

На правах рукописи



Ярославцев Михаил Викторович

**ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ ТЯГОВЫЙ ПРИВОД
ГОРОДСКОГО БЕЗРЕЛЬСОВОГО ТРАНСПОРТА**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент
Аносов Владимир Николаевич

Официальные оппоненты:

Пантелеев Василий Иванович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский Федеральный Университет», директор Политехнического института Сибирского федерального университета, заведующий кафедрой «Электротехнические комплексы и системы»

Лысенко Олег Александрович, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет», доцент кафедры «Электрическая техника»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва

Защита диссертации состоится 01 декабря 2016 г. в 10⁰⁰ час. на заседании диссертационного совета Д 212.173.04 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» и на сайте <http://www.nstu.ru>

Автореферат разослан «___» октября 2016 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
д-р техн. наук, профессор



Нейман Владимир Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Вследствие усиления экологических требований к используемым транспортным средствам, повышения стоимости энерго-ресурсов, а также развития новых источников энергии приобретает актуальность вопрос о первоочередных направлениях развития подвижного состава городского безрельсового транспорта. Среди применяемых на нем источников энергии наибольшее распространение получили накопители энергии на основе литий-ионных батарей и конденсаторов двойного электрического слоя.

К настоящему времени изготовлен ряд конструкций транспортных средств (ТС), использующих новые источники энергии в различных сочетаниях с тепловыми двигателями и контактной сетью. Как правило, кузова различных транспортных средств остаются близки по конструкции и габаритам, и отличаются типом и сочетанием используемых источников энергии. Перспективные транспортные энергетические установки должны иметь ресурс работы, близкий к сроку службы кузова транспортного средства, иметь малый вес и стоимость, а также гибкость схем энергоустановок, позволяющую как применять их на подвижном составе различной вместимости, так и модернизировать энергоустановки по мере совершенствования источников энергии.

В разработку методов преобразования энергии и снижения энергопотребления на электрифицированном транспорте внесли вклад ряд отечественных и зарубежных ученых. Задачи теории тяговых расчетов, выбора оптимальных характеристик электрического оборудования, проектирования автономных электротранспортных средств и ТС с комбинированной энергоустановкой, разработку энергоэффективных тяговых приводов и совершенствование методов снижения энергопотребления на движение поезда разрабатывались В. Е. Розенфельдом, М. П. Кутыловским, И. С. Ефремовым, Г. В. Косаревым, К. Г. Марквардтом, В. П. Феоктистовым, В. В. Шевченко, А. Ruffer и др.

Другим направлением, исследующим применение накопителей энергии в транспортном комплексе, является область автономного электрического и гибридного транспорта. Значительный вклад в области выравнивания нагрузок первичных источников с помощью накопителей энергии, разработки методов проектирования таких накопителей, а также наилучших схемных и конструктивных решений и алгоритмов управления комбинированными энергоустановками внесли российские и зарубежные учёные К. Л. Богданов, И. Н. Варакин, М. Zolot, К. J. Kelly, Т. Markel, А. Burke, К. Gokce, Р. Bubna, S. Kermani, Zilin Ma, М. А. Слепцов и др.

В Новосибирском государственном техническом университете Н. И. Щуровым и В. И. Соповым опубликован ряд работ по вопросам энергосбережения и энергоэффективности на городском электротранспорте. В работах А. А. Штанга и Е. А. Спиридонова рассмотрены вопросы применения накопительных устройств на транспорте. В работах В. М. Кавешникова и В. Н. Аносова исследован тяговый электропривод автономных ТС с комбинированной энергоустановкой.

В работах по проектированию накопителей величину необходимого запаса

энергии оценивают либо для цикла движения по стандартному перегону, либо для стандартных циклов, используемых при исследовании топливной экономичности автомобилей. Однако в условиях крупных городов движение общественного транспорта затруднено и характеризуется как большим числом остановок на перегоне, так и необходимостью уменьшения скорости движения без полной остановки. При выборе характеристик как накопителя энергии, так и в целом тягового привода безрельсового подвижного состава возникает необходимость учитывать реальные циклы движения транспорта.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является повышение энергетической эффективности тягового привода городского безрельсового транспорта за счет рационального выбора основных элементов комбинированной энергоустановки.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Анализ источников энергии и возможных схем энергетических установок подвижного состава городского безрельсового транспорта для выбора наиболее рационального типа комбинированной энергетической установки.

2. Разработка методики расчета мощности первичного источника энергии (ПИЭ) и энергоемкости буферного накопителя для обеспечения заданных динамических характеристик транспортного средства.

3. Статистический анализ режимов движения транспортного средства в реальных условиях эксплуатации для уточнения требований, предъявляемых к его динамическим характеристикам.

4. Обоснование использования накопителя энергии в составе комбинированной энергоустановки и расчет его основных параметров на основании анализа статистического материала.

5. Определение основных параметров энергетической установки для городского безрельсового транспорта, позволяющей повысить энергетическую эффективность тягового привода.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является подвижной состав городского пассажирского безрельсового транспорта. Транспортные средства рассматриваются как системы с установками, преобразующими химическую либо электрическую энергию в кинетическую энергию транспортного средства.

Предметом исследования являются состав энергетических установок транспортных средств и основные характеристики их отдельных элементов, такие, как мощность и энергоемкость накопителей энергии, мощность первичных источников энергии и тягового привода.

Научная новизна полученных результатов.

1. Предложена методика совместного выбора мощности первичного источника и энергоемкости буферного накопителя энергии (БНЭ) в составе комбинированной энергетической установки транспортного средства на основании цикла его движения, обеспечивающая реализацию заданных динамических характеристик.

2. Получена возможность сокращения массогабаритных показателей и стоимости основных элементов расчетной энергетической установки за счет

применения в качестве исходных данных экспериментальных записей реальных циклов движения транспортного средства.

3. Реализованы математические модели, позволяющие определить запас энергии буферного накопителя при движении транспортного средства в заданном цикле с учетом потерь в накопительных и преобразовательных устройствах, а также сопротивления движению.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности сокращения габаритов, веса и стоимости основных элементов энергетической установки транспортного средства. Отказ от совмещения аккумуляторов и конденсаторов в составе комбинированной энергетической установки с тепловым двигателем позволяет упростить конструкцию ТС и повысить его надежность. Применение последовательной схемы энергоустановки допускает модернизацию транспортных средств с комбинированной энергетической установкой путем замены дизель-генератора на аккумуляторы повышенной емкости либо топливные элементы с сохранением мощности первичного источника энергии.

Методы исследования. Для решения поставленных задач в работе использованы методы теории вероятностей и математической статистики, теории электрических цепей и теории тяги.

Определение циклов движения транспортного средства выполнено с применением специально изготовленного микропроцессорного регистратора, осуществлявшего сбор данных в реальных условиях работы на маршруте.

Для установления энергетических показателей транспортных средств использованы методы тяговых расчетов. Они были применены при разработке расчетных программ и моделей в средах VBA, Delphi, MathCAD, MATLAB Simulink.

Достоверность полученных результатов обеспечивается параллельным использованием различных моделей, корректным применением методов обоснования полученных результатов, результатами экспериментальных измерений.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Обоснование схемы комбинированной энергетической установки для городского безрельсового транспорта.

2. Методика совместного выбора энергоемкости буферного накопителя и мощности первичного источника энергии на основании цикла движения транспортного средства.

3. Результаты анализа статистического материала, полученного при экспериментальном исследовании циклов движения транспортного средства в реальных условиях эксплуатации.

4. Результаты выбора основных элементов комбинированной энергоустановки безрельсового транспортного средства.

Реализация результатов работы. Созданные в ходе работы над диссертацией имитационные математические модели используются в учебном процессе в дисциплинах «Автоматизированный тяговый электропривод» и «Транспортные средства с накопителями энергии» при подготовке магистрантов по направлению 13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника в Новосибирском

государственном техническом университете.

Апробация результатов диссертации. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технология. Инновации» (г. Новосибирск, 2012, 2013, 2015 гг.); Международной научно-технической конференции «Студент и научно–технический прогресс» (г. Новосибирск, 2013, 2014, 2016 гг.); Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии и экономика в машиностроении» (г. Юрга, 2014 г.); Международной научной конференции молодых ученых «Электротехника. Энергетика. Машиностроение» (Новосибирск, 2014 г.); Международной научной конференции молодых учёных «Электротехника. Электротехнология. Энергетика» (Новосибирск, 2015 г.); 11-м Международном форуме по стратегическим технологиям (IFOST, Новосибирск, 2016); ежегодных научных сессиях факультета мехатроники и автоматизации НГТУ (2015, 2016 г.), а также научных семинарах кафедры «Электротехнические комплексы» НГТУ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ, в том числе 5 статей, вошедших в перечень учитываемых ВАК ведущих рецензируемых научных журналов и изданий и 8 докладов на международных конференциях.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованных источников из 112 наименований и приложений. Общий объём диссертации 157 страниц, включая 70 рисунков и 9 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражены научные проблемы, актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, описаны методы исследований. Приведены основные положения, выносимые на защиту, изложены сведения о научной новизне и практической значимости, реализации и апробации работы.

В первой главе выполнен анализ основных типов накопителей энергии, применяемых на транспорте, в первую очередь литий-ионных аккумуляторов и конденсаторов двойного электрического слоя. Основными характеристиками источников электрической энергии являются удельная мощность и удельная энергоёмкость, удельная стоимость, а для накопителей также и допустимое число циклов заряда-разряда.

Литий-ионные аккумуляторные батареи (ЛИА) имеют наиболее высокую удельную энергоёмкость среди статических источников электрической энергии: 0,4 МДж/кг при удельной мощности промышленных образцов 0,2 кВт/кг, с перспективой увеличения её до 2 – 4 кВт/кг (достигнутой для опытных образцов). Таким образом, использование аккумуляторов в качестве буферных накопителей энергии может приводить к завышению их энергоёмкости сверх необходимого значения. Другим существенным недостатком ЛИА является срок службы, ограниченный 5 – 10 тысячами циклов заряда-разряда, что приводит к необходимости замены дорогостоящих батарей в течение срока службы ТС.

Конденсаторы двойного электрического слоя (КДЭС), наоборот, обладают

высокой удельной мощностью до 10 кВт/кг и допускают более 10^6 циклов заряда-разряда, имея малую удельную энергоемкость – около 0,05 МДж/кг.

Питание от контактной сети позволяет передать транспортному средству практически любую необходимую мощность. Однако передача энергии связана со значительными потерями энергии, а также ограничивает автономность ТС.

Установлено, что наиболее перспективным для внедрения новых технических решений видом городского транспорта является наземный безрельсовый транспорт, как наиболее распространенный и обладающий наибольшим удельным расходом энергии, высокой маневренностью, требующей перехода от централизованных к частично или полностью автономным источникам энергии, а также режимом движения, связанным с частыми пусками и торможениями. Показано, что одним из основных путей повышения энергетической эффективности городского безрельсового транспорта является применение буферных накопителей энергии, способных принять энергию торможения.

В результате выполненного обзора установлено, что среди транспортных средств с накопителями энергии наиболее перспективными являются ТС с комбинированными (гибридными) энергетическими установками, в первую очередь, сочетающие тепловой двигатель с конденсаторным накопителем энергии. Комбинированной энергетической установкой (КЭУ) называют установку, сочетающую несколько источников энергии. В современной зарубежной литературе для обозначения ТС с КЭУ широкое применение находит термин *hybrid electric vehicle* (HEV – гибридное транспортное средство, ГТС). Рассмотрены основные вопросы создания КЭУ: возможные схемы преобразования энергии, стратегии управления мощностью источников энергии.

Во второй главе рассматриваются вопросы выбора основных характеристик комбинированного тягового привода. Показано, что в условиях городского транспорта целесообразно применение последовательной схемы КЭУ. Схема распределения потоков мощностей в приводе с последовательной схемой показана на рисунке 1.

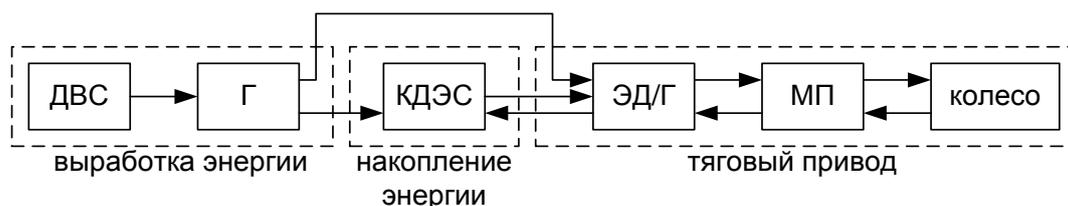


Рисунок 1 – Схема распределения потоков мощностей в последовательной комбинированной энергетической установке

В главе сформулированы требования к мощности тягового двигателя и первичного источника энергии (как правило, ДВС). Мощность, поставляемая ПИЭ для обеспечения перемещения транспортного средства, необходима для покрытия затрат на преодоление сопротивления движению транспортного средства и для возмещения потерь в буферном накопителе, обеспечивающем изменение кинетической энергии ТС. Для выбора мощности ДВС необходимо рассмотреть случаи, в которых максимизируется каждая из составляющих: поддержание движения с установившейся максимальной скоростью (требуемая

мощность P_1) и движение в цикле разгона – торможения без уменьшения энергии конденсаторного НЭ, при котором энергия, отдаваемая им за цикл, максимальна (требуемая мощность P_2).

$$P_{\text{ДВС}} = \frac{1}{\eta_{\Gamma}\eta_{\text{НЭ}}} \left(P_{\text{СН}} + m_{\text{ТС}} \frac{(\max(P'_1, P'_2))}{\eta_{\text{Эд}}\eta_{\text{МП}}} \right), \text{ кВт},$$

где $m_{\text{ТС}}$ – масса ТС, т; P'_1, P'_2 – удельная мощность на перемещение ТС, найденная из первого и второго ограничений, кВт/т; $P_{\text{СН}}$ – мощность собственных нужд, кВт; $\eta_{\Gamma}, \eta_{\text{НЭ}}, \eta_{\text{Эд}}, \eta_{\text{МП}}$ – КПД генератора, накопителя энергии, тягового двигателя, механической передачи соответственно. Для определения величины потерь в КЭУ с БНЭ, состоящим из КДЭС, выполнено моделирование потребления энергии ТС в среде MATLAB Simulink при реализации стандартного цикла движения по перегону.

Результаты моделирования показали, что при различных циклах движения в характерных для городского транспорта условиях (при высокой частоте остановок как для посадки пассажиров, так и по условиям дорожного движения) применение конденсаторного накопителя в составе КЭУ позволяет достичь сокращения расхода энергии первичного источника до 30% – 40% за счет повторного использования энергии торможения.

При совместной работе источников энергии в составе КЭУ существует опасность снижения запаса энергии БНЭ ниже минимально допустимого в момент, требующий передачи тяговому приводу дополнительной энергии. Такая ситуация означает, что ГТС оказывается неспособным реализовать заданные динамические характеристики.

Во второй главе показано, что наиболее интенсивно энергия будет потребляться при движении в цикле, не содержащем выбега и остановок. Такой режим определяется минимальной (далее V_1) и максимальной (V_2) скоростями движения ТС. На рисунке 2 показаны изменения скорости ТС и мощности, развиваемой тяговым электродвигателем ТС при движении в таком цикле. Средняя мощность, потребляемая тяговым приводом при движении в таком цикле обозначена как $P_{\text{Ц}}(V_1, V_2)$. Она определяется отношением разности затраченной на разгон и возвращенной в БНЭ при торможении энергий к длительности цикла:

$$P_{\text{Ц}} = \frac{E_{\text{Р}} - E_{\text{Т}}}{t_{\text{Р}} + t_{\text{Т}}} = \frac{1}{\eta_{\text{Р}}} \left(\frac{\int_{t_{\text{Р}}} F(t)V(t)dt - \eta_{\text{Т}} \int_{t_{\text{Т}}} F(t)V(t)dt}{t_{\text{Р}} + t_{\text{Т}}} \right), \text{ кВт},$$

где $E_{\text{Р}}$ – энергия, расходуемая приводом на разгон ТС в выбранном цикле движения, кДж; $E_{\text{Т}}$ – энергия, вырабатываемая приводом в режиме торможения, кДж; $t_{\text{Р}}$ – длительность периода разгона, с; $t_{\text{Т}}$ – длительность периода торможения, с; $\eta_{\text{Р}}$ – КПД преобразования энергии при разгоне, $\eta_{\text{Т}}$ – КПД преобразования энергии при регенеративном торможении.

Для случая движения ТС со скоростью V , соответствующей режиму движения с постоянной мощностью тягового привода $P_{\text{ТП}}$, вычислена предельная величина $P_{\text{Ц}}$ при малом изменении скорости за цикл dV и соответствующих ему

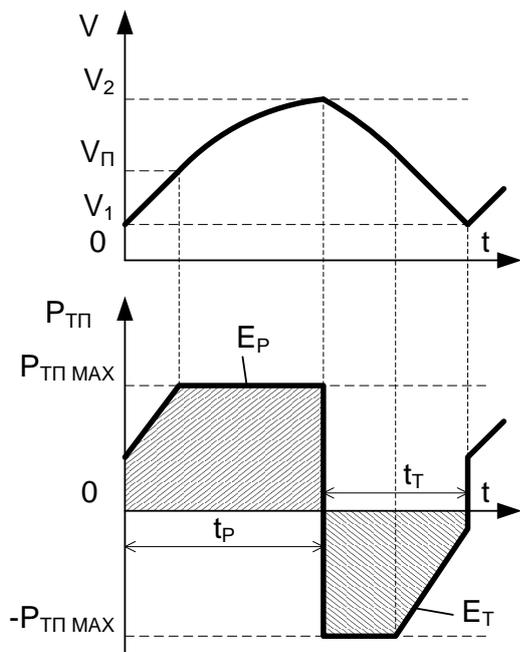


Рисунок 2 – Зависимости скорости транспортного средства и мощности тягового привода от времени для цикла разгона-торможения

малых изменениях времени dt_P и dt_T :

$$P_{Ц} = \frac{V}{2\eta_P} \left(\frac{P_{ТП}}{V} (1 - \eta_T) + W(V)(1 + \eta_T) \right), \text{ кВт},$$

где $W(V)$ – сила сопротивления движению ТС при скорости V , Н.

Предложено совместно определять энергоёмкость буферного накопителя энергии и мощность первичного источника энергии в составе комбинированной энергетической установки. Разработана методика расчета энергоёмкости БНЭ по заданной мощности ПИЭ, позволяющая получить зависимость $E_{БНЭ}(P_{ПИЭ})$ для заданного цикла движения ТС.

Необходимая энергоёмкость БНЭ определяется на основании зависимости $E_{БНЭ}(t)$ как разность её наибольшего и наименьшего значений с учетом запаса на прием энергии торможения E_P . Для нахождения зависимости $E_{БНЭ}(t)$ была использована следующая последователь-

ность расчета:

1. По значениям мгновенной скорости $V(t)$ были рассчитаны удельное сопротивление движению ТС w и его ускорение a .

2. На основании полученных величин определены значения сил тяги и торможения, развиваемых тяговым приводом в каждый момент времени t_i :

$$F_i = (1 + \gamma)ma_i + 0,001mgw_i, \text{ кН},$$

где γ – коэффициент, учитывающий инерцию вращающихся частей, g – ускорение свободного падения, m/c^2 , m – масса троллейбуса, т.

3. Определена мощность, потребляемая либо возвращаемая тяговым приводом в режимах тяги и торможения по одному из выражений:

$$P_i = \begin{cases} \frac{F_i v_i}{\eta_m} \\ F_i v_i \eta_p \end{cases}, \text{ кВт},$$

где η_m – КПД тягового привода в режиме тяги, η_p – КПД тягового привода в режиме рекуперации.

4. Определен запас полезной энергии БНЭ:

$$E_{БНЭ i} = \begin{cases} E_{БНЭ i-1} + P_{\Gamma} \Delta t + P_i \Delta t, & \text{если } E_{БНЭ \max} - E_P > E_{БНЭ i} \\ E_{БНЭ i-1} + P_i \Delta t, & \text{если } E_{БНЭ \max} - E_P > E_{БНЭ i} > E_{БНЭ \max} \\ E_{БНЭ \max}, & \text{если } E_{БНЭ i} > E_{БНЭ \max} \end{cases}, \text{ кДж},$$

где P_{Γ} – мощность ПИЭ, кВт; $E_{БНЭ \max}$ – максимальная полезная энергия БНЭ, кДж; E_P – запас энергии БНЭ для приема энергии рекуперации, кДж; Δt – шаг

времени расчета, с.

При расчете принята следующая логика работы привода. В случае малой величины полезной энергии БНЭ осуществляется его заряд генератором до величины $E_{\text{БНЭmax}} - E_p$. Дальнейшее увеличение запаса энергии БНЭ возможно только за счет энергии рекуперативного торможения, что обеспечивает её более полное использование. Величина запаса энергии E_p выбрана на основании статистического анализа энергии, вырабатываемой при торможениях.

Рассмотрена проблема выбора зависимостей скорости движения в качестве исходных данных для расчета. Показано, что использование для определения характеристик КЭУ стандартных циклов, применяемых для исследования топливной экономичности транспортных средств, недопустимо, так как при определении энергоёмкости накопителя особенно важно количество следующих друг за другом подряд циклов с высокой средней мощностью. Моделированием подтверждено, что в таких случаях расход энергии БНЭ является наибольшим.

Кроме того, представляет сложность выбор цикла, отвечающего реальным условиям движения. Использование требований ГОСТ 20306-90 невозможно, так как построение цикла связано с конструктивными особенностями испытуемого автобуса, что принципиально не позволяет получить универсальную зависимость скорости движения ТС от времени. Таким образом, необходимо экспериментальное исследование циклов движения ТС.

В третьей главе описано экспериментальное исследование режимов движения транспортного средства. Исследование позволяет решить ряд задач: описать циклы движения ТС и получить зависимость мощности, потребляемой тяговым электроприводом, от времени; определить характерные параметры процессов разгона и торможения, описываемые ускорением, величиной тока и потребляемой либо генерируемой мощностью и энергией; выявить баланс энергопотребления подвижного состава, установив расход энергии на тягу и на собственные нужды; выбрать параметры и подтвердить достоверность моделей, используемых для расчета энергопотребления ТС.

Для уточнения фактического расхода энергии подвижным составом городского транспорта и разделения потребления энергии на тягу и собственные нужды был разработан и изготовлен специализированный бортовой регистратор, фиксирующий напряжение контактной сети на токоприемнике, ток тягового преобразователя и суммарный ток прочих потребителей в зависимости от времени с периодом 0,5 с. Прибор был установлен на троллейбусе СТ-6217, оборудованном импульсным тяговым приводом постоянного тока и распределенной системой управления (PCY). При PCY сигналы датчиков передаются в цифровом виде по CAN-шине. Схема подключения регистратора и его внешний вид показаны на рисунке 3 и рисунке 4.

Всего с использованием регистратора выполнено три серии регистрации режимов движения. В каждой из них работа троллейбуса фиксировалась на протяжении одной недели. Наблюдения выполнены в феврале, марте и июне, что позволило сравнить режимы движения и потребление энергии троллейбусом в широком диапазоне температур. Всего исследовано 210 рейсов троллейбуса, в которых зафиксировано около 2 млн. мгновенных значений скорости

движения. Общий пробег за время измерений составил более 2000 км, а время работы около 150 машино-часов.

Для анализа результатов, полученных при помощи регистратора, разработано специализированное программное обеспечение, позволяющее просматривать зависимости записанных величин от времени, вычислять интегральные величины, характеризующие расход энергии, и анализировать режимы движения троллейбуса на выбранном участке. Интерфейс программы показан на рисунке 5.

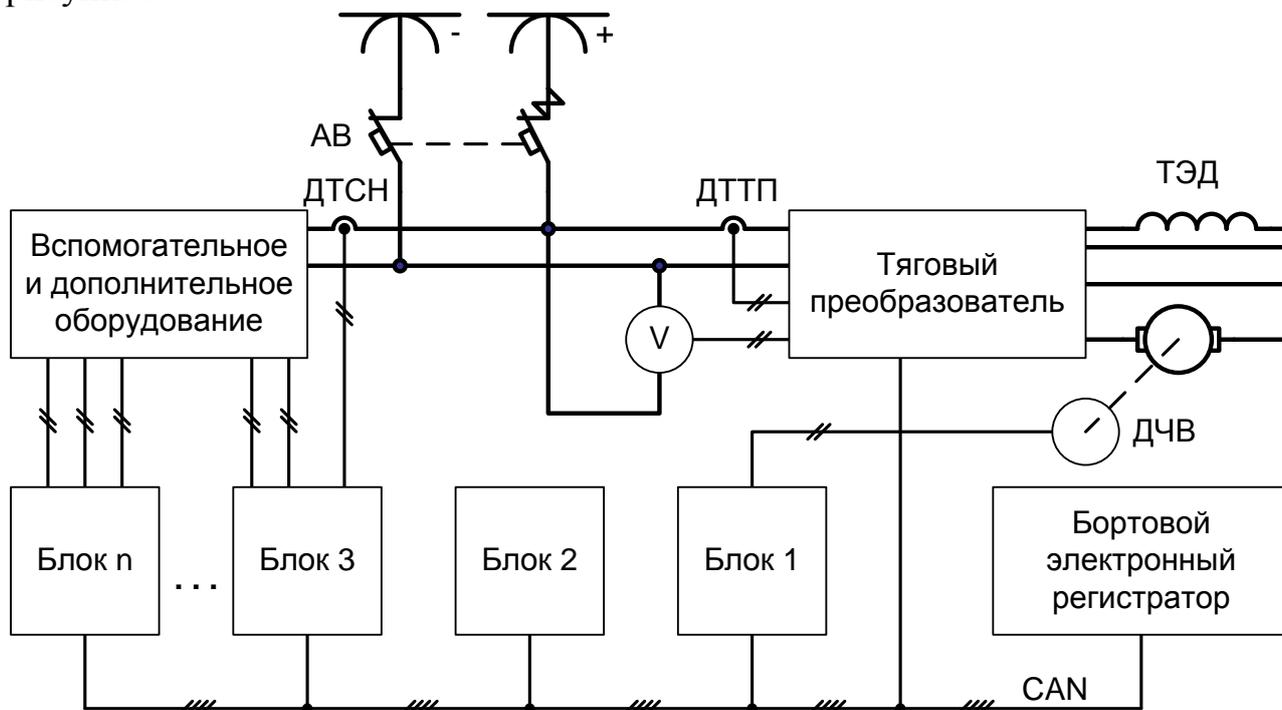


Рисунок 3 – Схема подключения регистратора параметров движения



Рисунок 4 – Регистратор параметров движения троллейбуса

Исследование полученных с помощью регистратора записей показало, что в пиковые часы рабочих дней на части маршрута наблюдались заторы, в которых средняя скорость движения падала до 3 – 8 км/ч; в остальных случаях средняя скорость движения составляла 15 – 18 км/ч. Установлено, что в среднем на километр пройденного пути приходится 3,5 остановки и совершается около 8 пусков и торможений, причем на свободной дороге число торможений составляет лишь 4 – 6 ед/км, а при заторах достигает 10 – 20 ед/км. Поскольку импульсная система управления позволяет произвольно задавать ток и силу тяги двигателя, водители имеют возможность выбирать различные режимы движения. Установлено, что в большом числе случаев водителями не осуществляется переход в режим выбега. Для увеличения комфортности и по ограничениям, вызванным транспортным потоком, разгон и торможение выполняются с относительно низкими

ускорениями (около $0,5 \text{ м/с}^2$), при этом полная мощность двигателя не используется. По условиям дорожного движения в ряде случаев необходимо выполнить торможение не до полной остановки. Фактическая средняя скорость начала торможения составляет $23,2 \text{ км/ч}$, завершения – $6,7 \text{ км/ч}$, в то время как расчетные скорости начала торможения лежат в диапазоне $27...38 \text{ км/ч}$.

Полученные результаты показывают, что доля потребления энергии на собственные нужды в летнее время составляет около 10% , а в зимнее может достигать 55% , то есть быть сравнимой с потреблением энергии на передвижение. Доля собственных нужд в годовом потреблении энергии современным троллейбусом с мощностью отопительных приборов, повышенной до $30 - 35 \text{ кВт}$, находится в пределах $35 - 40 \%$.

С использованием предложенной методики получены зависимости мощности, потребляемой тяговым электроприводом, от времени. Для подтверждения возможности распространения полученных результатов на все ТС, эксплуатируемые в аналогичных условиях, доказаны стационарность и эргодичность процесса потребления мощности.

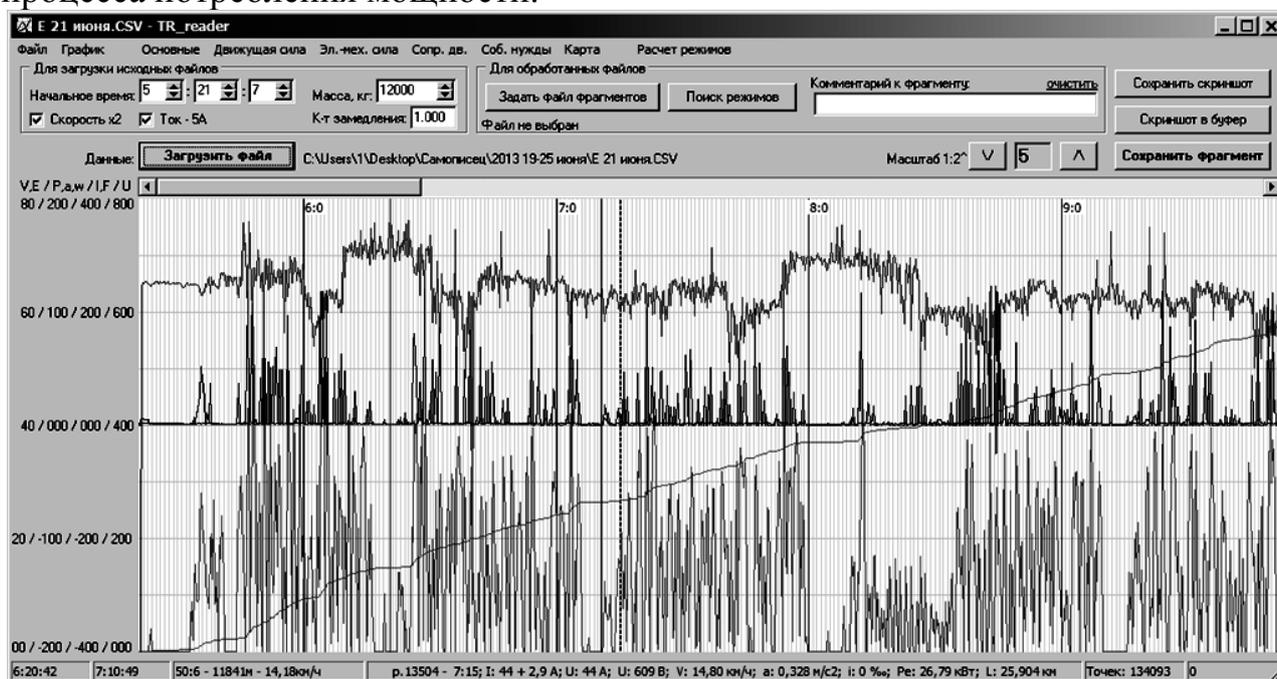


Рисунок 5 – Интерфейс программы для просмотра и анализа записей

По величинам скоростей начала и окончания актов торможения для среднего значения массы троллейбуса была оценена кинетическая энергия, поглощаемая при торможении. Распределение её по величине и выравнивающая функция, соответствующая закону гамма-распределения, показаны на рисунке 6. На рисунке 7 приведена зависимость доли запасаемой энергии торможений β от энергоёмкости БНЭ, учитывающая, что при энергии торможения менее энергоёмкости БНЭ она может быть принята им полностью, а в остальных случаях – частично. Полученные результаты показывают, что в условиях крупного города с затрудненным уличным движением большая часть торможений происходит в диапазоне низких скоростей. Так как величина кинетической энергии пропорциональна квадрату скорости движения, то величина энергии,

вырабатываемой при торможении, оказывается в 3 – 4 раза ниже ожидаемой, а число торможений – в 2 – 3 раза выше. С одной стороны, это означает снижение доли расходуемой ТС энергии, которая могла бы быть сэкономлена при повторном её использовании. С другой стороны, создается возможность значительного снижения энергоемкости, а значит, и стоимости БНЭ. Так, хотя кинетическая энергия троллейбуса с кузовом длиной 12 м при скорости 40 км/ч составляет 1,1 МДж, запас энергоемкости БНЭ на прием энергии торможения может быть выбран в диапазоне 300-600 кДж (30-50 кДж/т).

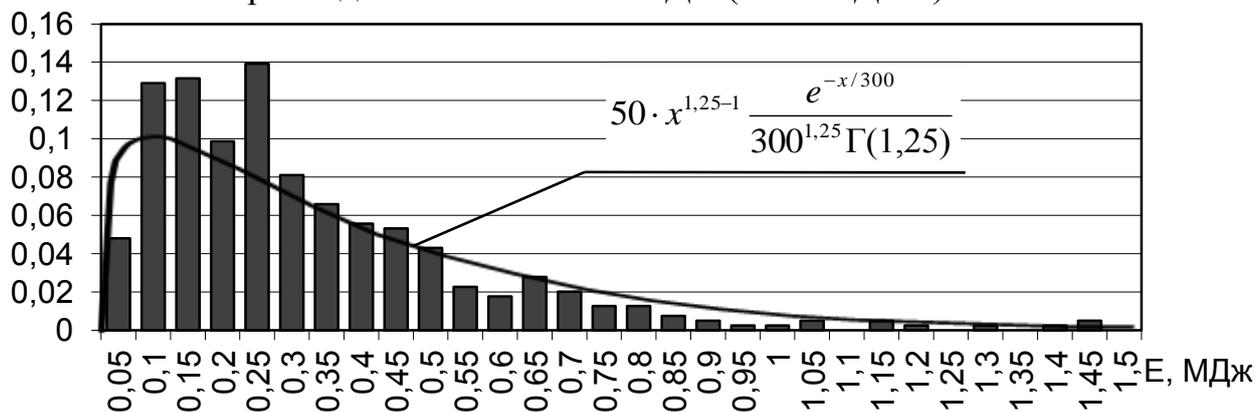


Рисунок 6 – Распределение величины кинетической энергии, рассеиваемой при торможении

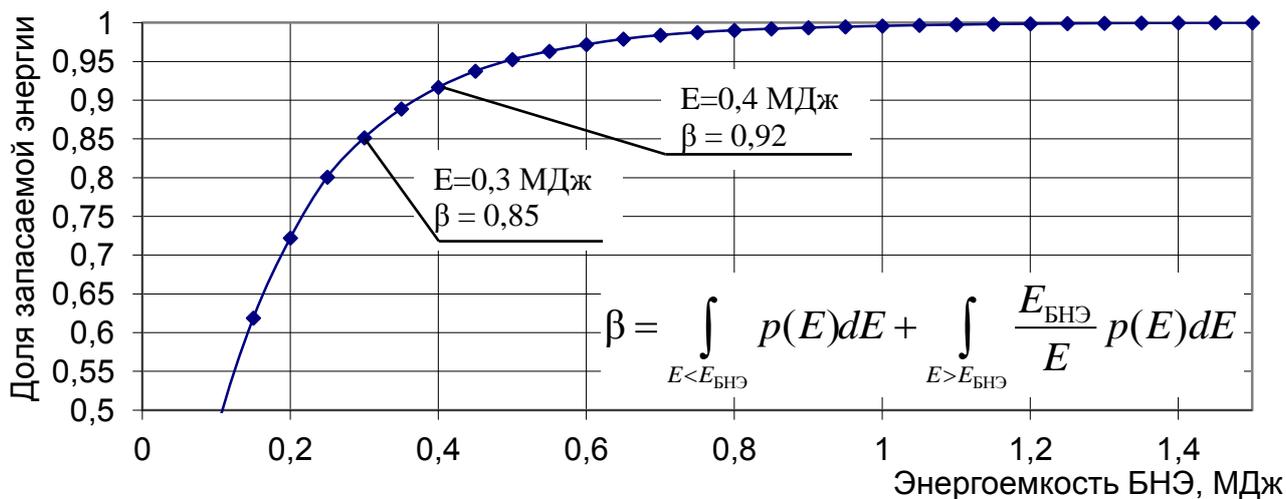


Рисунок 7 – Зависимость доли запасаемой энергии торможений от емкости БНЭ

В четвёртой главе на основании экспериментальных зависимостей $V(t)$ вычислена потребляемая тяговым приводом энергия в предположении, что автобус с КЭУ движется в том же цикле, что и троллейбус. Вычисления выполнены для каждого из исследованных рейсов при различных значениях мощности ПИЭ (генератора). В результате определены величины энергоемкости БНЭ, необходимой для реализации динамических характеристик ТС в доле рейсов p от 90 % до 99,5 % в зависимости от мощности первичного источника энергии. Фрагменты зависимостей скорости ТС и энергии накопителя от времени показаны на рисунках 8 и 9.

Полученный результат позволяет осуществить выбор необходимой энергоемкости накопителя, задавшись мощностью первичного источника энергии. На

графике (рисунок 10) можно выделить решения, соответствующие различным типам ТС. Так, нулевой мощности генератора соответствует электробус – ТС, передвигающееся исключительно за счет запасенной в накопителе энергии, а нулевой емкости БНЭ – автобус либо троллейбус, не использующие повторно энергию торможений. При малых мощностях генератора (менее 2 – 3 кВт/т) реализуется схема подзаряжаемого («plug-in») гибрида, требующего дополнительного заряда накопителя во время стоянки. При мощности ПИЭ, большей мощности тягового привода $P_{ТП}$ (около 10 кВт/т), БНЭ выравняет нагрузку ПИЭ, но его энергоемкость не ограничивает динамические характеристики транспортного средства. На рисунке 10 такая схема названа «автобус с БНЭ».

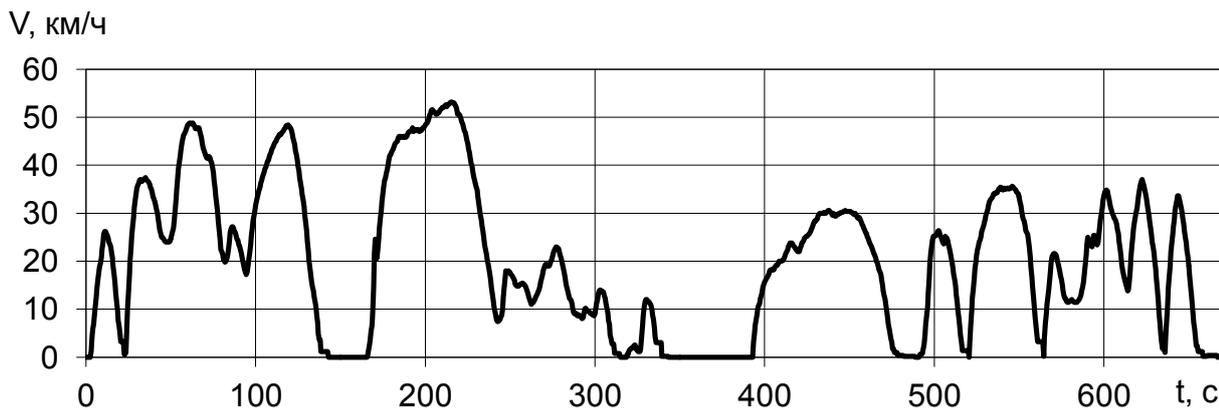


Рисунок 8 – Фрагмент записи скорости движения от времени

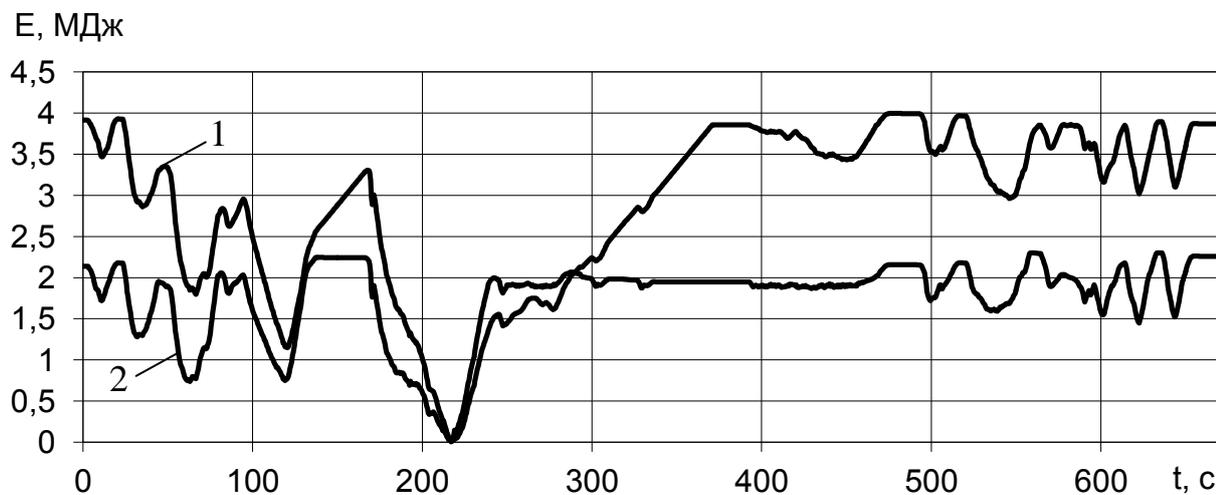


Рисунок 9 – Зависимость запаса энергии БНЭ от времени при мощности генератора 25 кВт (линия 1) и 50 кВт (линия 2)

При выборе мощности первичного источника энергии необходимо учитывать ограничения её минимальной величины. Мощность не может быть менее некоторого граничного значения, отделяющего «подзаряжаемые» (plug-in) ГТС от обычных, получающих энергию только от бортового источника. Необходимо учитывать также ограничение на мощность первичного источника энергии по времени заряда буферного накопителя энергии. Обоим ограничениям для ТС с кузовом длиной 12 м соответствует мощность первичного источника P_{min} около 35 кВт (3 кВт/т). Показано, что средняя мощность, потребляемая ГТС за рейс,

приближенно может считаться линейной функцией скорости сообщения.

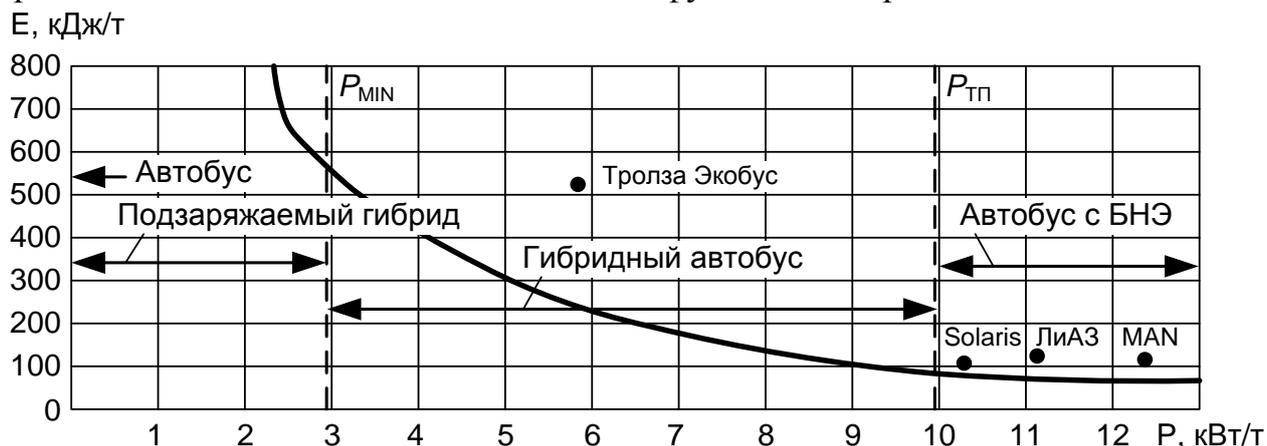


Рисунок 10 – Зависимость энергии БНЭ, обеспечивающей реализацию динамических характеристик ТС для доли рейсов $p = 99\%$ от мощности первичного источника энергии. Точками на рисунке показаны характеристики существующих образцов подвижного состава

Для транспортных средств, имеющих дальность автономного хода менее 30 – 40 км (например, троллейбус с автономным ходом), аккумулятор выбирается по мощности тягового привода. В этом случае установка конденсаторного накопителя повышенной энергоемкости позволила бы снизить мощность, а следовательно, и размеры аккумулятора в случае, если потребность в автономном ходе мала. Предельным решением такого рода является ТС с аккумулятором мощностью 35 кВт, способным обеспечить 6 – 8 км автономного хода и конденсаторным накопителем энергоемкостью 7 МДж. Но в этом случае энергоемкость аккумулятора окажется лишь двукратно превосходящей энергоемкость КДЭС, а стоимость системы значительно выше при сравнимом весе, что делает такое решение нецелесообразным. Это позволяет исключить из дальнейшего рассмотрения часть возможных транспортных средств. Полученная на основании кривых движения ТС зависимость между названными параметрами позволяет сократить массогабаритные характеристики и стоимость энергоустановки для ТС, эксплуатируемых в городах с равнинным профилем.

При оценке конструкций ТС важно учитывать затраты за весь период его эксплуатации, складывающиеся из стоимости приобретения ТС, его обслуживания и стоимости потребляемых за время эксплуатации топлива либо энергии. Перспективные конструкции безрельсовых ТС, помимо низкой стоимости владения, должны обладать также высокой степенью автономности и низким уровнем выброса загрязняющих атмосферу веществ. С этих позиций выбраны следующие схемы ТС: автобус на компримированном природном газе, троллейбус с автономным ходом, гибридный автобус и электробус.

Необходимо отметить тенденцию к интеграции транспортных средств по мере повышения экологических требований и развития технологий накопления и преобразования энергии. На рисунке 11 показаны направления эволюции ТС в координатах дальности автономного хода и удельного объема выбросов оксидов азота, считающегося наиболее опасным из загрязнителей.

Ожидается, что по мере развития источников электрической энергии оба направления развития объединятся в общей конструкции. Такое решение может возникнуть при повышении удельных характеристик промышленно выпускаемых образцов источников энергии – аккумуляторных батарей, топливных элементов или КДЭС – до величины, сравнимой с удельными показателями тепловых двигателей. При этом необходимая пиковая мощность может быть реализована за счет буферизации энергии, что позволит сохранить относительно низкую мощность первичного источника энергии и обеспечить более стабильный режим его работы. Таким образом, при переходе от системы ДВС – генератор к перспективным типам источников энергии описанные в работе принципы выбора параметров БНЭ сохранят свою актуальность. Более того, с применением гибридных автобусов возникает возможность их переоборудования с заменой первичного источника энергии в виде дизель-генератора на батарею топливных элементов либо аккумуляторов. Необходимым условием такого перехода является применение последовательной схемы КЭУ. Другими её преимуществами являются возможность разделения конструкции привода на отдельные модули и наибольший объем повторно используемой энергии.

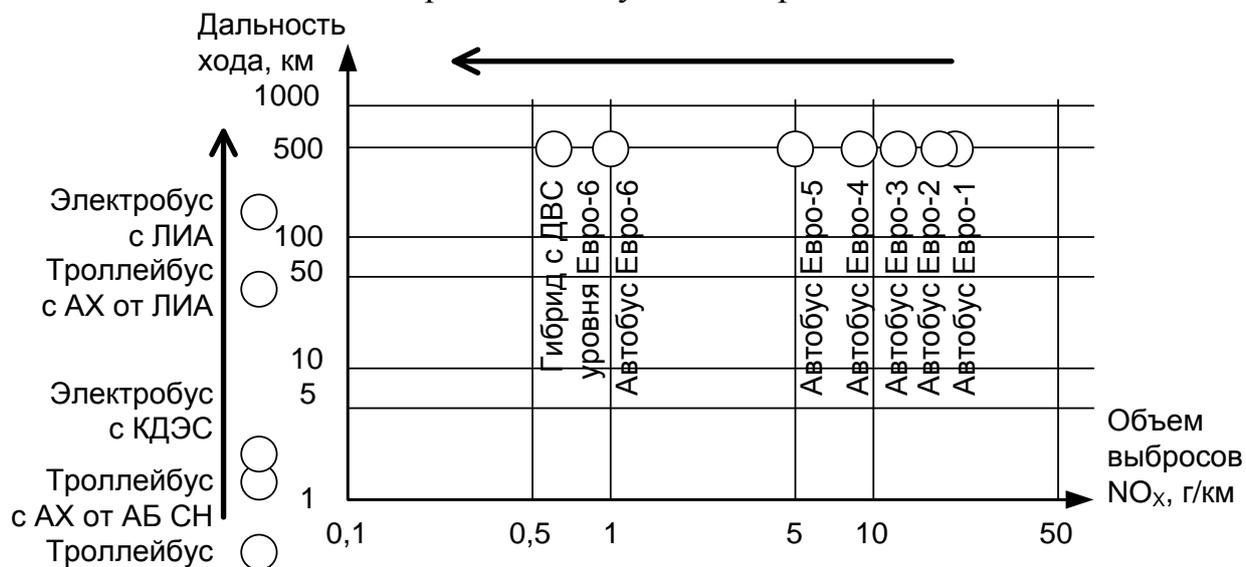


Рисунок 11 – Развитие безрельсового городского транспорта

Наиболее перспективной схемой неавтономного ТС является троллейбус с БНЭ, а автономного ТС – гибридный автобус с последовательной схемой и конденсаторными накопителями энергии. Основными их преимуществами являются наибольший объем повторно используемой энергии, минимальный объем атмосферных выбросов. Для ТС, имеющих длину кузова 12 метров, рекомендуемая энергоемкость буферного накопителя энергии для троллейбуса составляет 0,4 – 0,6 МДж, гибридного автобуса – 1,5 – 2 МДж при мощности генератора 150 кВт. По мере снижения стоимости накопителей энергии возможно сокращение мощности генератора до 35 – 50 кВт с увеличением энергоемкости БНЭ до 7 МДж. В перспективе возможно замещение генераторной установки с ДВС иными ПИЭ при сохранении тех же параметров и конструктивной схемы энергоустановки транспортного средства.

В заключении представлены основные полученные результаты:

1. Установлено, что на подвижном составе городского транспорта целесообразно применение КЭУ последовательной схемы, что обеспечивает наиболее полное использование энергии электрического торможения.

2. Предложена методика определения зависимости энергоемкости буферного накопителя энергии от мощности первичного источника энергии $E_{\text{БНЭ}}(P_{\text{ПИЭ}})$. На основании анализа стандартных циклов, используемых для определения топливной экономичности транспортных средств, показана необходимость экспериментального исследования циклов движения ТС.

3. Разработаны бортовой регистратор и программный комплекс для первичной обработки записей, позволяющие исследовать режимы движения транспортного средства в реальных условиях эксплуатации. В ходе анализа записей доказана возможность исследования циклов движения на одном ТС.

4. На основании полученного закона распределения энергии торможения показано, что для приема 90 % вырабатываемой при торможении энергии достаточно иметь накопитель энергоемкостью 30 – 50 кДж/т.

5. Путем интегрирования процессов потребления мощности тяговым электроприводом получена зависимость $E_{\text{БНЭ}}(P_{\text{ПИЭ}})$. Показано, что в условиях эксплуатации на городских маршрутах минимальная мощность первичного источника энергии ТС с КЭУ должна составлять 2 кВт/т.

Предложенные в работе принципы выбора мощности первичного источника энергии и энергоемкости буферного накопителя энергии могут быть использованы для различных типов источников, что обеспечивает их применимость по мере совершенствования технологий накопления и преобразования энергии на транспорте. В развитие выполненной работы могут быть более полно исследованы вопросы управления мощностью ПИЭ, уточнена расчетная модель путем более детализированного учета потерь в составных частях КЭУ, доработана предложенная методика определения параметров энергетических установок для других типов транспортных средств в различных условиях эксплуатации, а также для автономных подъемно-транспортных и строительных машин.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Применение накопителей энергии в системах электроснабжения городского электрического транспорта / А. А. Штанг, Е. А. Спиридонов, М. В. Ярославцев // Транспорт Российской Федерации. – 2012. – № 3–4 (40–41). – С. 68–70.

2. Определение энергоемкости бортового буферного конденсаторного накопителя энергии для городского электрического транспорта / А. В. Мятеж, М. В. Ярославцев // Транспорт Российской Федерации. – 2013. – № 4 (47). – С. 62–65.

3. Ярославцев М. В. Исследование сезонных изменений потребления электрической энергии троллейбусом / М. В. Ярославцев, А. В. Мятеж, Д. Д. Забелина // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2014. – №1–2. – С. 282–286.

4. Ярославцев М. В. Определение параметров энергоустановки гибридного

автомобиля моделированием процесса потребления энергии / М. В. Ярославцев // Электротехника. – 2014. – №12. – С. 17–21.

5. Аносов В. Н., Кавешников В. М., Ярославцев М. В. Повышение эффективности функционирования тягового электропривода троллейбуса // Электротехника. – 2014. – №12. – С. 14–16.

6. Ярославцев М. В. Определение оптимальной энергоемкости бортового буферного накопителя энергии / М. В. Ярославцев // Студент и научно-технический прогресс. Транспорт : материалы 51 междунар. науч. студ. конф., Новосибирск, 12–18 апр. 2013 г. – Новосибирск: Изд-во НГУ, 2013. – С. 46.

7. Ярославцев М. В. Эффективное использование энергии буферного накопителя гибридного транспортного средства / М. В. Ярославцев // Студент и научно-технический прогресс. Транспорт : материалы 52 междунар. науч. студ. конф., Новосибирск, 11–18 апр. 2014 г. – Новосибирск: Изд-во НГУ, 2014. – С. 33.

8. Михалёва О. А. Расчет энергоустановки гибридного автомобиля / О. А. Михалёва, М. В. Ярославцев // Студент и научно-технический прогресс. Транспорт : материалы 52 междунар. науч. студ. конф., Новосибирск, 11–18 апр. 2014 г. – Новосибирск: Изд-во НГУ, 2014. – С. 62.

9. Щуров Н. И., Ярославцев М. В. Эффективное использование энергии буферного накопителя гибридного транспортного средства // Инновационные технологии и экономика в машиностроении : сб. тр. 5 междунар. науч.-практ. конф., Юрга, 22–23 мая 2014 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – Т. 2. – С. 312–315.

10. Ярославцев М. В. Повышение энергетической эффективности тягового привода гибридного транспортного средства / М. В. Ярославцев // Электротехника. Энергетика. Машиностроение (ЭЭМ–2014) : сб. науч. тр. 1 междунар. науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, 2–6 дек. 2014 г. В 3 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – Ч. 1. Секция «Электротехника». – С. 287–290.

11. Ярославцев М. В. Выбор основных параметров тягового привода гибридного транспортного средства / М. В. Ярославцев // Электротехника. Энергетика. Машиностроение (ЭЭМ–2014) : сб. науч. тр. 1 междунар. науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, 2–6 дек. 2014 г. В 3 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – Ч. 1. Секция «Электротехника». – С. 290–293.

12. Ярославцев М. В. Применение накопителей энергии на подвижном составе городского безрельсового транспорта / М. В. Ярославцев // Электротехника. Электротехнология. Энергетика (ЭЭЭ-2015) : сб. науч. тр. 7 междунар. науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, 9–12 июня 2015 г. В 3 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. – Ч. 1. Секция «Электротехника». – С. 264–267.

13. Ярославцев М. В. Определение энергоемкости накопителя гибридного транспортного средства по экспериментальным записям его цикла движения / М. В. Ярославцев; науч. рук. В. Н. Аносов // Материалы 54 международной научной студенческой конференции (МНСК-2016). Электротехнические комплексы и системы, 16–20 апр. 2016 г. – Новосибирск: Изд-во НГУ, 2016. – С. 44.

Отпечатано в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
тел./факс (383) 346-08-57
формат 60 x 84/16, объём 1,25 п.л., тираж 100 экз.
заказ №1350 подписано в печать 27.09.2016 г.