса, которая, в свою очередь, должна определяться:

– прямыми затратами на производство и эксплуатацию как подвижного состава, так и контактной сети, отнесенными к количеству перевозимых пассажиров на единицу пути;

– косвенными затратами социального характера.

Оптимизация данного показателя и выбор автономного источника и его параметров возможны лишь для конкретной модели троллейбуса и конкретных условий эксплуатации (определенный маршрут с конкретным пассажиро-

поток, наличием на нем участков без контактной сети). В этой связи найти высоко универсальный вариант гибридного привода для троллейбуса невозможно. Поэтому целесообразно систематизировать рекомендации по выбору энергетических установок и расчету их параметров.

Анализ работ [3, 10, 11] в данном направлении показал, что наиболее приемлемыми вариантами автономных энергетических установок (АЭУ) в составе гибридного привода для троллейбусов с точки зрения технического решения и экономического эффекта являются: тяговые аккумуляторные батареи (ТАБ), дизель-генераторная установка или установка с конденсаторными накопителями энергии. Общими для всех АЭУ предпосылками к использованию могут стать: повышение мобильности троллейбуса в случаях объезда дорожных заторов и (или) технологических переездов в парках; обеспечение маршрутного сообщения, имеющего участки без контактной сети.

В целом, выделяют два основных типа гибридных силовых приводов: последовательный и параллельный. Применительно к троллейбусу целесообразны варианты только последовательного типа, которые представлены в табл. 1.

Табл. 1. Структурные схемы гибридных тяговых приводов троллейбусов

Вариант гибридного тягового привода	Источник питания				Генератор	Преобразователь	Тяговый электродвигатель (двигатели) мостов или колес
	Контактная сеть	Дизельный двигатель	Конденсаторный накопитель	ТАБ			
Электрический	○		○			○	Мотор-генератор
	○			○		○	
Дизель-электрический	○	○			○	○	

Использовать параллельную схему, предполагающую наличие двух независимых контуров, на троллейбусе не эффективно, т. к. для цепочки ДВС – коробка переключения передач (КПП) – ведущий мост необходима не только КПП, но и сцепление, а применение второго тягового электродвигателя, питающегося только от АЭУ, также приведет к неоправданному удорожанию машины. В свою очередь привод последовательного типа позволяет:

- эксплуатировать ДВС в составе дизель-генераторной установки на номинальных (экономичных) режимах работы;

- применять конденсаторные установки в качестве буферного накопителя, обеспечивающего экономию электроэнергии до 22 % [12] за счет ее рекуперации при торможении.

Основным требованием, предъявляемым к любой энергетической установке, в том числе используемой в качестве вспомогательного источника энергии, является обеспечение электрических параметров тягового электродвигателя, необходимых для реализации механической $M_{дв}(\omega)$, а следовательно, и тяговой $F(v)$ характеристик [3]. При этом для выбора и расчета ТАБ в качестве вспомогательной энергетической установки потребуется частичная характеристика, вид которой представлен на рис. 2, в. для расчета дизель-генераторной установки – любой из вариантов частичных характеристик, приведенных на рис. 2. Значение коэффициента жесткости χ при этом в уравнении (1) для дизель-генераторной установки определяется низкой перегрузочной способностью дизеля (незначительное увеличение нагрузки приводит к существенному снижению частоты вращения). Это, в свою очередь, предопределяет основное условие ее эффективной работоспособности – поддержание на предельной характеристике постоянной мощности. В случае применения аккумуляторных установок основ-

ное влияние на коэффициент χ имеют не мощностные, а энергетические соотношения. При этом для этих установок характерна известная особенность – снижение отдаваемой мощности в процессе работы и нелинейная зависимость выходных параметров от режимов нагрузки тягового электродвигателя.

Научно-техническое описание различных АЭУ, применяемых в мобильной технике, присутствует в работах, посвященных теории и расчету тяговых приводов электромобилей [3, 10, 13, 14]. В них достаточно подробно приводится классификация коммерческих и перспективных энергетических установок (ТАБ, суперконденсаторов, водородных установок и др.), описываются особенности каждого из вариантов, приводятся примеры расчета некоторых из них применительно, в основном, к легковым, карьерным и др. электромобилям. Анализ приведенных работ подчеркнул необходимость в рекомендациях по применению АЭУ именно на троллейбусах как вспомогательных источников энергии, т. е. для троллейбусов АЭУ необходима для преодоления непродолжительных участков пути и зачастую с небольшой скоростью движения. В этой связи при выборе того или иного источника в первую очередь актуальна задача по определению его оптимальной мощности и (или) запаса энергии в допустимых пределах по отношению к собственной массе для троллейбуса конкретной модели. Предлагаемые расчеты АЭУ как основных источников энергии [3, 10, 13, 14] для электромобилей увязаны с динамическим режимом движения, характерным для любого автомобиля. При расчетах параметров дизель-генераторных или аккумуляторных установок, применяемых на троллейбусах, их режим движения необходимо рассматривать как близкий к статическому. Удельные характеристики конденсаторных установок (рис. 4), напротив, показывают возможность интенсивного разгона трол-

лейбусов. Однако в силу недавнего их применения нет сложившихся методик

по выбору и расчету параметров таких установок.

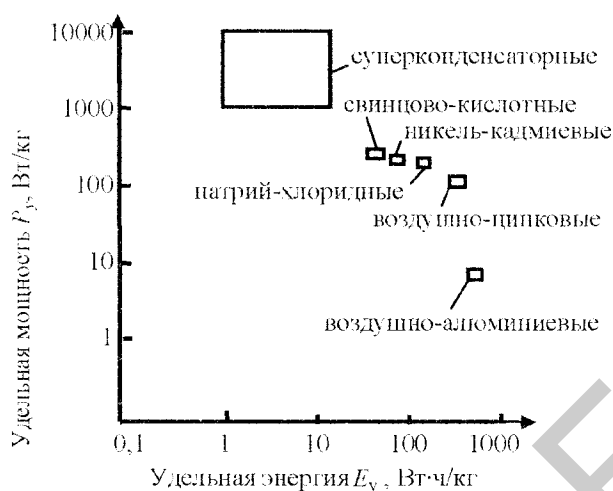


Рис. 4. Удельные параметры АЭУ

Как было отмечено, при выборе устройств аккумулярования, так же, как и при выборе тяговых электродвигателей, необходимо определить потребляемые мощности и оценить связанные с их применением затраты. При этом могут использоваться те же методы расчетов потребляемой энергии:

- по кривым токов $I(t)$, получаемых в результате тяговых расчетов;
- аналитический, основанный на оценке составляющих энергобаланса;
- эмпирический, основанный на анализе опытных данных, полученных в базовых условиях.

Все упомянутые методы не учитывают случайные факторы (интервалы между троллейбусами, помехи попутного транспорта, наполняемость салона, состояние дорог, метеорологические факторы и др.), а детерминированные факторы (ускорение, уклоны, сопротивление движению и др.) учитываются усредненными величинами. Расчеты по этим методам можно принимать как ориентировочные с погрешностями до 30 %, а в качестве метода с большей степенью точности следует применять тяговый расчет, т. к. в нем учет основ-

ных факторов осуществляется в более строгой математической модели. Наиболее же точно определить энергопотребление возможно только на основе статистических вероятностных методов, для чего необходим ряд экспериментальных исследований.

Следует также учесть, что вопрос применения накопительных элементов, т. е. определение их массогабаритных показателей и экономической эффективности, следует рассматривать не только в режиме автономного хода, но и в режиме буферного накопления энергии. Под буферным накопителем понимается устройство, обеспечивающее высокоэффективную рекуперацию и аккумулярование энергии при торможении. Если для выбора ТАБ, наиболее подходящих для статических режимов длительного накопления и расходов энергии, очевидно определяющим является режим автономного хода, то для конденсаторных накопительных установок, выполненных на базе так называемых суперконденсаторов (СК), предпочтителен режим буферного накопления энергии. Это объясняется основной особенностью СК – оперативное ис-

пользование высвобождаемой при торможении энергии. При такой постановке задачи возможно получить относительно компактное, с малой массой накопительное устройство, обеспечивающее прежде всего буферные функции и лишь по возможности функции автономности хода. Параметры такого накопителя должны рассчитываться исходя из возможности аккумулирования энергии, высвобождаемой за один цикл торможения. Эксплуатация троллейбуса в таком режиме позволит с максимальной эффективностью использовать накопитель с изначально относительно низкой стоимостью.

О большом потенциале в использовании рекуперации и аккумулирования энергии при торможении свидетельствует соотношение математического ожидания энергии, генерируемой в режиме торможения (25 Вт·ч/(т·км)), и математического ожидания энергии, расходуемой в режиме тяги (80 Вт·ч/(т·км)), равное 32 % – в летний период и 19 % – в зимний [12]. Реализовать данный потенциал возможно именно с помощью СК, имеющих высокие значения удельной мощности (до $10^4 \dots 10^5$ Вт/кг) и удельной энергии (до 50 кДж/кг), большее число циклов заряда-разряда (до 10^6) и малое время заряда (до 30 с).

При проектировании СК необходимо определить объем запасаемой энергии для каждого цикла и диапазона рабочих напряжений. При этом следует учесть, что рост напряжения приводит к экспоненциальному снижению емкости, а изменение частоты – к изменению внутреннего сопротивления конденсатора.

Расчет запасаемой накопителем энергии может осуществляться на основании известной зависимости общего вида

$$E_n = \frac{M \cdot v_{г.н}^2}{2} \cdot \eta(v), \quad (2)$$

где M – эксплуатационная масса троллейбуса; $v_{г.н}$ – начальная скорость торможения; $\eta(v)$ – коэффициент элек-

тромеханических потерь, зависящий от текущей скорости v движения троллейбуса.

Емкость накопителя может быть определена по формуле

$$C = \frac{E_n}{k \cdot U_n^2}, \quad (3)$$

где k – коэффициент, обусловленный физическими свойствами СК; U_n – номинальное напряжение накопителя.

Однако из зависимостей (2) и (3) следует, что основной задачей для расчета запаса энергии и емкости накопительного устройства является оптимизация используемых значений эксплуатационной массы, начальной скорости торможения, а также определение зависимости суммарного коэффициента электромеханических потерь от текущей скорости торможения.

Для дальнейшего определения удельной энергии E_y и удельной мощности P_y конденсаторной установки можно использовать следующие зависимости:

$$E_y = \frac{CU_n^2}{2 \cdot m}; \quad P_y = \frac{U_n^2}{4m \cdot R},$$

где m – масса установки; R – эквивалентное внутреннее сопротивление конденсатора [12].

Кроме того, при разработке системы управления тяговым и тормозным приводами, использующими буферный накопитель, необходимо удовлетворить следующие требования:

– накопитель заряжается в режиме торможения, при этом соблюдается следящее действие между тормозной силой на колесах и силой нажатия на педаль тормоза;

– при рекуперации энергии торможения тяговая сила на колесах должна изменяться пропорционально перемещению педали хода;

– для обеспечения выше указанных требований система автоматически

должна согласовывать усилия на колесных тормозных механизмах и создаваемые двигателем в генераторном режиме при зарядке накопителя, а также согласовывать потребление электроэнергии из сети и из накопителя.

Заключение

Таким образом, очевидна необходимость в методике определения требуемой характеристики и основных параметров тягового электродвигателя, которые позволили бы в конечном итоге, используя цифровые транзисторные системы управления, повысить экономичность троллейбуса в целом, при этом обеспечить требуемые параметры его тяговой динамики. Для этого данная методика должна предусматривать определение оптимальной тяговой зависимости $F(v)$, а соответственно и характеристики двигателя $M(\omega)$, не только на основании статистического материала эксплуатации троллейбусов, но и

на основании однозначной взаимосвязи этих характеристик с нормативными параметрами тяговой динамики конкретной машины. В свою очередь, отмеченная взаимосвязь должна быть представлена математической моделью динамики разгона троллейбуса.

Для повышения мобильности троллейбусов в случае преодоления участков маршрута без контактной сети и также для повышения экономичности подвижного состава целесообразно применение гибридных тяговых приводов, требующее, в свою очередь, рекомендации по выбору методики определения и расчета параметров автономных источников энергии. При этом для троллейбусов предпочтительными должны являться последовательные схемы гибридного привода электрического или дизель-электрического типа, использующие в качестве АЭУ дизель-генераторную установку, ТАБ или конденсаторную установку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теория электрической тяги / В. Е. Розенфельд [и др.] ; под ред. И. П. Исаева. – М. : Транспорт, 1995. – 294 с.
2. **Изыоров, В. А.** Тяговые расчеты городского электротранспорта: моторные вагоны, троллейбусы и электромобили / В. А. Изыоров. – М. : М-во ком. хоз-ва РСФСР, 1952. – 232 с.
3. Теория и расчет тягового привода электромобилей / И. С. Ефремов [и др.] ; под ред. И. С. Ефремова. – М. : Высш. шк., 1984. – 383 с.
4. Электрические трансмиссии пневмоколесных транспортных средств / И. С. Ефремов [и др.]. – М. : Энергия, 1976. – 256 с.
5. **Ефремов, И. С.** Теория и расчет троллейбусов. Электрооборудование : учеб. пособие для вузов в 2 ч. / И. С. Ефремов, Г. В. Косарев. – М. : Высш. шк., 1981.
6. Трансмиссии гусеничных и колесных машин / В. М. Труханов [и др.] ; под ред. В. М. Труханова. – М. : Машиностроение, 2001. – 736 с.
7. **Исаков, П. П.** Электромеханические трансмиссии гусеничных тракторов. Теория и расчет / П. П. Исаков, П. П. Иванченко, А. Д. Егоров. – Л. : Машиностроение, 1981. – 302 с.
8. **Ульянов, Н. А.** Самоходные колесные землеройно-транспортные машины / Н. А. Ульянов, Э. Г. Роинсон, В. Г. Соловьев ; под ред. Н. А. Ульянова. – М. : Машиностроение, 1976. – 359 с.
9. **Байрыева, Л. С.** Электрическая тяга : городской наземный транспорт : учебник для техникумов / Л. С. Байрыева, В. В. Шевченко. – М. : Транспорт, 1986. – 206 с.
10. **Larminie, J.** Electric Vehicle Technology Explained / J. Larminie, J. Lowry. – West Sussex : John Wiley & Sons Ltd, 2003. – 296 p.
11. Накопители энергии : учеб. пособие для вузов / Д. А. Бут [и др.] ; под ред. Д. А. Бута. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 400 с.
12. **Штанг, А. А.** Повышение эффективности электротранспортных систем на основе использования накопителей энергии : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / А. А. Штанг. – Новосибирск, 2006. – 233 с.