

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи



ЯРОСЛАВЦЕВ МИХАИЛ ВИКТОРОВИЧ

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ ТЯГОВЫЙ ПРИВОД
ГОРОДСКОГО БЕЗРЕЛЬСОВОГО ТРАНСПОРТА

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
д-р техн. наук, доцент
Аносов Владимир Николаевич

Новосибирск – 2016

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ГОРОДСКОГО БЕЗРЕЛЬСОВОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА	13
1.1 Проблема повышения энергетической эффективности транспорта	13
1.2 Транспортные средства, использующие накопители энергии ...	20
1.3 Накопители электрической энергии	23
1.4 Комбинированные энергетические установки транспортных средств	28
1.5 Выводы	37
2 РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГИБРИДНОГО ТЯГОВОГО ПРИВОДА	38
2.1 Выбор схемы комбинированного привода	38
2.2 Моделирование тягового привода	40
2.3 Определение мощности тягового двигателя	47
2.4 Определение мощности первичного источника энергии и энергоемкости буферного накопителя	50
2.5 Проблема снижения запаса энергии буферного накопителя	53
2.6 Зависимость энергоемкости буферного накопителя от мощности первичного источника энергии	58
2.7 Стандартные циклы для исследования топливной экономичности транспортных средств	63
2.8 Выводы	66
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИКЛОВ ДВИЖЕНИЯ ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА ...	68
3.1 Цели и задачи исследования	68
3.2 Оборудование и методика исследования	69

3.3 Программный комплекс для анализа режимов движения троллейбуса	77
3.4 Статистический анализ процесса потребления мощности тяговым электроприводом	82
3.5 Потребление энергии троллейбусом	87
3.6 Выводы	94
4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С КОМБИНИРОВАННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ	96
4.1 Зависимость энергоемкости буферного накопителя от мощности первичного источника энергии	96
4.2 Определение минимально необходимой мощности первичного источника энергии	104
4.3 Типы перспективного безрельсового подвижного состава городского транспорта	111
4.4 Выводы	117
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	119
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	121
ПРИЛОЖЕНИЕ А	133
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	138
ПРИЛОЖЕНИЕ В	145
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	156

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы. Повышение стоимости энергоресурсов и усиление экологических требований к используемым транспортным средствам, а также развитие новых источников энергии ставят вопрос о первоочередных направлениях развития подвижного состава городского безрельсового транспорта. Среди применяемых на подвижном составе городского пассажирского транспорта источников энергии наибольшее распространение получили накопители энергии на основе литий-ионных батарей и конденсаторов двойного электрического слоя, а также топливные элементы. 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 различаются только типом и сочетанием используемых источников энергии.

Несмотря на все различия ТС, габариты и конструкция их кузова, а также планировка салона остаются близки, поэтому основным критерием различия транспортных средств является набор источников энергии в составе их энергетической установки. Перспективные энергетические установки должны иметь ресурс работы, близкий к сроку службы кузова транспортного средства, иметь малый вес и стоимость, а также гибкость конструкции, позволяющую как применить их на подвижном составе различной вместимости, так и модернизировать по мере совершенствования источников энергии.

В разработку методов преобразования энергии и снижения энергопотребления на электрифицированном транспорте внесли вклад ряд отечественных и зарубежных ученых. В. Е. Розенфельд и М. П. Кутыловский разрабатывали теорию тяговых расчетов [1, 2]. И. С. Ефремовым совместно с Г. В. Косаревым рассмотрены вопросы выбора оптимальных характеристик электрического оборудования, проектирования автономных электротранспортных средств и ТС с комбинированной энергоустановкой [3, 4]. Заметный вклад в

разработку энергоэффективных тяговых приводов и совершенствование методов снижения энергопотребления на движение поезда внесли К. Г. Марквардт, В. П. Феоктистов, В. В. Шевченко, А. Ruffer и другие [5-7].

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, а также разработки методов проектирования таких накопителей внесли такие российские и зарубежные учёные, как К. Л. Богданов, И. Н. Варакин, М. Zolot, К. J. Kelly, Т. Markel, А. Burke и др [8-11].

В начале XXI века приобрели актуальность исследования автономных ТС с гибридными и комбинированными энергоустановками, посвященные поиску наилучших схемных и конструктивных решений, а также алгоритмов управления. Среди работ в этой области можно отметить труды К. Gokce, P. Bubna, S. Kermani, Zilin Ma, М. А. Слепцова и др [12-14].

В Новосибирском государственном техническом университете Н. И. Щуровым и В. И. Соповым выполнен 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. Н. Аносова и В. М. Кавешникова исследован тяговый электропривод автономных ТС с комбинированной энергоустановкой [15-20].

В работах по проектированию ТС с накопителями энергии величину необходимого запаса энергии оценивают либо для движения по перегону в типовом цикле, либо на основании стандартных циклов, используемых для исследования топливной экономичности автомобилей. Но 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 движении в общем потоке. При выборе характеристик накопителя энергии и тягового привода безрельсового

подвижного состава в целом 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 гибридной 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 энергоемкости 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 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.

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 рассматривается проблема повышения энергетической эффективности тягового привода городского безрельсового транспорта. Выполнен анализ существующих конструкций подвижного состава, использующих накопители энергии, на основании которого показано, что городской безрельсовый транспорт является наиболее перспективной областью внедрения новых технических решений. Проанализированы основные типы накопителей электрической энергии, применяемые на транспорте. Рассмотрены аккумуляторы на основе соединений никеля и литий-ионные аккумуляторы, конденсаторы двойного электрического слоя. Показано, что основными

характеристиками источников электрической энергии являются удельная мощность и удельная энергоемкость, удельная стоимость, а для накопителей также и допустимое количество циклов заряда-разряда.

В главе также рассматриваются возможные схемы гибридного тягового привода, способы связи источников энергии в составе энергетической установки транспортного средства, методы управления мощностью источников энергии в составе комбинированного тягового привода. В результате выполненной классификации транспортных средств, их режимов движения и накопителей энергии уточнены объект и предмет исследования.

Во второй главе рассмотрен расчет основных характеристик гибридного тягового привода, описана методика выбора мощности тягового двигателя и первичного источника энергии. Выполнено моделирование работы привода для оценки потерь энергии, а также проведен расчет средней потребляемой мощности за цикл разгона-торможения транспортного средства. Показана возможность снижения запаса энергии БНЭ ниже допустимого уровня. Для решения проблемы снижения запаса энергии БНЭ сформулированы требования к мощности первичного источника энергии и энергоемкости буферного накопителя, необходимым для реализации заданного цикла движения гибридного транспортного средства. Показана зависимость характеристик энергетической установки от цикла движения транспортного средства. Предложен способ определения их по кривым движения ТС. Показана необходимость экспериментального исследования циклов движения подвижного состава вместо применения в качестве исходных данных для расчета стандартных циклов движения, используемых при определении топливной экономичности транспортных средств.

В третьей главе рассмотрено экспериментальное исследование циклов движения подвижного состава городского транспорта на примере троллейбуса. Описаны регистратор, созданный для выполнения исследования циклов движения и программное обеспечение, разработанное для просмотра и анализа полученных записей. Приведены принципиальная электрическая схема регистратора и

алгоритм его работы, схема подключения регистратора к системе управления троллейбуса. Дано описание основных функций программы для анализа записей и последовательности первичной обработки полученных данных.

На основании полученных записей выполнен анализ потребления энергии транспортным средством на примере троллейбуса. Показана зависимость удельного расхода энергии от температуры воздуха и от условий дорожного движения. На основании распределения энергии торможения транспортного средства получена зависимость доли запасаемой энергии от общей вырабатываемой при торможениях энергии в функции емкости буферного накопителя энергии.

В главе также выполнен анализ потребления мощности тяговым электроприводом транспортного средства как случайного процесса. Доказаны его стационарность и эргодичность, показана возможность распространения полученных результатов на другие транспортные средства.

В четвертой главе по предложенной методике на основе полученных записей кривых движения вычислена необходимая энергоемкость буферного накопителя в зависимости от мощности первичного источника энергии. Рассмотрены её отклонения для рейсов, выполненных в различное время. Определены ограничения минимальной мощности первичного источника энергии по времени заряда накопителя энергии и по общему потреблению энергии на движение. Показана зависимость характеристик энергоустановки от средней скорости движения. Получены рекомендуемые параметры энергетической установки для гибридного автобуса и троллейбуса с буферным накопителем энергии. В главе также рассмотрены возможные типы транспортных средств, совмещающих несколько источников энергии, и выбраны наиболее перспективные их варианты.

В заключении приведены основные результаты, достигнутые при выполнении работы, и предложены возможные направления дальнейших исследований.

В приложениях приведены характеристики накопителей электрической

энергии, характерные примеры экспериментальных записей циклов движения транспортного средства в различных условиях, результаты тягово-энергетического расчета движения автобуса с комбинированной энергетической установкой по записанным экспериментально кривым движения.

1 АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ГОРОДСКОГО БЕЗРЕЛЬСОВОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА

1.1 Проблема повышения энергетической эффективности транспорта

В настоящее время остро стоит вопрос сокращения расхода энергии на подвижном составе городского транспорта. Снижение запасов невозобновляемых энергетических ресурсов, обострение экологических проблем, повышение стоимости энергоносителей обуславливают актуальность вопросов сбережения энергии. Согласно федеральному закону об энергосбережении и энергетической эффективности, энергетическая эффективность – это «характеристики, отражающие отношение полезного эффекта от использования энергетических ресурсов к затратам энергетических ресурсов, произведенным в целях получения такого эффекта» [1]. Применительно к электрическому транспорту полезными эффектами являются транспортная работа по перевозке пассажиров и обеспечение комфортных условий их перевозки. Таким образом, основным показателем энергетической эффективности электрического транспорта является удельный расход энергии, измеряемый обычно в Вт·ч/т·км. Для близких по вместимости транспортных средств удельный расход энергии может быть измерен в кВт·ч/км.

В работе рассматривается городской наземный безрельсовый пассажирский транспорт. Традиционным и наиболее массово эксплуатируемым видом такого транспорта является троллейбус. Но по мере совершенствования устройств накопления и передачи энергии возникают и новые виды транспорта. Широкое внедрение тяговых приводов с импульсным регулированием создало к настоящему времени возможность экономии энергии путем её рекуперации в процессе торможения. При этом вырабатываемая энергия может возвращаться как в сеть, так и в накопитель. Созданы накопители энергии с технико-экономическими показателями, близкими к необходимым для эффективного использования их на транспорте, в первую очередь – литий-ионные аккумуляторы

(ЛИА) и конденсаторы двойного электрического слоя (КДЭС).

Понятие вида транспорта для городских пассажирских перевозок по автомобильным дорогам определяется в первую очередь источниками энергии транспортного средства. Ими могут быть тепловой двигатель, контактная сеть, накопитель либо иной источник электрической или механической энергии, устанавливаемые в унифицированные кузова. Применение электрического привода позволяет повысить энергетическую эффективность транспорта с двигателями внутреннего сгорания за счет возможности рекуперации энергии электрического торможения. Поэтому перспективные направления развития техники городского уличного транспорта определяются главным образом развитием новых энергетических установок.

Выбор наземного транспорта в качестве темы исследования определен несколькими факторами. С одной стороны, на троллейбус и автобус приходится наибольшая часть подвижного состава и наибольший объем перевозок (см. таблицу 1.1) [2]. При этом среди всех видов городского пассажирского транспорта безрельсовые имеют значительно больший удельный расход энергии – 150-200 Вт·ч/т·км против 50-80 Вт·ч/т·км у рельсового транспорта [3].

Таблица 1.1 – Количество подвижного состава и объем перевозок во внутригородском сообщении по видам городского транспорта в России в 2013 г.

Вид транспорта	Автобус	Троллейбус	Трамвай	Метрополитен
Количество подвижного состава, тыс. ед.	72 (без разделения по видам сообщения)	10,7	8,3	7,0
Объем перевозок, млн. чел.	4598	1735	1629	3491
Пассажирооборот, млрд. пасс·км	37,8	5,7	5,3	45,6

Таким образом, даже незначительное снижение расхода энергии на безрельсовом транспорте обеспечивает наибольший экономический эффект. С другой стороны, именно безрельсовый транспорт является наиболее перспективной областью для внедрения новых технических решений по причине

высокой маневренности, требующей перехода от централизованных к частично или полностью автономным источникам энергии, а также режима движения, связанного с частыми пусками и торможениями.

Электрический транспорт является электротехническим комплексом, в котором осуществляется распределение и преобразование электрической энергии. Проблему повышения энергетической эффективности необходимо рассматривать как комплексную задачу, охватывающую все его элементы. На рисунке 1.1 показаны основные пути передачи и распределения энергии в традиционной системе городского электрического транспорта, питающегося от контактной сети.

В преобразовании и потреблении электрической энергии участвуют две составные части электрического транспорта: система электроснабжения (СЭС) и электроподвижной состав (ЭПС). Первичным источником энергии (ПИЭ) контактного городского электротранспорта является городская энергетическая система, питающая тяговые подстанции напряжением 6 либо 10 кВ. В СЭС на тяговых подстанциях выполняется преобразование рода тока и величины напряжения первичной сети до стандартного для электрического транспорта – 600 В постоянного тока. Тяговая сеть обеспечивает передачу энергии на ЭПС, причем передача энергии возможна как в прямом (в режиме тяги), так и в обратном (при рекуперации) направлениях.

На электроподвижном составе происходит преобразование электрической энергии в кинетическую энергию движения поезда, часть которой расходуется на совершение полезной работы по передвижению ЭПС (то есть преодоление сопротивления движению), за вычетом потерь в тяговом электроприводе. Другая часть кинетической энергии при торможении ЭПС либо превращается в тепловую в механических тормозных устройствах и тормозных реостатах, либо возвращается в контактную сеть при рекуперативном торможении. Кроме того, энергия расходуется на собственные нужды ЭПС, то есть на работу вспомогательного электрооборудования. Для определения путей повышения энергетической эффективности электротранспортного комплекса необходима оценка затрат энергии при преобразовании на различных этапах.

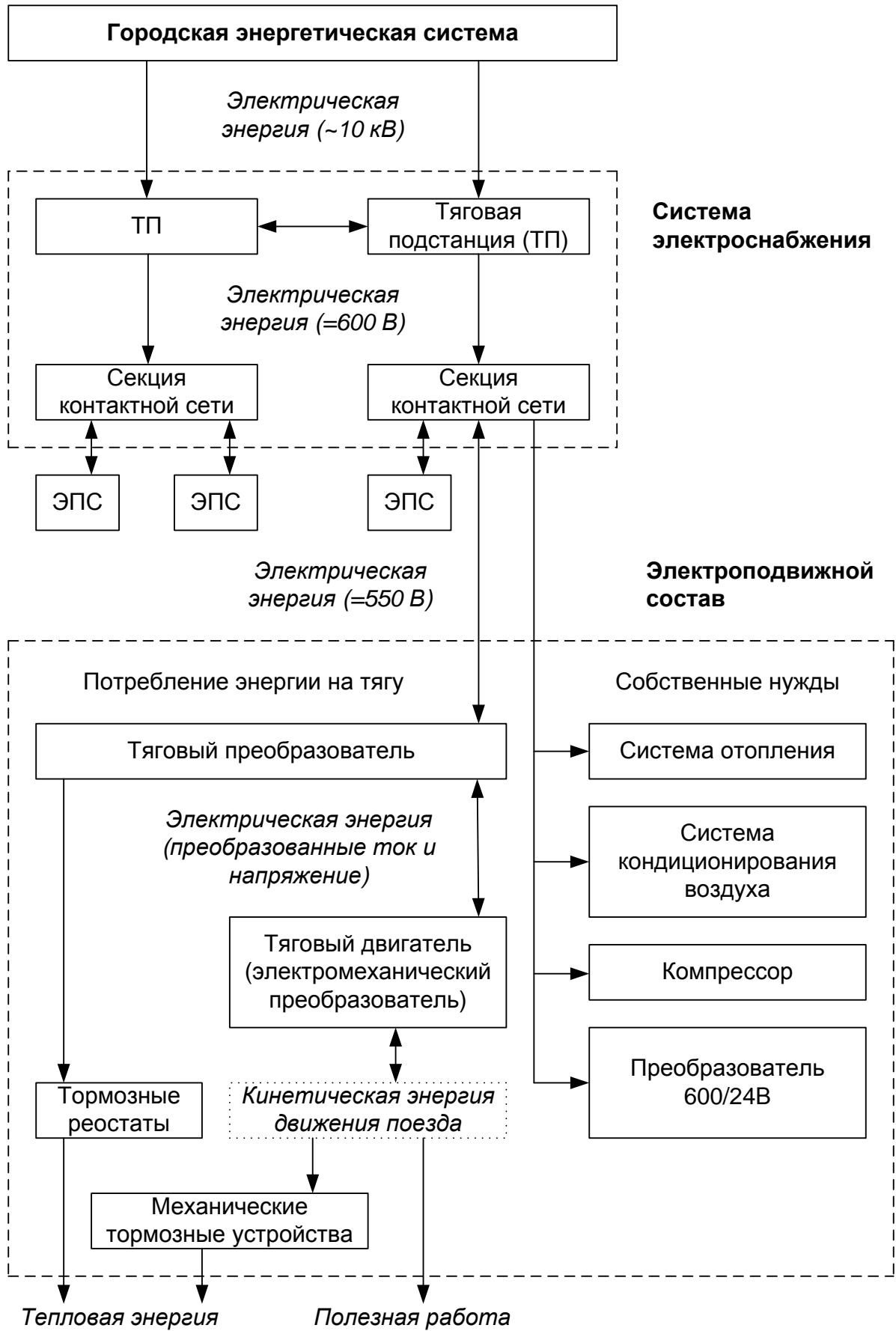


Рисунок 1.1 – Распределение и преобразование энергии в электротехническом комплексе городского электрического транспорта

Основными способами повышения экономичности тягового привода являются безреостатное регулирование напряжения на тяговых двигателях и использование кинетической энергии движущегося поезда при его торможении. Первый способ был реализован с созданием современных силовых полупроводниковых приборов. Энергия рекуперации частично использовалась уже в первых системах электрического транспорта постоянного тока. Но возможность рекуперации существенно ограничивалась двумя условиями: необходимостью поддержания высокой скорости движения, при которой ЭДС тягового двигателя выше напряжения сети, и наличием потребителя вырабатываемой энергии на общей секции тяговой сети при невозможности её накопления либо передачи во внешнюю сеть. Так, на троллейбусе вероятность рекуперации составляет 16 ... 20 % [4]. Применение схем импульсного регулирования позволило повышать вырабатываемое двигателем напряжение, что расширило диапазон скоростей, в котором возможна рекуперация энергии. В то же время, до сих пор не получила однозначного технического решения проблема отсутствия приемника энергии рекуперации.

Известно несколько способов обеспечения возможности использования энергии рекуперации: объединение секций тяговой сети, установка инверторов на тяговых подстанциях, накопление энергии в системе электроснабжения или на подвижном составе. Последний способ является наиболее перспективным по нескольким причинам: при накоплении энергии на подвижном составе отсутствуют потери на передачу энергии по тяговой сети; реконструкция подвижного состава может производиться постепенно, с меньшими разовыми затратами; развитие накопителей электрической энергии (НЭ) делает возможным создание частично либо полностью автономных транспортных средств, способных передвигаться в отрыве от системы электроснабжения. Можно ожидать, что при некоторых циклах движения буферизация энергии торможения в НЭ позволит сократить расход энергии на тягу на величину до 30 ... 40 % [25].

Другим существенным направлением энергосбережения является сокращение потерь энергии в системе электроснабжения. При номинальном

напряжении на шинах тяговой подстанции 600 В напряжение на токоприемнике ЭПС может снижаться до величины 400 В, то есть потери на передачу энергии могут превышать 30%. Сокращение количества потребляемой из сети энергии позволит снизить потери на её передачу, уменьшить среднюю величину нагрузки тяговых подстанций, а также сделать нагрузку более равномерной, что даст возможность несколько сократить потери на преобразование энергии на тяговых подстанциях.

Ещё одним путем повышения энергоэффективности электрического транспорта является сокращение расхода энергии на собственные нужды. Так, в зимнее время требуется значительная мощность для отопления салона, и величина энергии, потребляемой на обеспечение собственных нужд ЭПС, может быть сравнима и в отдельных случаях даже превышать величину энергии, расходуемой на тягу [26]. Таким образом, реализация мер по сокращению расхода энергии на собственные нужды также способна существенно снизить потребление энергии электрическим транспортом.

Помимо энергетической эффективности, в настоящее время к подвижному составу безрельсового транспорта предъявляются требования по повышению автономности транспортных средств. Возможность автономного хода повышает маневренность подвижного состава и сокращает стоимость необходимой для его эксплуатации инфраструктуры. Автономность транспорта может достигаться как за счет использования накопителей энергии на ЭПС, так и применением других источников энергии, например, тепловых двигателей либо топливных элементов. При этом установка электрического тягового привода позволяет повторно использовать энергию торможения и понизить таким образом расход топлива.

Подвижной состав городского пассажирского транспорта может быть классифицирован по вместимости, режиму движения, типу используемых источников энергии. Автобусы особо малой вместимости допускают перевозку пассажиров только сидя, остальные классы допускают перевозку пассажиров стоя. В случае перевозки пассажиров стоя накладываются ограничения на динамические характеристики транспортного средства: ограничиваются его

ускорение и скорость нарастания ускорения. В данной работе рассматриваются только ТС, допускающие перевозку стоящих пассажиров. Значительная часть выпускаемых в настоящее время моделей автобусов и троллейбусов имеют кузова длиной 12 м, близкие по габаритным размерам, применяемым материалам и массе, поэтому в работе результаты расчетов приводятся, как правило, для транспортного средства большой вместимости с длиной кузова 12 м, массой тары 10 ... 12 т и пассажироместимостью 100 ... 110 чел. Так как при тягово-энергетических расчетах силы, действующие на транспортное средство, допускается считать пропорциональными его массе [23], результаты могут быть распространены на транспортные средства другой вместимости, имеющие аналогичные динамические характеристики, путем перехода к удельным величинам.

Тип энергетической установки определяет различия характерных режимов движения транспортных средств. Так, для автобусов характерны колебания пускового ускорения в моменты изменения передаточного числа механической передачи. В силу сложности останова и запуска двигателя внутреннего сгорания (ДВС), для автобуса характерен режим поддержания постоянной скорости движения до начала торможения. Для троллейбусов с реостатным регулированием скорости тягового двигателя, наоборот, характерно чередование режимов тяги с высоким ускорением и выбега. По мере распространения систем импульсного регулирования, позволяющего плавно регулировать момент тяговых электродвигателей (ТЭД), возникает возможность поддержания установившейся скорости движения ТС с электрическим тяговым приводом. Можно ожидать, что режимы движения транспортных средств с импульсным регулированием будут аналогичны независимо от типа электрической машины и источника энергии.

К настоящему времени предложено значительное количество видов транспортных средств с энергетическими установками, использующими различные сочетания источников и накопителей энергии. Например, это могут быть автобусы, использующие двигатель внутреннего сгорания с электрической трансмиссией, в состав которой входят накопители электрической энергии. В

результате возникает задача выбора сочетания источников энергии, обеспечивающего наименьший расход энергоресурсов и наибольшую дальность автономного передвижения ТС, и определения их параметров, в первую очередь, мощности и энергоемкости.

1.2 Транспортные средства, использующие накопители энергии

За последние годы создан ряд образцов подвижного состава городского транспорта, использующих накопление электрической энергии.

В 2005 году в Риме открыта линия троллейбуса, не имеющая контактной сети на тупиковом участке в центре города протяженностью около 3 км. Применение на ней электрического транспорта обосновывается требованиями экологии. Передвижение троллейбусов обеспечивается за счет никель-металлгидридных аккумуляторных батарей. На ней работают троллейбусы Solaris Trollino 18, дополнительно оснащенные оборудованием для автономного хода. Заявленный производителем гарантированный срок службы аккумуляторов составляет 5-6 лет [27].

Основным недостатком никель-металлгидридных аккумуляторов является большой вес. Энергоемкость батареи с заявленными параметрами можно оценить величиной 10 кВт·ч, что в 3-5 раз ниже энергоемкости литий-ионной батареи того же веса.

Одним из лидеров по производству новых видов транспортных средств в настоящее время является Китай. В 2005 году в Шанхае созданы 4 образца электробуса с суперконденсаторными накопителями компании Aowei (иногда обозначаемых как UCSB – ultracapacitor buses). Накопители электробусов заряжаются от контактной сети только на остановках при помощи токоприемника специальной конструкции. Контактная сеть на перегонах отсутствует, движение электробусов производится только за счет запасенной в накопителе энергии [28]. В 2008 году был открыт кольцевой маршрут протяженностью 5,5 км с 10 зарядными станциями. Номинальные параметры его контактной сети близки к

стандартным для городского транспорта – номинальное напряжение составляет 620...720 В постоянного тока, и зарядные пункты получают питание от тяговых подстанций троллейбуса. Дальность хода электробуса при полностью заряженном накопителе составляет около 5 км, время полного заряда конденсаторной батареи – от 30 до 80 с. Частота размещения зарядных станций была увеличена для сокращения продолжительности стоянок и обеспечения возможности пропуска части из них по условиям дорожного движения. При длине 12 м и весе 18 т электробус благодаря использованию рекуперации энергии торможения имеет расход энергии 0,98 кВт·ч/км, что в 1,5 ... 2 раза ниже характерных для троллейбуса значений.

Недостатком предложенной системы являются большой вес конденсаторной батареи. Стоимость указанного электробуса в 1,5 ... 2 раза превосходит стоимость троллейбуса, но позволяет сократить затраты на инфраструктуру и избежать потерь на передачу энергии по контактной сети. При эксплуатации электробусов были отмечены сложность выполнения маневров в депо по причине малого запаса хода и случаи перегрева батарей в условиях тропического климата.

В Харбине в 2011 году создан опытный образец электробуса, имеющий накопитель увеличенной энергоемкости и дизельный генератор малой мощности, пополняющий его заряд. Рядом китайских компаний выпускались также партии электробусов на литиевых, главным образом литий-железофосфатных, аккумуляторах [28]. Так, ко всемирной выставке, прошедшей в 2010 году, в Шанхае были введены в эксплуатацию 120 электробусов с литиевыми батареями, обеспечивающими 3-х часовой запас хода, позволяющий совершить оборотный рейс, 40 электробусов с конденсаторными накопителями и 150 гибридных автобусов. Компания Ankaï предлагает широкий ряд моделей подвижного состава, включающий как электробусы на литиевых батареях с запасом хода до 200 – 300 км, так и гибридные машины, сочетающие литиевые аккумуляторы с двигателями внутреннего сгорания [29].

В 2013 году в Вене был запущен первый в Европе регулярный маршрут, использующий электробусы. Электробусы с кузовом средней вместимости имеют

литий-железофосфатные батареи энергоемкостью 96 кВт·ч. Каждый из них способен перевозить 44 пассажира на расстояние 120-150 км на одной зарядке. Заряд производится при помощи пантографа на крыше на конечных остановках и требует не более 15 минут. Дополнительно машины заряжаются малым током (мощность заряда 15 кВт) ночью в гараже. Батареи питают также системы отопления и кондиционирования [30, 31].

В качестве одного из возможных перспективных путей развития транспортных энергетических установок рассматривается совместное использование различных накопителей энергии [32]. В то же время ТС, использующие разные типы накопителей энергии совместно с тепловыми двигателями, пока не получили широкого распространения. Экспериментальный образец транспортного средства, построенного на этом принципе, был создан в университете Сантьяго [33]. Электробус, использующий одновременно аккумуляторный и конденсаторный накопители, построен в Китае [34].

В России к настоящему времени также создан ряд опытных образцов транспортных средств различных схем. Так, в 2007 году МЭИ совместно с Волгоградским заводом транспортного машиностроения (ВЗТМ) был создан и прошел испытания образец гибридного автобуса с возможностью работы в режиме троллейбуса. Конденсаторный накопитель обеспечивал прием энергии рекуперации, а также получал заряд от генератора, приводимого автомобильным бензиновым двигателем мощностью около 50 кВт [35].

ЗАО «Тролза» в 2009 г. разработан гибридный автобус с газотурбинным генератором, электрическим приводом и конденсаторным накопителем энергии. Для привода генератора в автобусе использована газовая турбина Capstone мощностью 65 кВт, способная работать на различных видах топлива, включая природный газ, что позволяет снизить эксплуатационные расходы. Вырабатываемая газотурбинным генератором энергия запасается в КДЭС, энергоемкость которых составляет 5,2 МДж. КДЭС питают тяговый привод и могут заряжаться за счет энергии электрического торможения. Производителем заявлен расход газа 0,33 м³/кВт·ч [36].

В 2011 году ЗАО «Тролза» построен электробус с питанием от литий-ионных аккумуляторов (ЛИА), заряжаемых во время стоянки. Заявленный пробег электробуса без подзаряда аккумуляторов составляет 250 км, что превышает среднесуточный пробег автобуса [36]. Близкие по техническим характеристикам электробусы созданы также на основе автобусов ЛиАЗ и НефАЗ.

В 2011 году в Новосибирске предприятиями ООО НПФ «АРС-Терм», ООО НПФ «Ирбис», ООО «Сибирский троллейбус» созданы троллейбусы, имеющие возможность автономного хода большой дальности (до 40 км) с зарядом аккумуляторов во время движения при питании от контактной сети и при рекуперации в автономном режиме [37]. Основными недостатками электробусов являются большой вес аккумуляторных батарей, достигающий нескольких тонн, их объем, затрудняющий постройку машин с низким уровнем пола, и ограниченный срок службы, что требует периодической замены дорогостоящих элементов батареи.

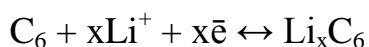
Итак, наиболее широкое распространение на транспорте получили ЛИА и КДЭС. КДЭС обладают низкой удельной энергоемкостью при высокой удельной мощности и большом числе циклов заряда-разряда, ЛИА – наоборот, высокой удельной энергоемкостью. Таким образом, характеристики этих устройств дополняют друг друга и позволяют обеспечить хранение электрической энергии в различных ситуациях. Далее приведены краткие сведения об этих основных видах накопителей электрической энергии.

1.3 Накопители электрической энергии

Литий-ионные аккумуляторы. Наряду с традиционными свинцовыми и железо-никелевыми аккумуляторами на транспорте получают все более широкое применение и новые типы химических накопителей энергии, такие как литий-ионные аккумуляторные батареи. Литий является перспективным материалом для производства накопителей, поскольку он самый легкий металл, обладающий в то же время сильно отрицательным электрохимическим потенциалом. Благодаря

этому литий характеризуется наибольшей теоретической удельной электрической энергией. Вторичные источники тока на основе лития обладают высоким разрядным напряжением и значительной емкостью. Однако в первых типах накопителей на основе лития при коротком замыкании внутри элемента была возможна бурная химическая реакция, сопровождающаяся взрывом [38].

Для создания безопасных источников тока неустойчивый при циклировании в аккумуляторе металлический литий было предложено заменить на соединения лития в углероде и оксидах переходных металлов. Тем не менее, полностью решить проблему многократного растворения - осаждения металлического лития не удалось до сих пор [38]. Пленка на поверхности металла в данном случае играет негативную роль, так как литий, выделяющийся из раствора при заряде, сразу покрывается пленкой и капсулируется. Вследствие этого катодный осадок лития, образующийся в процессе заряда аккумулятора по реакции $\text{Li}^+ + \bar{e} \rightarrow \text{Li}^0$, оказывается состоящим из отдельных электрически изолированных друг от друга частиц, не способных к повторному анодному растворению. Более того, этот осадок является пожаро- и взрывоопасным. Решением проблемы его возникновения стало применение соединений внедрения для изготовления не только положительного, но и отрицательного электрода. Такой тип химического источника тока получил название литий-ионного аккумулятора (ЛИА). Его анод изготавливается из углерода, в который ионы лития внедряются при заряде и извлекаются обратно при разряде:



Аналогичный электрохимический процесс происходит и на катоде, в результате чего ионы лития совершают челночные перемещения между анодом и катодом. Использование углеродной матрицы позволило решить проблему катодного осаждения лития. Тем не менее, циклируемость ЛИА достигается за счет существенных потерь удельной энергоемкости. Так, для LiC_6 теоретическая удельная емкость составляет всего лишь 372 А·ч/кг вместо 3860 А·ч/кг для чистого лития [38]. Соединение LiC_6 обладает отрицательным электродным потенциалом, который лишь на 0,2 В положительнее потенциала металлического

лития. В качестве катодных материалов ЛИА применяются в основном литированные оксиды переходных металлов, такие как LiCoO_2 , LiNiO_2 , LiMn_2O_4 . Их применение обусловлено тем, что они имеют наиболее высокий (среди других литиевых соединений внедрения) положительный потенциал, обуславливающий высокое суммарное напряжение аккумулятора [39]. Характерные показатели современных ЛИА приведены в таблице 1.2 [38-41].

Таблица 1.2 – Основные характеристики литий-ионных аккумуляторов

Напряжение разряда	3,2 В ... 3,7 В
Ресурс	От 1000 до 10000 циклов
Удельная энергоёмкость	100 ... 160 Вт·ч/кг
Удельная мощность	200 ... 300 Вт/кг
Саморазряд	5% ... 10% в месяц
Рабочий диапазон температур	-20 ... +60 °С
Ток разряда	2 С ... 3 С
Нижний порог напряжения	2 В ... 2,5 В

По значениям своей удельной энергоёмкости и рабочего напряжения ЛИА превосходят все другие вторичные химические источники тока (ХИТ), однако уступают по некоторым иным параметрам. Так, никель-кадмиевые аккумуляторы значительно более работоспособны при отрицательных температурах, а никель-металлгидридные аккумуляторы допускают более быстрый заряд и разряд. В то же время, технические характеристики ЛИА совершенствуются по мере развития их массового выпуска. Удельные характеристики литий-ионных аккумуляторов по крайней мере вдвое превышают аналогичные показатели никель-кадмиевых и никель-железных аккумуляторов. Кроме того, ЛИА допускают высокие токи при заряде и разряде, достигающие 3С и более. Они имеют сравнительно низкий саморазряд, составляющий не более 10 % от номинальной энергоёмкости в месяц. Недостатком таких аккумуляторов является их высокая стоимость, обусловленная сложностью технологии и дороговизной оксида кобальта. Другими их недостатками являются малый жизненный цикл и невозможность глубокого разряда.

В последнее время нашли применение литий-полимерные, а также литий-

титанатные аккумуляторы. В них анодом служит углеродистый материал, в который обратимо внедряются ионы лития. В качестве активного материала для катодов используются оксиды ванадия, кобальта или марганца. В качестве электролита в литий-полимерных аккумуляторах обычно применяется раствор соли лития в неводных апротонных растворителях, заключенный либо в микропористую полимерную матрицу, либо в полимер, пластифицированный раствором соли лития в апротонном растворителе (гель-полимерный электролит). По сравнению с литий-ионными аккумуляторами, литий-полимерные имеют более высокие удельную энергию и ресурс, а также обеспечивают большую безопасность при нагреве и механических повреждениях [38].

Конденсаторы с двойным электрическим слоем. Конденсатором с двойным электрическим слоем (КДЭС), а также суперконденсатором или электрохимическим конденсатором называют устройство, накапливающее энергию в так называемом двойном электрическом слое. Двойной электрический слой образуется поверхностью электрода и соприкасающимися с ним ионами электролита и может рассматриваться как конденсатор с очень малым (порядка 10^{-8} м) расстоянием между обкладками, а, следовательно, высокой емкостью, достигающей 100 – 500 Ф на 1 г веса электродов при напряжении 0,7 – 3 В, или около 20 мкФ/см² в водных растворах [42]. Как правило, элемент имеет два электрода равной ёмкости, помещенных в электролит. В результате они могут быть представлены соединенными последовательно через некоторое сопротивление, а общая емкость элемента считается равной половине емкости одиночного электрода. Существуют и несимметричные суперконденсаторы с электродами различной емкости. При этом общая емкость элемента приближается к емкости одного из электродов [43].

Во время заряда электроны переносятся от положительного электрода к отрицательному за счет внешнего источника тока, а ионы из объема электролита перемещаются к электродам. Во время разряда КДЭС электроны движутся к положительному через нагрузку и ионы возвращаются с поверхности в объем электролита. При циклировании изменяются одновременно плотность заряда на

границе раздела и концентрация электролита [42].

Разновидностями конденсаторов двойного электрического слоя являются псевдоконденсаторы и гибридные конденсаторы. Псевдоконденсаторы содержат два твердых электрода, которые могут быть одинаковыми. Их принцип действия использует одновременно два механизма запасания энергии: электростатическое взаимодействие, как в КДЭС, и окислительно-восстановительные реакции в основном в приповерхностных слоях электрода, схожие с процессами, положенными в основу работы аккумуляторов и батарей. Таким образом, емкость двойного электрического слоя псевдоконденсатора обуславливается не только электростатическими процессами, но и быстрыми фарадеевскими реакциями с переносом заряда, в результате чего значительно возрастает его емкость.

Особенностью псевдоконденсатора является отсутствие суммарного ионного обмена между электродом и электролитом. Иначе говоря, для псевдоконденсатора концентрация электролита остается постоянной во время процессов как заряда, так и разряда. Как правило, количество ионов, участвующих в процессе образования двойного электрического слоя (ДЭС), значительно меньше количества протонов, обменивающихся между двумя электродами. В результате, одна и та же система может иметь псевдоемкость, значительно превосходящую емкость двойного электрического слоя [42].

Гибридные конденсаторы представляют собой переходный вариант между аккумулятором и конденсатором. Наименование «гибридный» (либо «асимметричный») обусловлено тем, что, в отличие от симметричных систем, электроды в гибридных конденсаторах выполнены из разных материалов и накопление заряда на них протекает по разным механизмам. Как правило, катодом в гибридных конденсаторах выступает материал с псевдоемкостью, то есть аккумулялирование заряда на катоде происходит вследствие протекания окислительно-восстановительных реакций, что, помимо повышения удельной емкости конденсатора, расширяет и область его рабочих напряжений. В лучших моделях гибридных конденсаторов рабочий диапазон потенциалов для катода составляет от 1,5 до 4,5 В относительно Li / Li^+ - электрода, то есть значительно

превосходит рабочий диапазон обычных КДЭС, составляющий от 0,8 до 2,7 В относительно того же электрода. Плотность энергии гибридных конденсаторов также может быть значительно большей. В гибридных конденсаторах также часто используют комбинацию электродов из смешанных оксидов или допированных проводящих полимеров. Перспективными могут быть композиционные материалы, состоящие из оксидов металлов, осажденных на углеродные носители либо проводящие полимеры [42].

Выпускаемые сегодня серийные образцы суперконденсаторов имеют напряжение 1,3 – 5 В, удельную запасаемую энергию 1 – 10 Вт·ч/кг, удельную мощность до 1000 Вт/кг. Характеристики некоторых образцов конденсаторов по данным производителей [44-54] приведены в приложении А. По сравнению с литий-ионными аккумуляторами конденсаторы двойного электрического слоя обладают значительно более высокой удельной мощностью и допускают большое число циклов заряда-разряда. Основным недостатком суперконденсаторов является сравнительно низкая удельная энергоемкость.

1.4 Комбинированные энергетические установки транспортных средств

Виды комбинированных энергетических установок. Комбинированной энергетической установкой (КЭУ) называют установку, сочетающую несколько источников энергии [4]. В современной зарубежной литературе для обозначения ТС с КЭУ широкое применение находит термин hybrid electric vehicle (HEV, гибридное транспортное средство, ГТС) [55-62]. В тексте работы термины «комбинированный» и «гибридный» в отношении энергетических установок, транспортных средств и их тяговых приводов используются как синонимы.

Основной проблемой, отличающей проектирование ГТС от обычных автомобилей и контактного ЭПС, является управление передачей энергии от источников к потребителям с минимальными потерями, которые, в свою очередь, зависят от цикла движения ТС. По сравнению с традиционными автомобилями, ГТС отличаются наличием тягового электрооборудования. Все они могут быть

разделены на три вида: последовательные, параллельные и смешанные [55].

Последовательные гибридные транспортные средства. В конструкцию последовательных ГТС могут входить ДВС, генератор, аккумуляторные батареи, выпрямитель, тяговый преобразователь и тяговые электродвигатели, как это показано на рисунке 1.2. В некоторых источниках приводится схема с одним типом накопителей энергии. В последовательных ГТС отсутствует механическая связь между ДВС и колесами [56-63].

ДВС может быть выключен, когда в городском цикле ТС движется за счет энергии, запасенной в накопителях. При последовательной схеме существенная доля энергии может быть возвращена за счет рекуперативного торможения. КДЭС могут быть добавлены в систему в целях увеличения срока службы аккумуляторной батареи и сокращения потерь энергии. ДВС включается при нехватке запаса энергии батареи. Если требуемая для питания ТЭД мощность меньше развиваемой генератором, избыток мощности идет на заряд аккумуляторной батареи и КДЭС. Если требуемая ТЭД мощность возрастает, недостающая часть отдается накопителями.

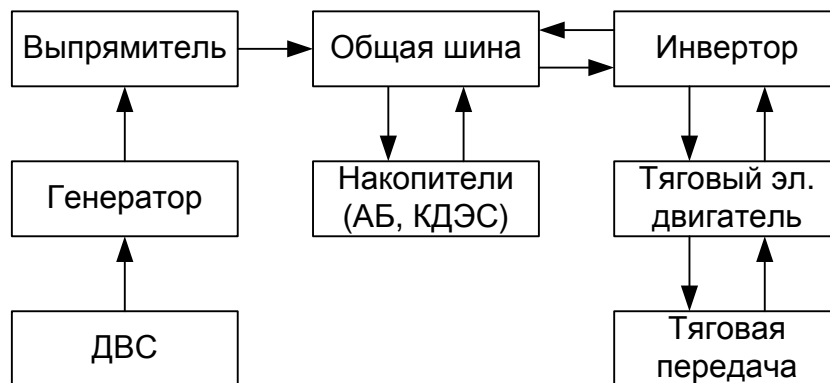


Рисунок 1.2 – Потоки энергии в последовательном ГТС

Таким образом, ДВС постоянно работает с частотой вращения, обеспечивающей наибольший КПД и наименьший объем выбросов в атмосферу. В результате по этим показателям последовательный гибрид превосходит другие схемы. Эта схема нашла распространение на большегрузном транспорте, военной технике и автобусах [64]. Примерами её являются автобусы TEMSA Avenue Hybrid, Mercedes Citaro и MAN Lion's City Hybrid.

Преимуществами последовательной схемы по сравнению с другими являются наибольший КПД выработки энергии, удобная в производстве и ремонте модульная конструкция, долговечность, меньшая мощность первичного источника, большая свобода компоновки ТС, возможность работы с выключенным двигателем, возможность реализации высоких ускорений. Её недостатки – сравнительно высокие массогабаритные показатели, большое число преобразований энергии и большое количество агрегатов [55].

Параллельные гибридные транспортные средства. В параллельных гибридах и ДВС, и ТЭД параллельно соединены с механической передачей, как показано на рисунке 1.3. Существуют различные стратегии управления такими транспортными средствами. В наиболее распространенном случае ДВС практически всегда включен и отдает постоянную мощность, работая в оптимальном режиме.

Если требуемая мощность выше, чем отдаваемая ДВС, дополнительно включается ТЭД. В обратной ситуации ТЭД переводится в генераторный режим, и часть мощности ДВС идет на заряд накопителей энергии. Также возможен заряд накопителя при электрическом торможении [55].

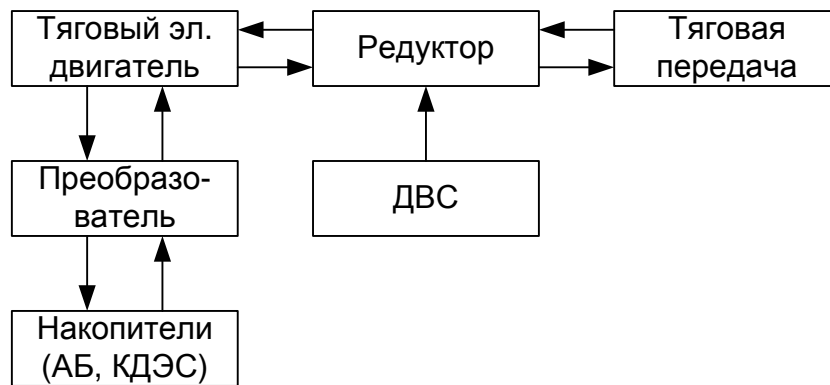


Рисунок 1.3 – Потоки энергии в параллельном ГТС

Параллельная схема также имеет возможность работы с выключенным ДВС и возможность торможения двигателем. Её недостатками являются сложность устройства и высокая стоимость, а также ограничения по возможной компоновке транспортных средств. Кроме того, при параллельной схеме ТЭД имеет меньшую мощность, что, хотя и снижает его массу, приводит к

недоиспользованию энергии рекуперации. Сравнение последовательной и параллельной схем представлено в таблице 1.3.

Смешанные гибридные транспортные средства. Комбинация последовательной и параллельной схем находит широкое применение в легковых гибридных автомобилях [65]. Устройство смешанного, или комбинированного гибридного привода показано на рисунке 1.4.

Таблица 1.3 – Сравнение последовательной и параллельной гибридных схем

Тип схемы	Напряжение, V	Характерная мощность электродвигателя, kW	Доля мощности электродвигателя, %	Экономия топлива от наибольшей возможной, %
Параллельная	14 – 300	3 – 40	5 – 20	5 – 40
Последовательная	200 – 900	Свыше 50	100	>75

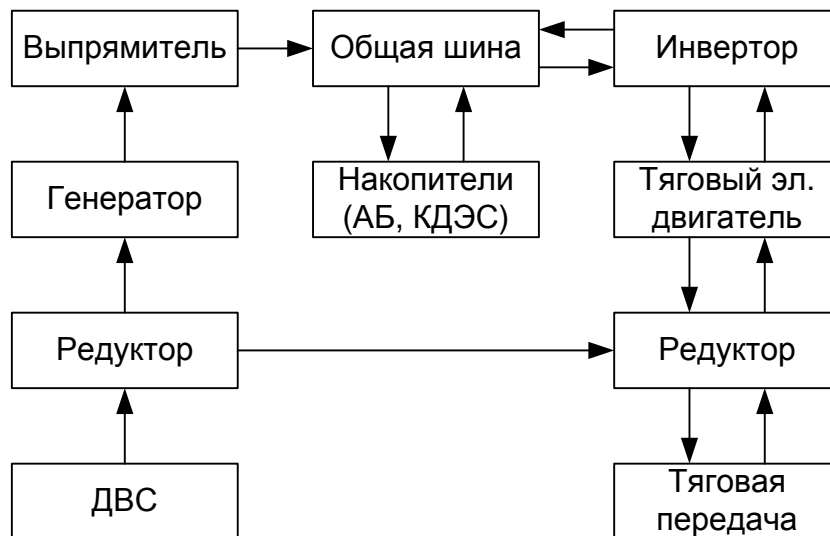


Рисунок 1.4 – Поток энергии в комбинированном ГТС

Смешанная схема ГТС имеет особенности как последовательной, так и параллельной. В ней используется две электрические машины, соединенные между собой и с ДВС при помощи планетарной передачи. Планетарная передача позволяет изменить скорость ДВС, воздействуя на частоту вращения генератора. ТЭД жестко соединен с выходным валом передачи и может быть использован в

случае нехватки мощности ДВС. Поскольку генератор позволяет управлять моментом ДВС, последний оказывается способен работать в наиболее экономном режиме для каждой скорости вращения. Кроме того, отсутствие переключения передач делает разгон более плавным, чем в случае с параллельным гибридом, хотя постоянство тягового момента лучше обеспечивается в последовательной схеме [66]. По своим преимуществам и недостаткам смешанная схема близка к параллельной и в некоторых случаях рассматривается как её разновидность.

Сочетание источников энергии в гибридных энергоустановках.

Системы управления энергией позволяют реализовать принятую стратегию управления потоками энергии в тяговом приводе. Поскольку большинство источников энергии работают на постоянном токе, для связи между ними используются шины постоянного тока. Для связи их с шиной в общем случае необходимы двусторонние преобразователи постоянно-постоянного тока. При выборе источников возникает необходимость согласования их мощности с мощностью потребителей энергии. Различная мощность преобразователей затрудняет унификацию их элементов [67].

На основании работ [68-74] можно выделить пять наиболее часто применяемых видов гибридных систем хранения и преобразования энергии и соответствующих им схем соединения преобразователей, показанных на рисунке 1.5 [75]. Далее схемы описываются на примере двух источников, аккумулятора и КДЭС в системе с одним тяговым двигателем (обозначенным на рисунке как М). Системы, использующие в качестве первичного источника энергии ДВС с генератором вместо ЛИА, отличаются возможностью регулирования выходного напряжения генератора.

Наиболее простой, но и наименее экономичной является так называемая пассивная параллельная схема соединения двух источников (рисунок 1.5, а). На рисунке 1.5, а оба источника всегда имеют одинаковое напряжение. Это ограничивает отдаваемую конденсатором энергию и не позволяет полностью использовать его возможности.

В схемах, показанных на рисунке 1.5, б, один из источников соединен с

шиной посредством преобразователя постоянно-постоянного тока. В этом случае КПД будет выше в случае размещения преобразователя перед конденсатором, так как колебания напряжения у аккумуляторной батареи меньше. В то же время, оно требует преобразователя большей мощности, а, следовательно, больших веса и стоимости установки, но позволяет минимизировать характеристики КДЭС.

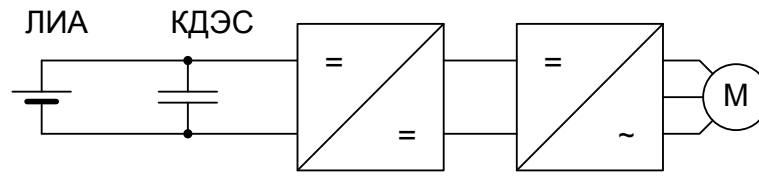
На рисунке 1.5, в преобразователи позволяют независимо использовать мощность источников. Первый преобразователь задает ток батареи, а второй добавляет необходимую мощность от конденсатора. Переход к параллельному соединению источников (рисунок 1.5, г) дает большую гибкость, стабильность работы и более высокий КПД. В этом случае также обеспечивается больший срок службы батареи вследствие меньших бросков тока.

Увеличение количества преобразователей повышает вес транспортного средства. В работах [76, 77] предложено использование схемы с трансформаторной развязкой (рисунок 1.5, д). Она обладает высоким КПД, надежна и долговечна, но увеличивает общий вес преобразователя.

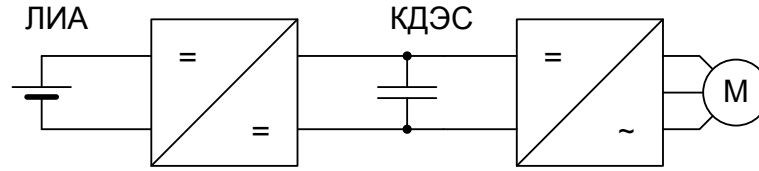
Системы управления гибридными энергоустановками. Одной из важнейших задач проектирования ГТС является обеспечение наибольшей экономии энергии при наименьшей стоимости оборудования. Для определения расхода энергии обычно используются стандартные испытательные циклы. Ниже приводится обзор принципов управления и сравнение их качества. Главными требованиями к стратегиям управления гибридным тяговым приводом являются [78]:

- наибольшая экономия топлива;
- наименьший объем выбросов;
- наименьшая стоимость системы;
- реализация заданных динамических характеристик ТС.

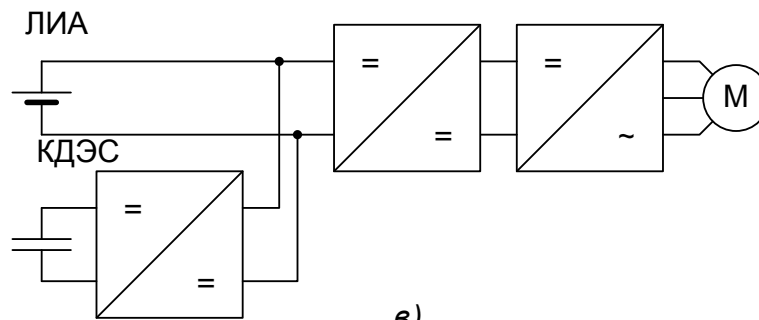
Для их достижения принципы управления должны выбираться совместно с конструкцией привода на этапе проектирования [79]. При выборе стратегии управления необходимо учитывать различный характер производства и потребления энергии отдельными элементами системы.



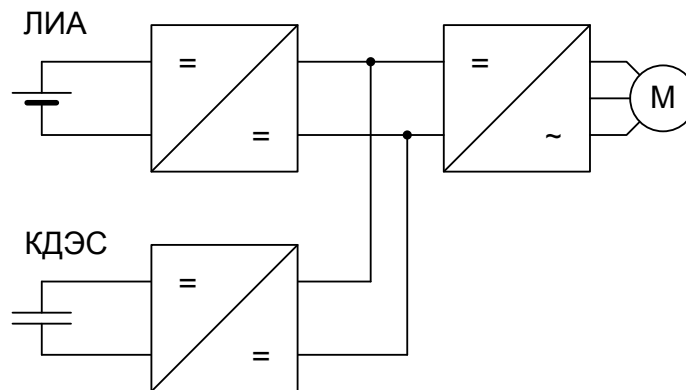
а)



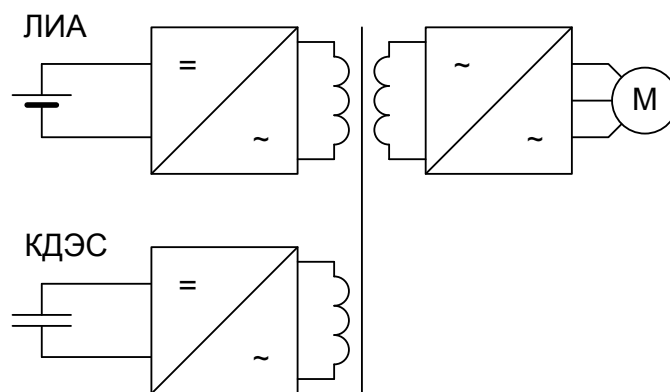
б)



в)



г)



д)

Рисунок 1.5 – Варианты функциональных схем систем управления потоками энергии в гибридной энергетической установке

Тяговые двигатели ГТС подключаются к аккумуляторным батареям через тяговые преобразователи. Батареи, в свою очередь, могут быть заряжены от ДВС либо при электрическом торможении. Скорость передвижения ГТС при питании от аккумуляторных батарей, как правило, бывает значительно ограничена их мощностью. Повышение мощности АБ либо применение суперконденсатора позволяет достичь большей экономии топлива. В то же время, повышение энергоемкости батареи может привести к необходимости её дополнительного заряда от внешнего источника.

При запуске ГТС его ДВС прогревается, а при необходимости может также выполняться и заряд аккумуляторной батареи. При движении ТС в режиме тяги ТЭД питается как от связанного с ДВС генератора, так и от накопителя энергии. Накопитель энергии может быть заряжен как энергией, вырабатываемой в режиме торможения, так и энергией, произведенной ДВС во время снижения энергопотребления тяговым приводом. При полностью заряженном накопителе ДВС отключается автоматически, что обеспечивает дополнительную экономию энергии. При этом вспомогательное оборудование ТС продолжает получать питание от накопителя энергии [54]. Стратегию управления в общей системе управления гибридным приводом реализует контроллер силовых цепей. Все стратегии управления энергией могут быть разделены на две большие группы: основанные на правилах и оптимизационные [80].

Стратегии, использующие правила. Основная проблема, решаемая при разработке таких стратегий – повышение эффективности гибридного привода. Правила могут быть выбраны на основании эвристических методов, опыта разработчиков или математических моделей и, часто, без точного знания ожидаемого цикла движения. Все подобные стратегии могут быть разделены на полностью детерминированные методы и методы, использующие нечеткую логику. Основной принцип создания таких стратегий обычно основывается на концепции уровней загрузки [81]. Он заключается в поддержании режима работы ДВС по возможности ближе к заданному значению в течение всего времени работы ГТС. Рабочая точка может смещаться в зависимости от того, является

приоритетом повышение динамики ТС либо экономия топлива. В случае слабой степени гибридизации КПД электрической части гибридного привода будет слабо влиять на общий КПД энергоустановки.

Методы нечеткой логики. При рассмотрении тягового привода как сложной и изменяющей свои свойства во времени системы к управлению им возможно применить методы нечеткой логики. Они позволяют подбирать близкий к оптимальному алгоритм работы привода в режиме реального времени. Иначе говоря, такие методы являются развитием жестко заданных стратегий. Основными преимуществами методов нечеткой логики являются устойчивость к возмущениям, ошибкам измерений и изменениям состояния элементов привода, и в то же время адаптивность, возможность перестройки правил [80].

Методы с жестко детерминированными правилами. В этих методах распределение мощности между источниками осуществляется по жестко заданным правилам, обычно представляемым в виде таблиц, выделяющих области наиболее эффективных сочетаний [80]. К этим методам относятся системы с релейной стратегией управления [81], а также способы, следящие за средней мощностью привода [82-84].

Оптимизационные методы управления. Оптимизационные стратегии максимизируют КПД тягового привода, или, иначе говоря, минимизируют величину потерь [85]. Они опираются на заранее вычисленные значения расхода топлива либо атмосферных выбросов при различных моментах и скоростях вращения ДВС, что особенно важно для ГТС параллельной схемы. Если цикл движения ТС жестко определен, оптимальная стратегия может быть найдена заранее. Практически же поиск оптимального решения требует предсказания цикла движения транспортного средства. Таким образом, нахождение оптимальных решений в режиме реального времени невозможно, но найденные заранее на основании известных циклов решения могут быть использованы для выработки правил и оценки качества других стратегий [86].

Методы глобальной оптимизации. Алгоритм глобальной оптимизации, основанный на принципе оптимальности Беллмана, был применен на ТС с

топливными элементами. Критерием оптимизации является снижение суммарной величины потерь за цикл движения [86]. Существует несколько решений по достижению целевых показателей оптимизации [80]. Для выработки стратегии было предложено использование методов линейного и динамического программирования, стохастических динамических программ, теории игр, генетических алгоритмов [87-92].

Оптимизация в реальном времени. Методы глобальной оптимизации неприменимы в режиме реального времени. Для поиска оптимальных решений в этом случае критерий оптимизации, помимо расхода топлива, должен учитывать запас энергии накопителей [80]. Различные методы оптимизации в реальном времени описаны в [93-97].

1.5 Выводы

1. 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.

2. Показано, что одним из основных путей повышения его энергетической эффективности является применение буферных накопителей энергии, способных принять энергию электрических торможений.

3. На основании обзора установлено, что среди транспортных средств с накопителями энергии наиболее перспективными являются транспортные средства с комбинированными (гибридными) энергетическими установками, в первую очередь, сочетающие тепловой двигатель с конденсаторным накопителем энергии.

2 РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМБИНИРОВАННОГО ТЯГОВОГО ПРИВОДА

2.1 Выбор схемы комбинированного привода

Энергетические установки (ЭУ) гибридного транспортного средства (ГТС) включают тяговый электрический двигатель, тепловой двигатель (как правило, ДВС), генератор для выработки электрической энергии (Г) и накопители энергии. В настоящее время наибольшее распространение среди накопителей энергии получили конденсаторы двойного электрического слоя (КДЭС) и электрохимические накопители энергии (ЭХН). В общем случае ГТС может иметь в своем составе оба типа НЭ.

По способу передачи энергии между элементами ЭУ для городского автобуса целесообразно принять последовательную гибридную схему. Она наиболее эффективна при работе в режиме частых пусков, торможений и стоянок, движении в низком диапазоне скоростей, что соответствует перемещению ТС в городском цикле [23] и используется в ряде конструкций подвижного состава городского транспорта. Подробный анализ возможных схем был дан в главе 1.

При последовательной гибридной схеме ДВС вращает генератор, вырабатываемая им электроэнергия поступает в блоки накопителей энергии (НЭ), которые в свою очередь питают ЭД, приводящий в движение исполнительный механизм (ведущие колеса) через механическую передачу (МП). Недостатком этой схемы является некоторое снижение КПД при передаче энергии от ДВС к колесам по сравнению с параллельным или смешанным видами гибридов, однако он компенсируется удобством управления потоками энергии и простотой её повторного использования при частых торможениях. Более полное использование энергии электрического торможения позволяет преодолеть этот недостаток и повышает общий КПД системы.

Заданные динамические характеристики транспортного средства определяют мощностные показатели ТС с комбинированной энергоустановкой.

Таким образом, расчет динамических показателей движения ТС и необходимой мощности ДВС и ТЭД является важным практическим вопросом. Для возможности применения результатов расчета к различным ТС далее используются удельные величины, приведенные к массе ГТС. Мощность генератора может быть определена исходя из среднего потребления энергии тяговым приводом. В режиме пиковых нагрузок (пуск и торможение) основная часть подводимой к ЭД мощности отдается либо принимается буферным накопительным блоком, поэтому он должен рассчитываться с учетом максимальных скоростей и ускорений пуска и электрического торможения, определяющих предельные нагрузки. Таким образом, буферный накопитель энергии (БНЭ) должен иметь высокие мощностные показатели, и в его конструкции рационально применять КДЭС. ЭХН более эффективен в режимах равномерного энергопотребления, применение же его при создании гибридных приводов последовательной схемы нецелесообразно. Тогда упрощенная схема распределения потоков энергии примет вид, показанный на рисунке 2.2. Отказ от применения ЭХН является допустимым при условии, что мощность генератора позволяет поддерживать движение с установившейся максимально допустимой скоростью и обеспечивает работу ЭУ в цикле разгона и торможения без уменьшения среднего запаса энергии конденсаторного НЭ.

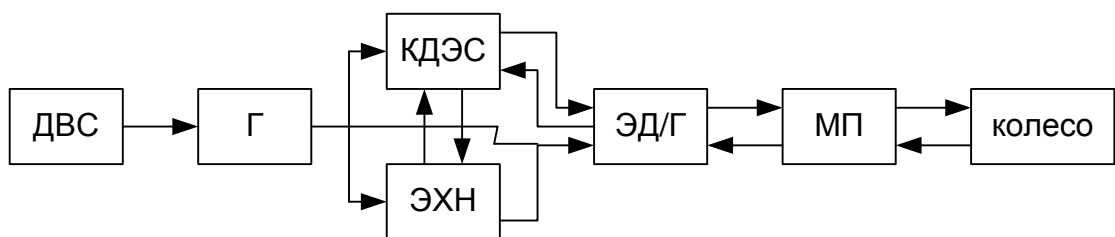


Рисунок 2.1 – Обобщенный вариант последовательной гибридной схемы

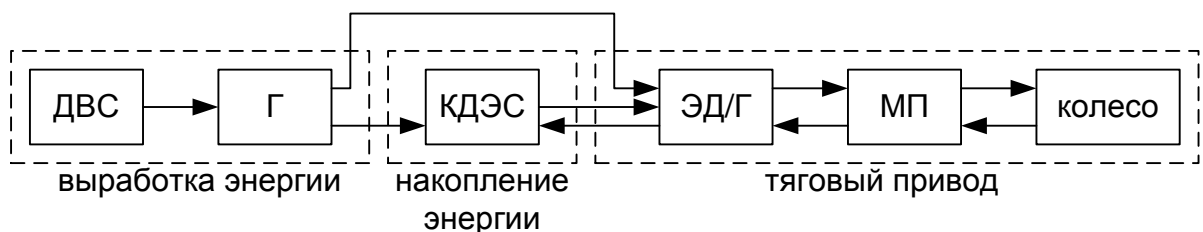


Рисунок 2.2 – Схема распределения потоков мощности в последовательной энергетической установке гибридного ТС

С учетом принятых допущений энергетическая установка, питающая тяговый привод, может быть разделена на два основных функциональных блока:

- первичный источник электрической энергии (ДВС + Г);
- буферно-накопительный блок (КДЭС).

Определение параметров энергетической установки для выбранной схемы гибридного транспортного средства означает согласование мощности ДВС и электрического двигателя тягового привода, а также выбор необходимых мощности и энергоемкости конденсаторного накопителя.

2.2 Моделирование тягового привода

При проектировании ТС с комбинированной энергоустановкой для выбора основных параметров его электропривода необходимо знать динамические характеристики ТС при заданных свойствах привода. Для этого необходимо многократное повторение тяговых расчетов при разных значениях мощности тягового электродвигателя (ТЭД) и первичного источника энергии.

Кроме того, существенным является вопрос о потерях энергии для ТС последовательной схемы. Важно убедиться, что в их энергоустановке возможно достичь достаточно высокого общего КПД.

Эти задачи решаются моделированием тягового электропривода. В процессе преобразования вырабатываемой первичным генератором энергии можно выделить следующие виды потерь, учитываемые в модели:

- потери энергии на внутреннем сопротивлении конденсаторного накопителя, происходящие как при его заряде, так и при его разряде;
- потери энергии в тяговом преобразователе и ТЭД;
- потери энергии на преодоление сопротивления движению ТС, связанные с трением в механической передаче, осях, колесах, а также с аэродинамическим сопротивлением кузова.

Величина потерь зависит от скорости движения транспортного средства, уровня напряжения буферного накопителя, потребляемой либо вырабатываемой

электроприводом мощности. Для заданных условий аналитически может быть вычислена мгновенная мощность потерь, определение же общей величины полезной и затраченной энергии требует применения методов численного интегрирования.

Для вычисления энергетических показателей заданного режима движения создана модель тягового электропривода в среде Simulink. Общий вид модели показан на рисунках 2.3 и 2.4.

Модель позволяет определить токи заряда и разряда конденсаторного буферного накопителя и учесть потери энергии на его внутреннем сопротивлении. Для этого источник представлен схемой замещения, состоящей из последовательно соединенных резистора и конденсатора, к которому параллельно подключены генератор и тяговый преобразователь. Генератор моделируется как источник напряжения, также обладающий собственным внутренним сопротивлением. В модели предусмотрена обратная связь, задающая напряжение источника таким образом, чтобы отдаваемая им мощность, оставалась постоянной. При перезаряде накопителя предусмотрено отключение источника.

Схема замещения тягового преобразователя, примененная в модели, представляет собой источник тока. Ток источника выбирается таким образом, чтобы потребляемая либо отдаваемая им мощность была равна мощности, потребляемой либо отдаваемой тяговым приводом с учетом постоянного коэффициента полезного действия, учитывающего электрические потери в преобразователе и тяговом двигателе. Механическая мощность двигателя определяется подсистемой, выполняющей тяговый расчет для заданной длительности нахождения ТС в каждом из режимов.

Тяговая и тормозная характеристики транспортного средства с импульсным регулированием тягового двигателя упрощенно представлены состоящими из двух частей: при малых скоростях движения реализуется режим постоянства ускорения, при высоких скоростях – постоянства мощности привода. В модели выбирается тот режим, в котором реализуемая приводом сила тяги минимальна.

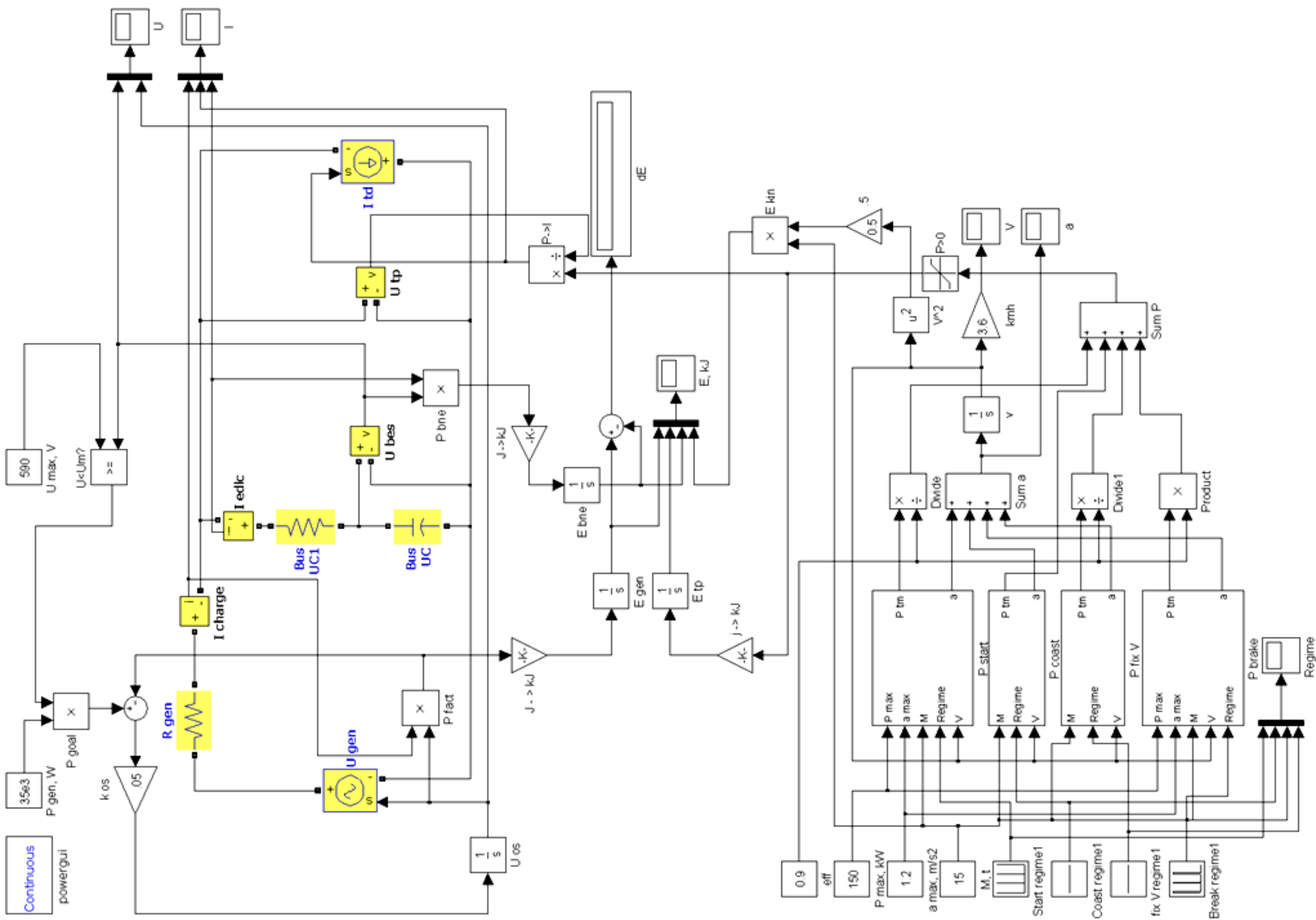


Рисунок 2.3 – Модель комбинированного тягового привода

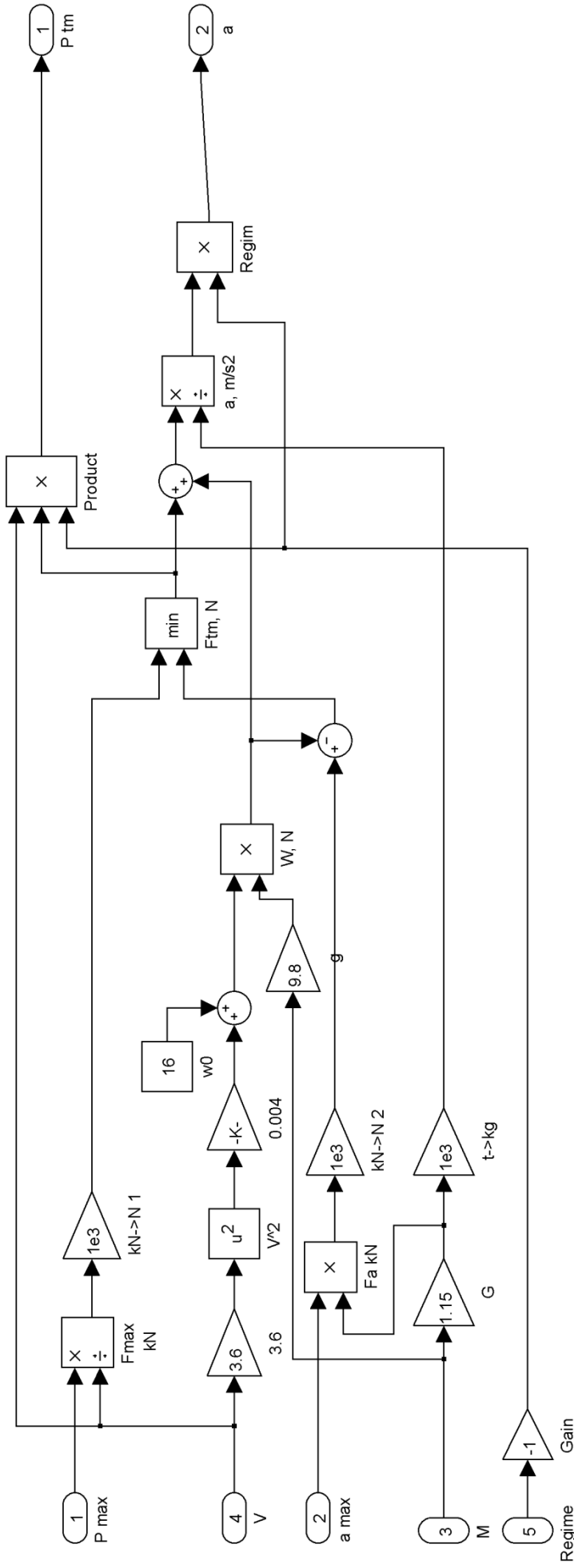


Рисунок 2.4 – Подсистема вычисления мощности и ускорения транспортного средства при движении в режиме тяги

Подсистема расчета ускорения и механической мощности тягового привода для режима тяги показана на рисунке 2.4. В подсистеме мощность на валу тягового двигателя вычисляется двумя способами: из ограничения по максимальной мощности P_{\max} и ограничения по ускорению P_a

$$P_a = ((1 + \gamma)ma + w(V)mg)V, \text{ кВт}, \quad (2.1)$$

где γ – коэффициент инерции вращающихся частей,

m – полная масса ТС,

a – ограничение по максимальному ускорению ТС,

w – удельное сопротивление движению ТС,

V – скорость движения ТС,

g – ускорение свободного падения.

Из двух величин мощности выбирается наименьшая, как удовлетворяющая обоим ограничениям. Также вычисляется ускорение ТС, что необходимо для получения зависимости $V(t)$:

$$a = \frac{\min(P_a, P_{\max})}{(1 + \gamma)mV} - \frac{w(V)g}{1 + \gamma}, \text{ м/с}^2. \quad (2.2)$$

Цикл движения ТС определяется временами нахождения его в режимах тяги, поддержания постоянства скорости движения, выбега или торможения.

Для ТС полной массой 15 т с двигателем мощностью 150 кВт были исследованы цикл движения по перегону, состоящий из разгона до 55 км/ч, выбега и торможения, а также из разгона до 20 км/ч и следующего непосредственно за ним торможения. Первый вариант характерен для движения ТС в свободных условиях, второй – при маневрировании в заторе. Ограничения по ускорению и замедлению выбирались 1,2 и 0,8 м/с² для каждого из случаев, поскольку на практике разгон ТС часто осуществляется с уменьшенным ускорением. Моделирование выполнено для полной емкости накопителя энергии 3,6 и 10,8 МДж (20 и 60 Ф при номинальном напряжении 600 В). Поскольку минимальное напряжение накопителя ограничено, полезная его энергоемкость ниже полной примерно на 25 %. Внутреннее сопротивление модулей принято 0,039 Ом и 0,013 Ом соответственно, что соответствует характеристикам

производимых в настоящее время конденсаторов (см. Приложение А). Принято, что накопитель энергии собран из элементов емкостью 3 кФ, номинальным напряжением 2,7 В и внутренним сопротивлением 300 мкОм. В этом случае для достижения емкости 60 Ф при номинальном напряжении 600 В необходимо иметь 5 параллельных ветвей по 222 элемента в каждой.

Предварительно оценить КПД накопителя энергии можно по его току и внутреннему сопротивлению как отношение мощности потерь к отдаваемой (принимаемой) мощности на клеммах конденсатора:

$$\eta = \frac{IR_{6н}}{zU}, \quad (2.3)$$

где I – ток блока конденсаторов,

z – количество параллельных ветвей в блоке,

$R_{6н}$ – внутреннее сопротивление элемента,

U – напряжение элемента.

Так, для описанного выше накопителя КПД будет находиться в пределах 0,83 – 0,97 в зависимости от типа элементов и их напряжения.

На рисунках 2.5, 2.6 показаны кривые движения ТС и пример зависимостей энергии, потребленной и возвращенной тяговым приводом, от времени. Для каждого из случаев определена величина энергии, потребленной из накопителя и возвращенной тяговым приводом в накопитель, их отношение, а также средняя мощность цикла с учетом поступления энергии от генератора. Результаты обобщены в таблице 2.1.

Предложенная модель не учитывает снижение ускорения и необходимость замещения рекуперативного торможения реостатным при малых скоростях. В то же время, эти недостатки слабо влияют на общее потребление энергии. Так, кинетическая энергия ТС при скорости 5 км/ч составляет

$$E = \frac{(1 + \gamma)m \left(\frac{V}{3,6} \right)^2}{2} = 16,6 \text{ кДж}, \quad (2.4)$$

что значительно меньше энергии, возвращаемой в области высоких скоростей.

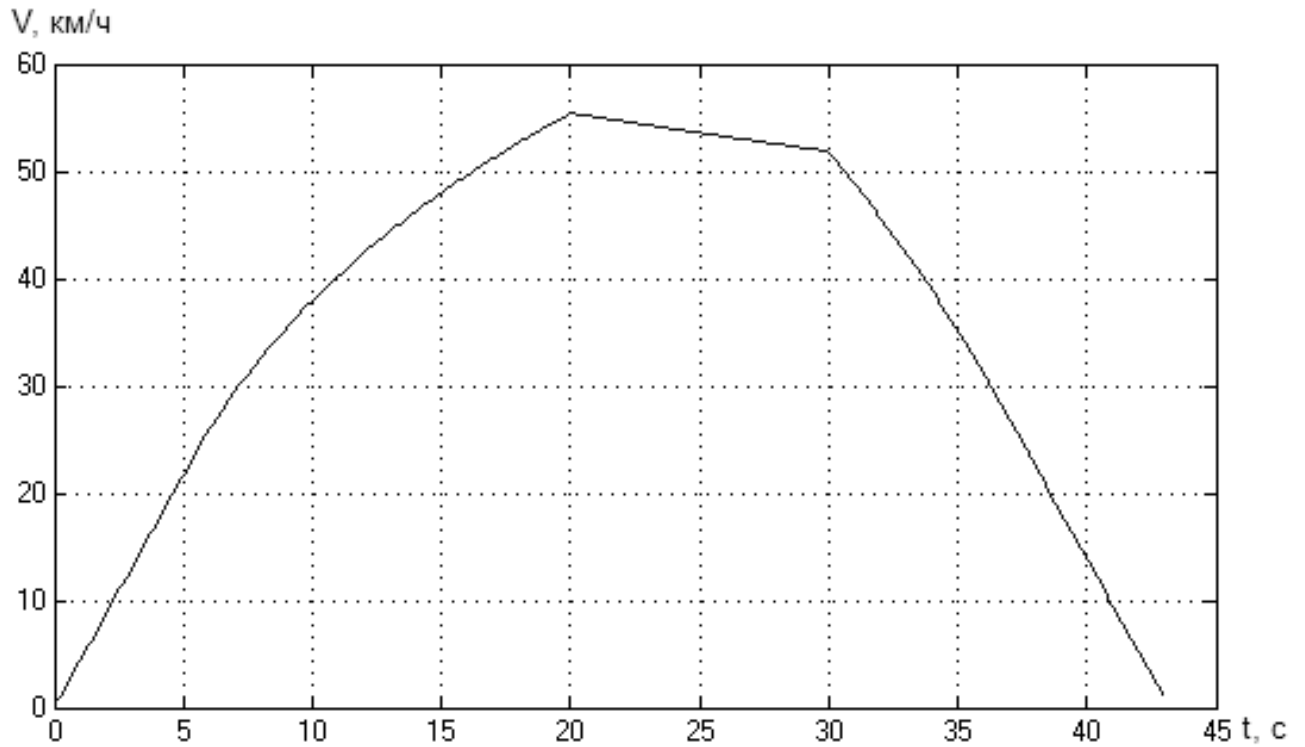


Рисунок 2.5 – Зависимость скорости движения ТС от времени

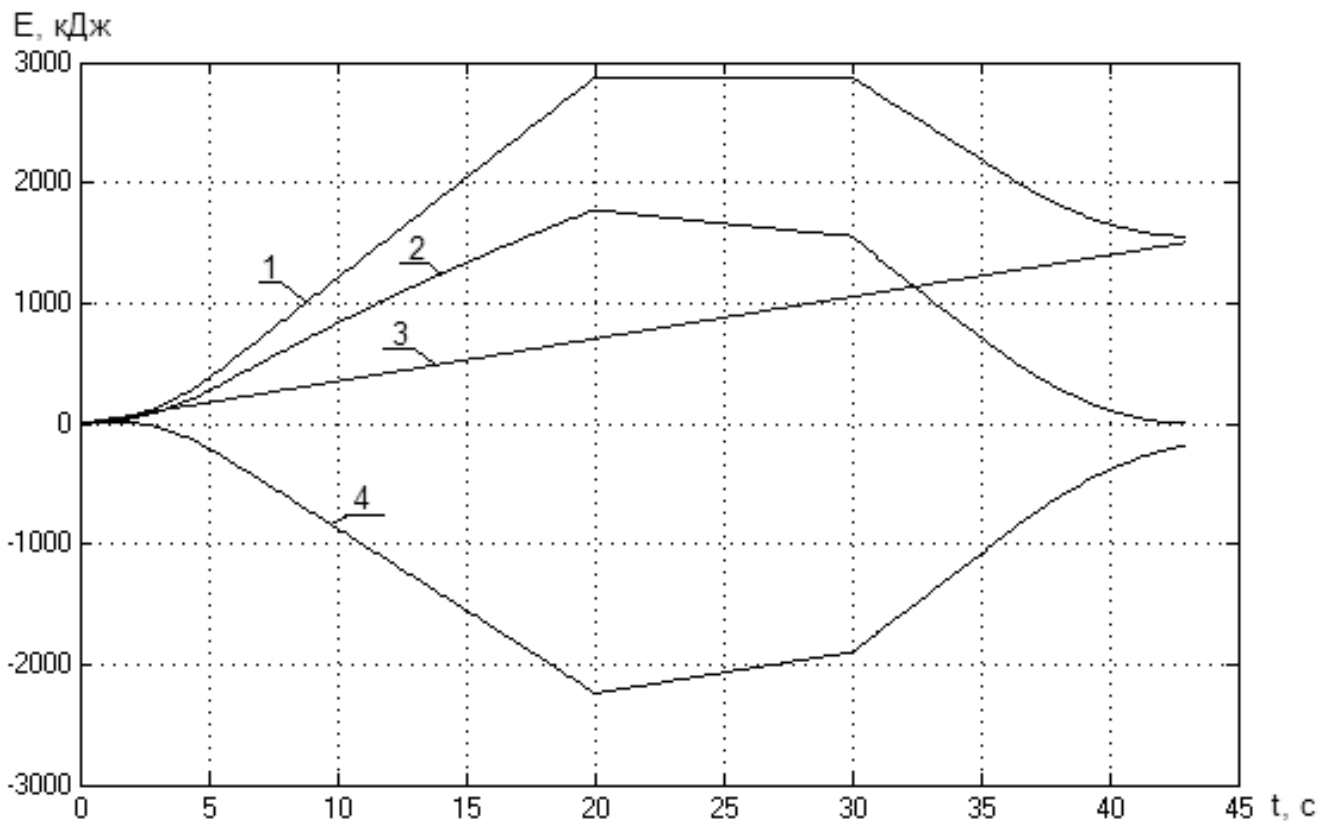


Рисунок 2.6 – Зависимости энергии, потребленной и возвращенной тяговым приводом, от времени: 1 – энергия, принятая от НЭ, 2 – разность энергий ПИЭ и НЭ, 3 – энергия, принятая от ПИЭ, 4 – энергия, перешедшая в кинетическую энергию транспортного средства

Таблица 2.1 – Результаты моделирования потребления энергии

Максимальная скорость в цикле, км/ч	a , м/с ²	Емкость НЭ, Ф	Расход энергии без рекуперации, кДж	Расход энергии с рекуперацией, кДж	Длительность цикла, с	Средняя мощность цикла, кВт	Возвращаемая часть энергии
60	1,2	60	2887	1582	43	67,1	0,45
60	1,2	20	2952	1685	43	68,7	0,43
60	0,8	60	3200	1888	53	60,4	0,41
60	0,8	20	3275	2002	53	61,8	0,39
20	1,2	60	378	134	10	37,8	0,65
20	1,2	20	380	138	10	38,0	0,64
20	0,8	60	394	166	15	26,3	0,58
20	0,8	20	395	169	15	26,3	0,57

2.3 Определение мощности тягового двигателя

При проектировании комбинированных энергетических установок необходимо решить вопрос выбора их основных параметров. К ним относятся мощность тягового электродвигателя, вид и мощность первичного источника энергии, мощность и энергоемкость накопителя. Перечисленные величины определяют как массогабаритные, так и экономические характеристики создаваемой энергоустановки.

Тяговый электрический двигатель должен обеспечивать требуемую динамику транспортного средства. Его мощность должна быть достаточной для преодоления сил сопротивления движению и обеспечения заданных ускорений. Таким образом, определение мощности требует задания зависимости скорости или ускорения ТС от времени при разгоне. При равных временах разгона зависимость ускорения от времени может быть различной. Для достижения минимальной мощности, a , следовательно, веса и стоимости тягового двигателя желательна реализация полной мощности в течение всего периода разгона. В этом случае ускорение автомобиля было бы почти (без учета сопротивления

движению) обратно пропорционально его скорости. Но требования обеспечения комфорта пассажиров и надежности работы тяговой передачи накладывают ограничения как по максимально допустимой величине ускорения, так и по скорости нарастания ускорения 3 м/с^3 при начальном ускорении $0,5 \text{ м/с}^2$.

При проектировании гибридного автобуса либо троллейбуса по условиям комфорта стоящих пассажиров ограничивается величина пускового ускорения $a_{\text{п}} = 1,5 \text{ м/с}^2$, а скорость нарастания ускорения принимается равной $1,5 \text{ м/с}^3$ [98]. При проектировании ТС с импульсным регулированием целесообразно по возможности повысить пусковую скорость, сократив тем самым время разгона, что требует повышения мощности тяговых двигателей по сравнению с применяемыми на троллейбусах с реостатным регулированием [99]. Например, удельная мощность троллейбуса ЗиУ-682Г с тяговым двигателем ДК-213 при полной загрузке составляет $6,4 \text{ кВт/т}$. При пусковом ускорении $1,3 \text{ м/с}^2$ он имеет $V_{\text{п}} = 20 \text{ км/ч}$ [100].

При заданных ограничениях разгон ТС в общем случае будет состоять из трех этапов: увеличение ускорения до максимального, разгон с постоянным ускорением до так называемой пусковой скорости $V_{\text{п}}$ и разгон с постоянной (максимальной) мощностью.

Численным расчетом найдены минимально необходимые для обеспечения заданного времени разгона удельные (выраженные в кВт/т) мощности двигателей. Результаты расчета показаны в таблице 2.2, а соответствующие им режимы движения – на рисунках 2.7, 2.8.

Таблица 2.2 – Связь мощности тягового электродвигателя и динамических характеристик гибридного автобуса при $a_{\text{п}} = 1,5 \text{ м/с}^2$

Р, кВт/т	6	8	10	12	14	16	18	20
t разгона, с	49,1	30,9	23,4	19,3	16,75	15,1	13,95	13,15
$V_{\text{п}}$, км/ч	11,7	15,8	19,6	23,4	27,1	30,9	34,4	37,9

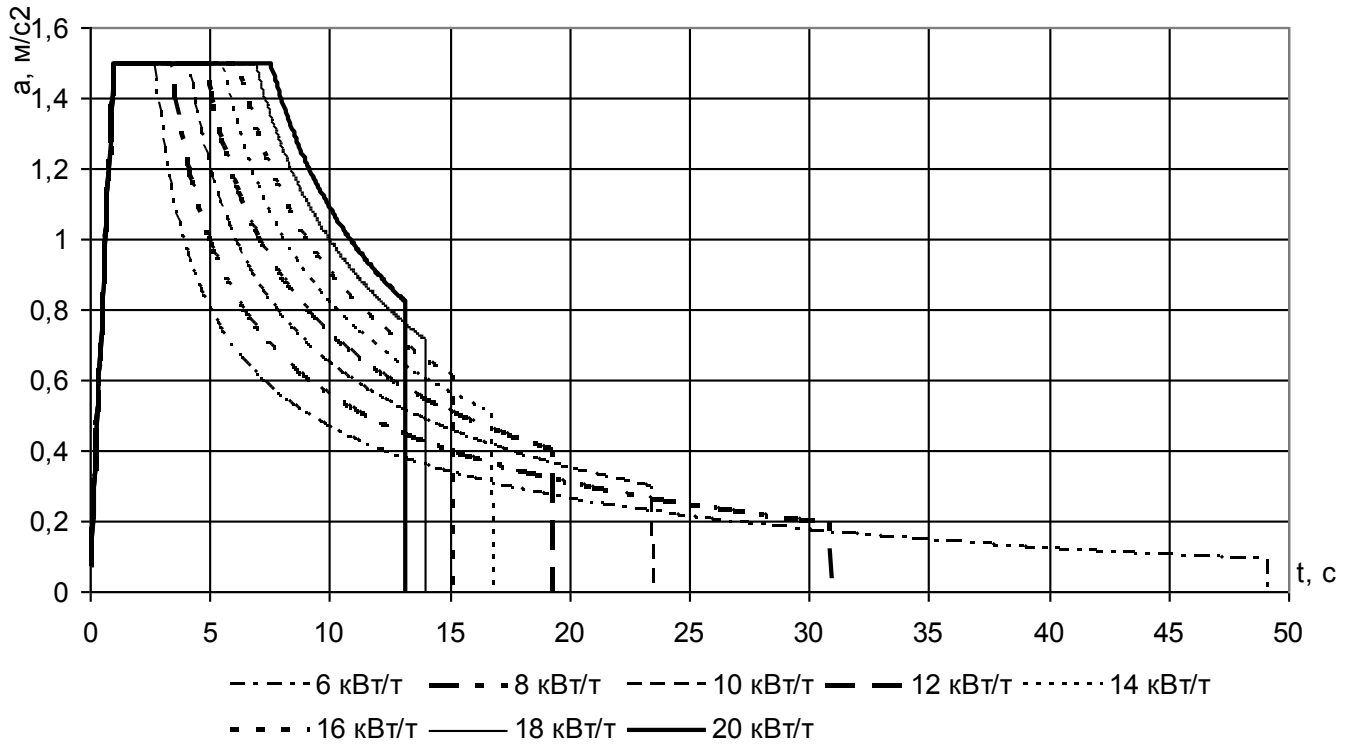


Рисунок 2.7 – Зависимость ускорения гибридного автобуса от времени при различных заданных динамических свойствах

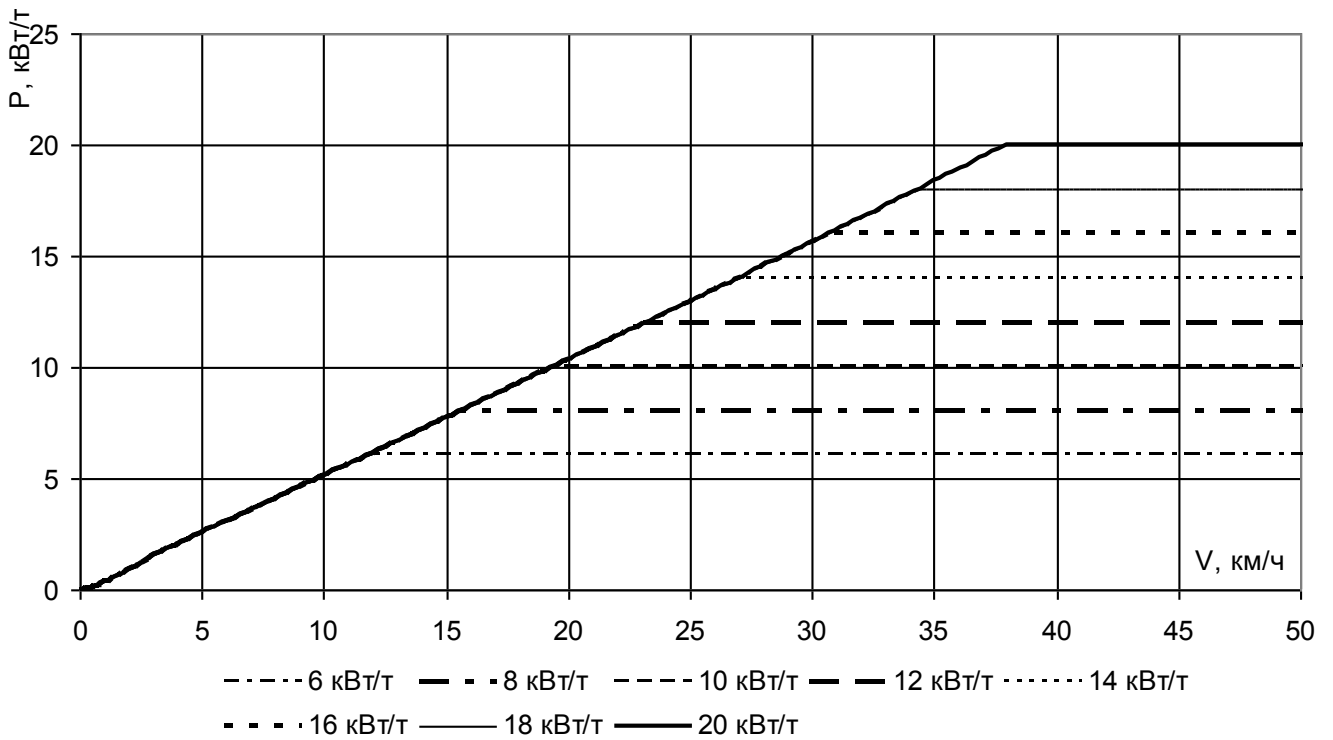


Рисунок 2.8 – Реализация мощности тягового электродвигателя гибридного автобуса при различных динамических характеристиках

В момент завершения процесса пуска скорость V_{Π} , ускорение a_{Π} и мощность тягового двигателя $P_{ТЭД}$ связаны между собой соотношением

$$P_{ТЭД} = (gw(V_{\Pi}) + 1000\gamma a_{\Pi}) \frac{V_{\Pi}}{3600}, \text{ кВт/т}, \quad (2.5)$$

где $w(V)$ – удельное сопротивление движению ТС при скорости V , Н/кН;

γ – коэффициент инерции вращающихся частей тягового привода.

2.4 Определение мощности первичного источника энергии и энергоемкости буферного накопителя

Основное назначение агрегата ДВС-Г в составе комбинированной энергетической установки ГТС – покрытие всех энергетических затрат, включающих собственные нужды и энергию на движение транспортного средства. Мощность собственных нужд ГТС более чем на 80% определяется затратами энергии на поддержание микроклимата ТС. Для автобусов и троллейбусов большой вместимости общая мощность собственных нужд ($P_{СН}$) может превышать 30 кВт [26]. При этом дополнительным существенным преимуществом применения гибридной схемы перед чисто электрическими видами транспорта в условиях холодной климатической зоны является возможность использования вырабатываемого ДВС тепла для обогрева салона.

Мощность, вырабатываемая ДВС для обеспечения перемещения транспортного средства, необходима для покрытия затрат на преодоление сопротивления движению транспортного средства и для возмещения потерь в буферном накопителе, обеспечивающем изменения кинетической энергии ТС. Для выбора мощности ДВС необходимо рассмотреть случаи, в которых максимизируется каждая из составляющих:

- поддержание движения с установившейся максимально возможной при текущем уклоне скоростью;
- движение в цикле разгона – торможения без уменьшения энергии конденсаторного НЭ, при котором энергия, отдаваемая им за цикл, максимальна.

В первом случае запас энергии в НЭ остается постоянным. Необходимая

мощность ДВС в этом режиме определяется произведением силы сопротивления движению и скорости движения ТС:

$$P_1 = gw(V_{\Pi}) \frac{V_{\Pi}}{3600}, \text{ кВт/т.} \quad (2.6)$$

Так как удельное сопротивление движению $w(V)$ пропорционально квадрату скорости, то зависимость необходимой удельной мощности ДВС от скорости описывается кубическим уравнением. Её вид показан на рисунке 2.9.

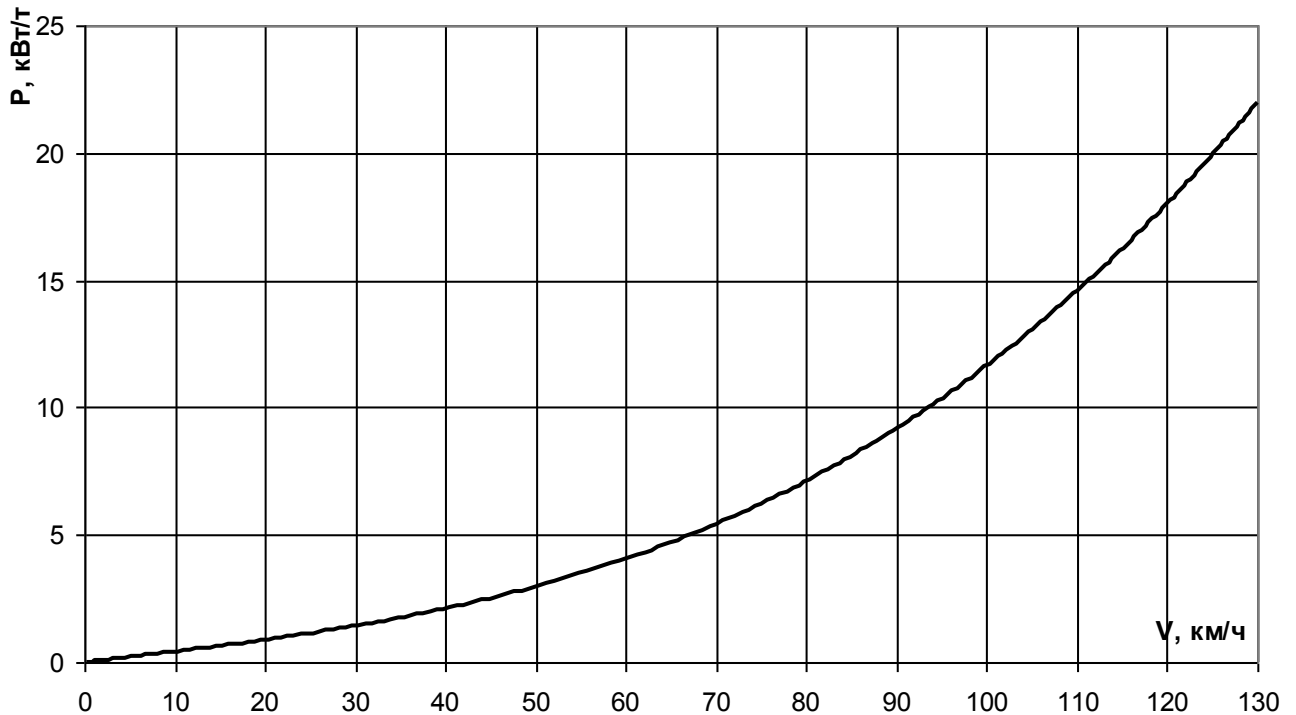


Рисунок 2.9 – Зависимость удельной мощности, необходимой на поддержание постоянной скорости движения, от скорости движения

Во втором случае требуется сравнение возможных циклов движения ТС для определения наиболее тяжелого режима работы. При сравнении принято, что служебное торможение является электрическим и обеспечивает возврат энергии в буферный накопитель. При этом разность энергии, отдаваемой накопителем при разгоне и получаемой при торможении за время пуска-торможения должна быть покрыта двигателем внутреннего сгорания, иначе создается опасность снижения запаса энергии БНЭ ниже предельно допустимого и ТС теряет возможность обеспечить заданные динамические характеристики при следующем пуске. Средняя мощность за цикл разгона-торможения P_2 может быть найдена только

путем тягового расчета.

Длительность цикла разгона-торможения и необходимая для его осуществления мощность двигателя при заданной максимальной скорости будут зависеть от динамических характеристик ТС. Мощность же, вычисленная по первому условию, определяется только его максимальной скоростью. Очевидно, что мощность ДВС следует выбирать по наибольшему из двух принятых ограничений. Как правило, мощность определяется вторым условием, лишь при высокой максимальной скорости и слабой динамике ТС первое ограничение предъявляет более жесткие требования. В любом случае мощность ДВС будет выше, чем средняя мощность, расходуемая на движение ТС. Некоторый запас мощности необходим для компенсации энергии, теряемой в случае переполнения КДЭС или расходуемой при повторных разгонах в области высоких скоростей.

Буферный накопитель энергии должен быть способен как отдавать энергию в тяговый привод, так и принимать её от тягового привода и от ДВС. Таким образом, его максимальная мощность определяется суммарной мощностью тягового электропривода и ДВС гибрида в случае, когда при торможении его заряд производится обоими источниками одновременно. Как правило, накопители на основе современных КДЭС имеют большой запас по току и мощности, и выбор параметров буферного накопителя практически сводится к нахождению его энергоёмкости.

Учитывая коэффициенты полезного действия всех элементов системы, полная необходимая мощность ДВС гибридного автобуса $P_{\text{ДВС}}$ составит

$$P_{\text{ДВС}} = \frac{1}{\eta_{\text{Г}} \eta_{\text{НЭ}}} \left(P_{\text{СН}} + m_{\text{ТС}} \frac{(\max(P_1', P_2'))}{\eta_{\text{ЭД}} \eta_{\text{МП}}} \right), \text{ кВт}, \quad (2.7)$$

где $m_{\text{ТС}}$ – масса ТС, т;

P_1', P_2' – удельная мощность, расходуемая на движение ТС, полученная из первого и второго ограничений, кВт/т;

$\eta_{\text{Г}}, \eta_{\text{НЭ}}, \eta_{\text{ЭД}}, \eta_{\text{МП}}$ – КПД генератора, накопителя энергии, тягового двигателя, механической передачи соответственно.

2.5 Проблема снижения запаса энергии буферного накопителя

При совместной работе источников энергии в составе гибридного привода существует опасность снижения запаса энергии БНЭ ниже минимально допустимого в момент, требующий передачи тяговому приводу дополнительной энергии. Такая ситуация означает, что ТС с комбинированной энергоустановкой оказывается неспособным реализовать заданные динамические характеристики. Полностью исключить подобные ситуации либо, по крайней мере, снизить их вероятность возможно двумя способами: повышением мощности, передаваемой приводу тепловым двигателем, и повышением изначального запаса энергии БНЭ. В зависимости от цикла движения ТС вероятность наступления описанной ситуации может различаться. Если ТС движется в цикле, при котором средняя потребляемая мощность (отношение расхода энергии ко времени движения) больше мощности ДВС, это означает, что недостающая энергия заимствуется из БНЭ и длительное движение в таком цикле приведет к недопустимому снижению запаса энергии накопителя.

Здесь и далее под режимом движения ТС понимается состояние его энергетической установки с характерным направлением передачи энергии между её элементами (например, режимы тяги, выбега, торможения). Термином «цикл движения ТС» названы определенные последовательности чередования режимов движения и соответствующие им зависимости скорости движения ТС от времени.

Наиболее интенсивно энергия будет потребляться при движении в цикле, не содержащем выбега и остановок. В этом случае за торможением будет непосредственно следовать восстановление набранной скорости, то есть время пополнения запаса энергии БНЭ от первичного источника будет минимальным. Такой цикл определяется минимальной (далее V_1) и максимальной (далее V_2) скоростями движения ТС. На рисунке 2.10 показаны изменение скорости ТС и мощности, развиваемой тяговым электродвигателем ТС при движении по такому циклу. Процессы разгона и торможения при дальнейших расчетах упрощенно представлены состоящими из двух частей: при малых скоростях поддерживается

постоянным максимально допустимое ускорение либо замедление, а при больших обеспечивается постоянство мощности тягового привода $P_{ТП} = P_{ТП \max}$ [98].

Средняя мощность, потребляемая тяговым приводом при движении в таком цикле, далее обозначается как $P_{Ц}(V_1, V_2)$. Она определяется отношением разности энергии, затраченной на разгон и энергии, возвращенной в БНЭ при торможении к длительности цикла:

$$P_{Ц} = \frac{E_P - E_T}{t_P + t_T} = \frac{1}{\eta_P} \left(\frac{\int_{t_P} F(t)V(t)dt - \eta_T \int_{t_T} F(t)V(t)dt}{t_P + t_T} \right), \quad (2.8)$$

где E_P – энергия, расходуемая приводом на разгон ТС в выбранном цикле движения,

E_T – энергия, вырабатываемая приводом в режиме торможения,

t_P – длительность периода разгона,

t_T – длительность периода торможения,

η_P – КПД преобразования энергии при разгоне,

η_T – КПД преобразования энергии при регенеративном торможении.

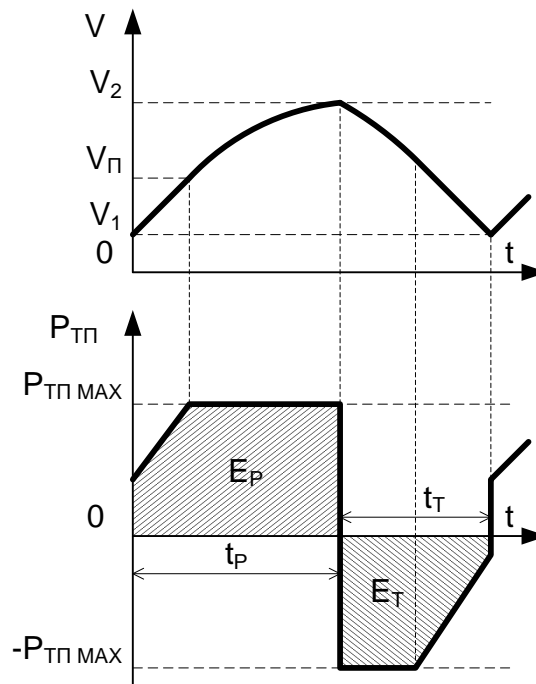


Рисунок 2.10 – Зависимости скорости транспортного средства и мощности тягового привода от времени для цикла разгона-торможения

Для определения необходимого запаса мощности первичного источника энергии необходимо знать, при каких значениях V_1 и V_2 мощность цикла будет максимальна. Получение аналитического выражения для $P_{Ц}(V_1, V_2)$ для произвольных значений V_1 и V_2 затруднено. Численное моделирование движения ТС с использованием методов тягово-энергетических расчетов показывает, что $P_{Ц}$ возрастает с ростом как V_1 , так и V_2 . Мощность цикла достигает максимальных значений в случае, когда скорости V_1 и V_2 приближаются к максимальной скорости движения ТС. В этом случае потребляемая мощность выше мощности, необходимой для поддержания постоянной скорости, так как разгон с поддержанием заданных динамических характеристик требует дополнительную мощность на реализацию ускорения, после чего в ходе торможения полный возврат кинетической энергии оказывается невозможен. В реальности режим движения, близкий к циклу максимальной мощности, может наблюдаться, например, при выполнении обгона.

Считая, что скорость ТС V лежит в области движения с постоянной мощностью привода $P_{ТП}$, можно вычислить предельную величину $P_{Ц}$ при малом изменении скорости за цикл dV и соответствующих ему малых изменениях времени dt_P и dt_T :

$$P_{Ц} = \frac{E_P - E_T}{t_P + t_T} = \frac{P_{ТП} dt_P - \eta_T P_{ТП} dt_T}{\eta_P (dt_P + dt_T)}. \quad (2.9)$$

Так как абсолютная величина изменения скорости при разгоне и торможении dV одинакова, то время dt_T может быть выражено через dt_P :

$$dV = a_P dt_P = a_T dt_T, \quad (2.10)$$

$$dt_T = \frac{a_P}{a_T} dt_P = \frac{\frac{1}{(1+\gamma)m} \left(\frac{P_{ТП}}{V} - W(V) \right)}{\frac{1}{(1+\gamma)m} \left(\frac{P_{ТП}}{V} + W(V) \right)} dt_P = \frac{\frac{P_{ТП}}{V} - W(V)}{\frac{P_{ТП}}{V} + W(V)} dt_P,$$

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

a_P и a_T – ускорения разгона и торможения, пропорциональные величине действующей на ТС силы,

m – масса ТС,

γ – коэффициент, учитывающий инерцию вращающихся частей ТС.

Окончательное выражение для $P_{Ц}$ при $V_1 = V_2 = V$ получено подстановкой (2.10) в (2.9) и упрощением получившегося выражения:

$$P_{Ц} = \frac{V}{2\eta_p} \left(\frac{P_{ТП}}{V} (1 - \eta_T) + W(V)(1 + \eta_T) \right). \quad (2.11)$$

Хотя полученное выражение не содержит массу ТС в явном виде, масса ТС влияет на величину мощности $P_{ТП}$ и силы сопротивления движению $W(V)$. При максимальной возможной скорости движения ТС вся мощность привода расходуется на преодоление сопротивления движению:

$$\frac{P_{ТП}}{V} = W(V). \quad (2.12)$$

Подставляя (2.12) в (2.11), можно убедиться, что в этом случае мощность цикла становится равна мощности привода с учетом потерь на передачу энергии:

$$P_{Ц} = \frac{P_{ТП}}{\eta_p}. \quad (2.13)$$

Можно также убедиться, что при $\eta_T = 1$, $P_{Ц} = P_{ТП}$, то есть случае идеального накопителя кинетическая энергия ТС без потерь переходит в запас энергии БНЭ и обратно, а мощность первичного источника энергии затрачивается только на преодоление сопротивления движению.

Тем же методом, использованным в (2.8) – (2.10), может быть найдена мощность $P_{Ц}$ в случае, если скорость $V = V_1 = V_2$ мала и силы тяги и торможения ограничены не мощностью привода, а допустимым ускорением a :

$$P_{Ц} = \frac{V}{2\eta_p} \left((1 + \gamma)ma(1 - \eta_T) + W(V)(1 + \eta_T) \right). \quad (2.14)$$

Мощность, необходимая для поддержания постоянной скорости движения, определяется сопротивлением движению и может быть найдена из (2.12). На рисунке 2.11 показаны зависимости мощности цикла $P_{Ц}$ и мощности, необходимой для поддержания постоянной скорости движения $P_{V=\text{const}}$, от скорости. Мощность на графике представлена в удельной форме (кВт/т). Чтобы более наглядно показать разницу мощностей, расчет выполнен для ТС с тяговым приводом удельной мощностью 50 кВт/т и пусковым ускорением 4 м/с² при

среднем значении КПД $\eta_p = \eta_T = 0,75$.

Наличие первичного источника энергии мощностью не менее $P_{Ц}$ является достаточным условием, обеспечивающим поддержание запаса энергии БНЭ не ниже минимально допустимого. Но такое требование является избыточным, так как цикл движения с максимальным потреблением мощности, как правило, не реализуется в течение длительного времени. Кратковременные пики потребления мощности могут быть также обеспечены дополнительным запасом энергии БНЭ.

Так как циклы движения ТС неизвестны заранее, для определения мощности первичного источника и полезной энергоёмкости БНЭ необходимо рассматривать потребление энергии как случайный процесс. При этом потребляемая (отдаваемая) тяговым приводом мгновенная мощность $P_{ТП}(t)$ является случайной величиной, математическое ожидание которой соответствует средней мощности, потребляемой транспортным средством на движение.

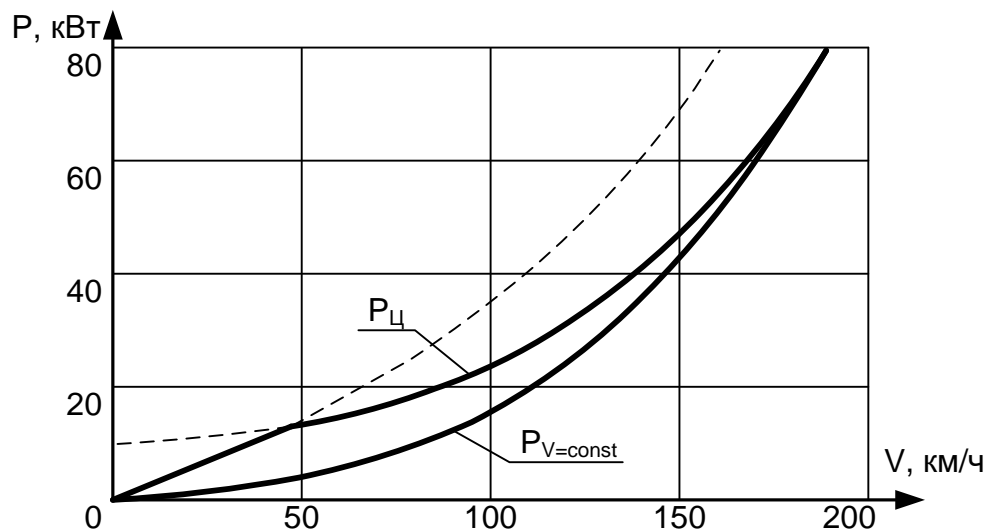


Рисунок 2.11 – Зависимости от скорости максимальной удельной мощности цикла и удельной мощности, необходимой для поддержания скорости

Вероятностное представление мощности приводит к необходимости задания соответствующих критериев правильности выбора параметров тягового привода. Например, таким критерием может быть вероятность снижения запаса энергии БНЭ ниже допустимого в течение поездки заданной длительности. Очевидно, что в начальный момент времени, при полностью заряженном

накопителе, она будет нулевой. В то же время, согласно закону больших чисел, вероятность реализации режима движения, приводящего к снижению запаса энергии накопителя, с течением времени будет возрастать.

В случае накопителя бесконечной ёмкости зависимость $P_{ТП}(t)$ была бы связана с запасом энергии, находящемся в момент $t = t_1$ в буферном накопителе и питаемом генератором мощностью P_G следующим соотношением:

$$E_{БНЭ}(t_1) = E_0 + P_G t_1 - \int_0^{t_1} P_{ТП}(t) dt, \quad (2.15)$$

где E_0 – запас энергии в БНЭ в начальный момент времени $t = 0$.

Зависимость $E_{БНЭ}(t)$ также является случайной функцией, и даже в случае применения БНЭ бесконечной энергоёмкости возможен недопустимый на практике переход её в область отрицательных значений, что соответствует падению запаса энергии накопителя ниже допустимого. Таким образом, наличие некоторого запаса по мощности первичного источника является необходимым, а величина этого запаса зависит от принятой ёмкости БНЭ.

2.6 Зависимость энергоёмкости буферного накопителя от мощности первичного источника энергии

Итак, выбор основных параметров комбинированной энергетической установки автобуса – мощности его первичного источника энергии (ПИЭ) и энергоёмкости буферного накопителя энергии (БНЭ) – не может быть выполнен исходя исключительно из допустимых скорости и ускорения ТС. Для решения этой задачи необходимо учитывать особенности циклов его движения. Зависимость необходимой энергоёмкости БНЭ от мощности ПИЭ может быть получена исходя из кривых движения ТС следующим образом.

В качестве исходных данных для расчета берется ожидаемая зависимость скорости движения ТС от времени $V(t)$ за достаточно длительное время, например, рейс по маршруту. При численном расчете зависимость задается набором мгновенных значений, измеренных через достаточно малые интервалы

времени Δt . При расчете принято, что время междурейсового отстоя маршрутных ТС, составляющее 3 – 5 минут, является достаточным для заряда БНЭ, и в начале каждого рейса накопитель заряжен до требуемого значения. Для нахождения зависимости $E_{\text{БНЭ}}(t)$ использована следующая последовательность расчета:

1. По значениям мгновенной скорости находят сопротивление движению ТС w и его ускорение a [23]:

$$w_i = 16 + 0,004v_i^2, \text{ Н/кН}; \quad (2.16)$$

$$a_i = \frac{v_i - v_{i-1}}{\Delta t}, \text{ м/с}^2, \quad (2.17)$$

где v_i – значение скорости в i -й момент времени, м/с;

Δt – шаг времени расчета, обычно принимаемый равным 0,5 с, что обеспечивает достаточно высокую точность расчета.

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

$$F_i = (1 + \gamma)ma_i + mgw_i, \text{ кН}, \quad (2.18)$$

где γ – коэффициент, учитывающий инерцию вращающихся частей;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

m – масса ТС, т.

3. Выполняется оценка мощности, потребляемой либо возвращаемой тяговым приводом в режимах тяги и торможения по одному из выражений:

$$P_i = \begin{cases} \frac{F_i v_i}{\eta_m} \\ F_i v_i \eta_p \end{cases}, \text{ кВт}, \quad (2.19)$$

где η_m – КПД тягового привода в режиме тяги;

η_p – КПД тягового привода в режиме рекуперации.

4. Определяется запас полезной энергии БНЭ:

$$E_{\text{БНЭ } i} = \begin{cases} E_{\text{БНЭ } i-1} + P_G \Delta t + P_i \Delta t, & \text{если } E_{\text{БНЭ max}} - E_P > E_{\text{БНЭ } i} \\ E_{\text{БНЭ } i-1} + P_i \Delta t, & \text{если } E_{\text{БНЭ max}} - E_P > E_{\text{БНЭ } i} > E_{\text{БНЭ max}}, \text{ кДж}, \\ E_{\text{БНЭ max}}, & \text{если } E_{\text{БНЭ } i} > E_{\text{БНЭ max}} \end{cases} \quad (2.20)$$

где P_G – мощность генератора, приводимого от ДВС;

$E_{\text{БНЭmax}}$ – максимальная полезная энергия БНЭ;

E_p – энергия рекуперации, принимаемая БНЭ.

При суммировании принята следующая логика работы привода. При малой величине 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 осуществляемых торможений [101].

Результатом расчета является зависимость отданной БНЭ энергии от времени. При расчете выбирается такое значение $E_{\text{БНЭmax}}$, чтобы минимальный запас полезной энергии $E_{\text{БНЭ}i}$ за время движения был равен нулю. Такое значение $E_{\text{БНЭmax}}$ является минимальным, обеспечивающим движение ТС в заданном режиме при выбранной мощности генератора P_G . На рисунках 2.12 и 2.13 в качестве примера показаны полученные зависимости запаса энергии БНЭ от времени при мощности генератора 25 и 50 кВт, рассчитанные для некоторого цикла движения ТС.

Анализ графиков позволяет сделать вывод, что запас полезной энергии БНЭ приближается к нулю в случае длительного движения в режиме тяги либо чередования режимов разгона и торможения в области высоких скоростей. Длительность движения в таком режиме определяет необходимые мощность генератора и энергоемкость БНЭ. Поддержание постоянной высокой скорости движения потребовало бы первичного источника энергии мощностью около 80 кВт.

При изменении заданной мощности первичного источника энергии P_G изменяется найденная в результате расчета необходимая полезная энергия $E_{\text{БНЭmax}}$, что позволяет получить зависимость одной величины от другой. Пример такой зависимости для одного из рейсов показан на рисунке 2.14. На графике можно выделить решения, соответствующие различной степени гибридизации [55, 102]. Так, нулевой мощности генератора соответствует электробус – ТС, передвигающееся исключительно за счет запасенной в накопителе энергии, а

нулевой емкости БНЭ соответствуют обычные автобус либо троллейбус, не использующие повторно энергию торможений.

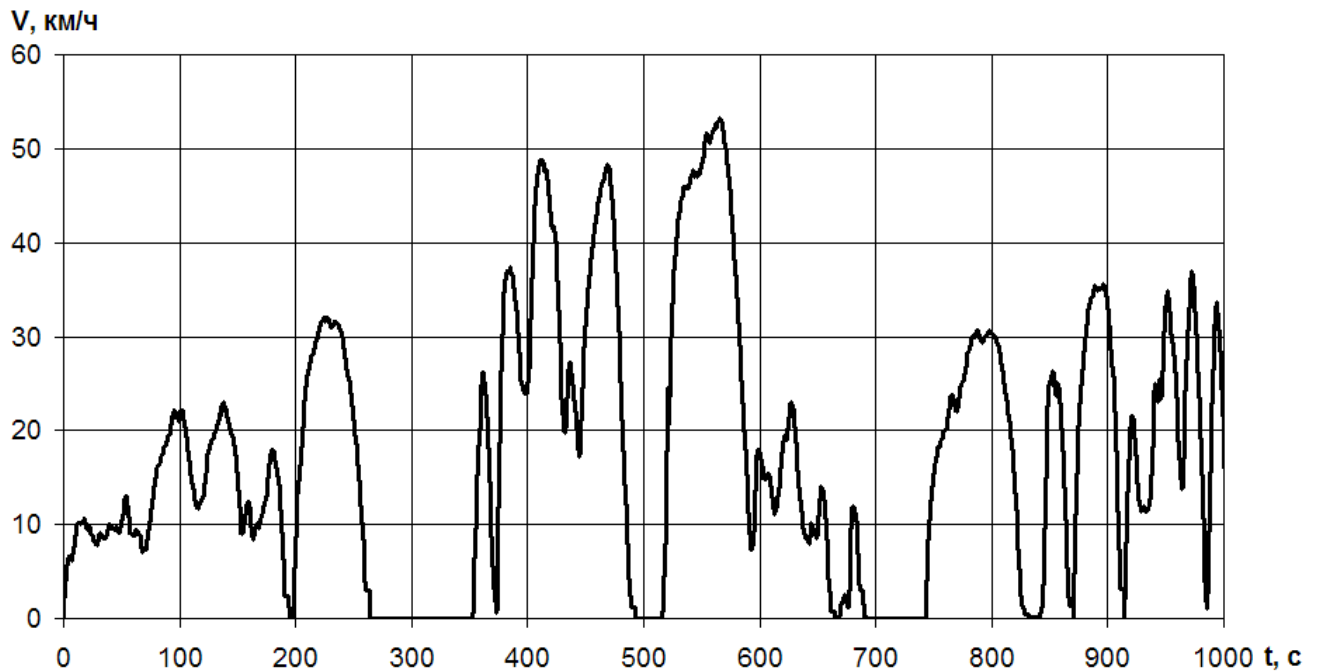


Рисунок 2.12 – Зависимость скорости движения ТС от времени

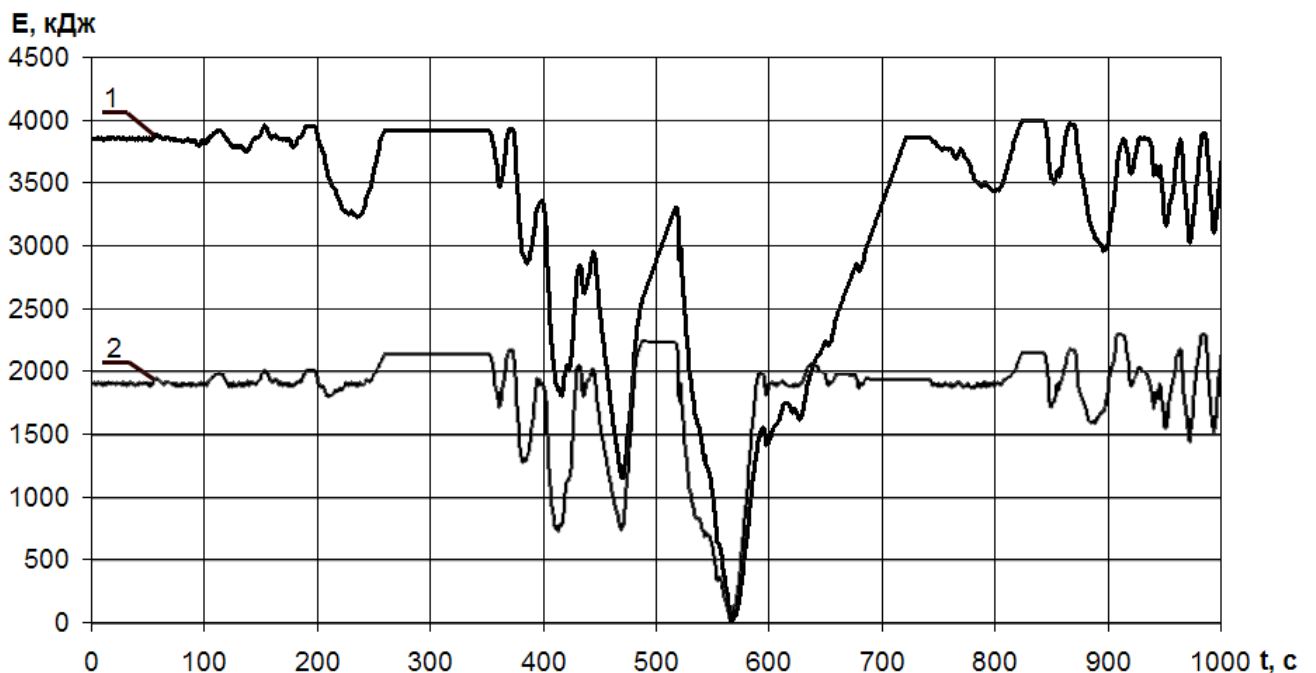


Рисунок 2.13 – Зависимость запаса энергии БНЭ от времени при мощности генератора 25 кВт (линия 1) и 50 кВт (линия 2)

При малых мощностях генератора (менее 20 – 25 кВт) реализуется схема заряжаемого («plug-in») гибрида, требующего дополнительного заряда

накопителя во время стоянки. Здесь наблюдается линейная зависимость энергоемкости от мощности, поскольку при большой емкости накопителя генератор пополняет его заряд непрерывно и выработанная им энергия пропорциональна его мощности.

В предложенной модели при мощности ПИЭ, большей мощности тягового электродвигателя, БНЭ позволяет обеспечить постоянство мощности, вырабатываемой генератором в течение цикла. В этом случае энергоемкость накопителя не ограничивает динамические характеристики транспортного средства. На диаграмме такая схема сокращенно названа «автобус с БНЭ».

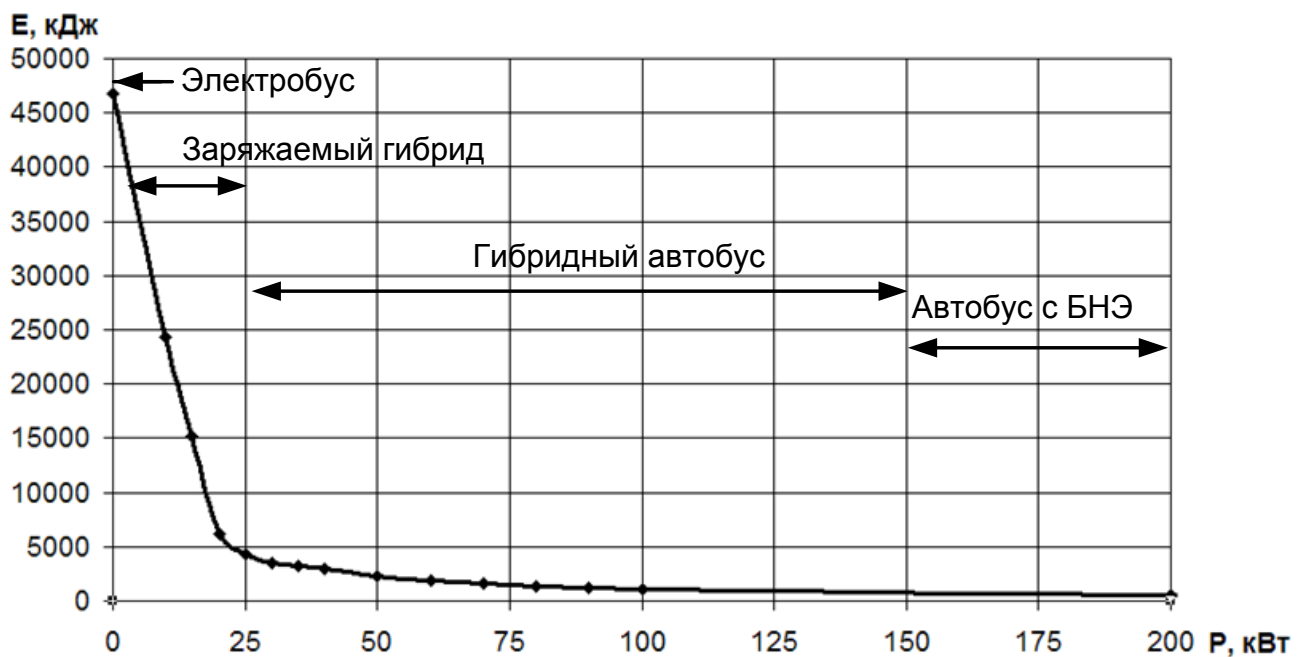


Рисунок 2.14 – Пример зависимости необходимой для обеспечения заданного режима движения энергоемкости БНЭ от мощности ПИЭ

Для получения зависимости $E_{\text{БНЭ}}(P_{\text{ПИЭ}})$ и выбора необходимой энергоемкости БНЭ требуется знать зависимость скорости ТС от времени при движении ТС по маршруту. Эта задача может быть решена двумя способами: либо на основании стандартных циклов движения, используемых обычно для определения топливной экономичности ТС, либо путем использования экспериментальных записей движения ТС, осуществляющих перевозку пассажиров.

2.7 Стандартные циклы для исследования топливной экономичности транспортных средств

В современных работах отсутствует консенсус в вопросе выбора цикла движения для определения энергоемкости накопителя ГТС. Например, в [103] сравниваются стандартные циклы UDDS (Urban Dynamometer Driving Schedule), HWFET (Highway Fuel Economy Test Cycle) и NEDC (New European Driving Cycle), а также экспериментальные записи для различных характерных поездок. Авторами предложено сравнивать записи по распределению средней удельной мощности циклов разгона-торможения. Но такое сравнение не вполне точно, поскольку при определении энергоемкости накопителя особенно важно количество следующих друг за другом подряд циклов с высокой средней мощностью. При этом именно такие ситуации приводят к наибольшему расходу энергии БНЭ.

В [75] упоминается также цикл FTP-75 (Federal Test Procedure). Эти и подобные циклы используются в различных странах (США, странах Европейского Союза, Японии) для определения топливной экономичности автомобилей. В России для измерения топливной экономичности городских автобусов использовался цикл, определенный ГОСТ 20306-90 [104], построение которого связано с конструктивными особенностями испытуемого автобуса (например, отсутствуют жесткие требования по ускорению, введено требование использовать торможение двигателем), что принципиально не позволяет получить универсальную зависимость скорости движения ТС от времени. Примеры различных циклов движения, используемых для измерения расхода топлива, представлены на рисунках 2.15 – 2.19.

В [13] и [105] для верификации расчета энергетической установки используются экспериментальные записи скорости движения автобуса за один рейс. В [106] сравниваются циклы, принятые для определения расхода топлива автобусов в различных городах (Нью-Йорк, Нюрнберг, Тегеран). Схожий подход применен в [107]: авторами рассмотрены шесть циклов, принятых в различных

городах США и ЕС. Для имитации длительного рейса циклы многократно повторяются. В результате участки, требующие различного потребления энергии, оказываются равномерно распределенными по протяженности рейса, что может не выполняться на практике. В [11] авторами предложен собственный цикл, составленный из чередующихся циклов для различных режимов движения ТС.

Как видно из приведенного обзора, в настоящее время отсутствует единый подход к выбору цикла движения ТС для исследования его энергопотребления. Существует ряд циклов, используемых для исследования топливной экономичности транспортных средств, однако они не могут быть непосредственно использованы для определения характеристик гибридной энергоустановки, если существенной является не только частота повторения циклов разгона-торможения до заданной скорости, но и длительность повторения схожих циклов.

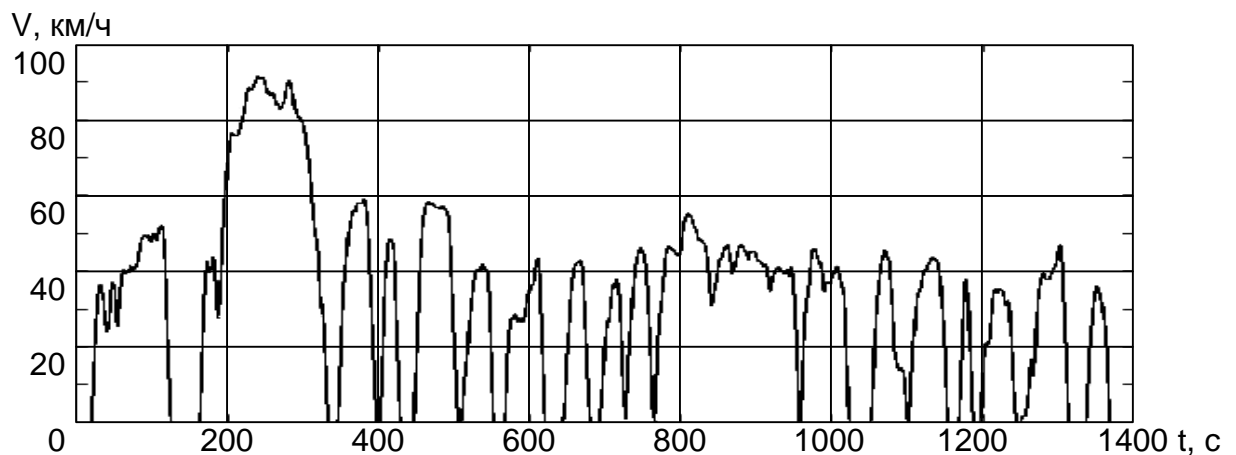


Рисунок 2.15 – Цикл UDDS

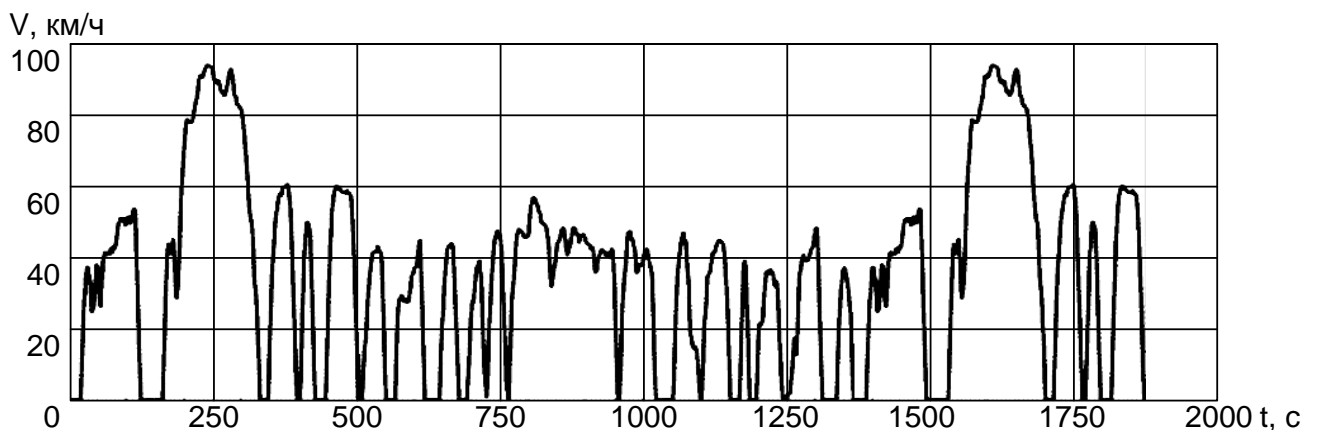


Рисунок 2.16 – Цикл FTP

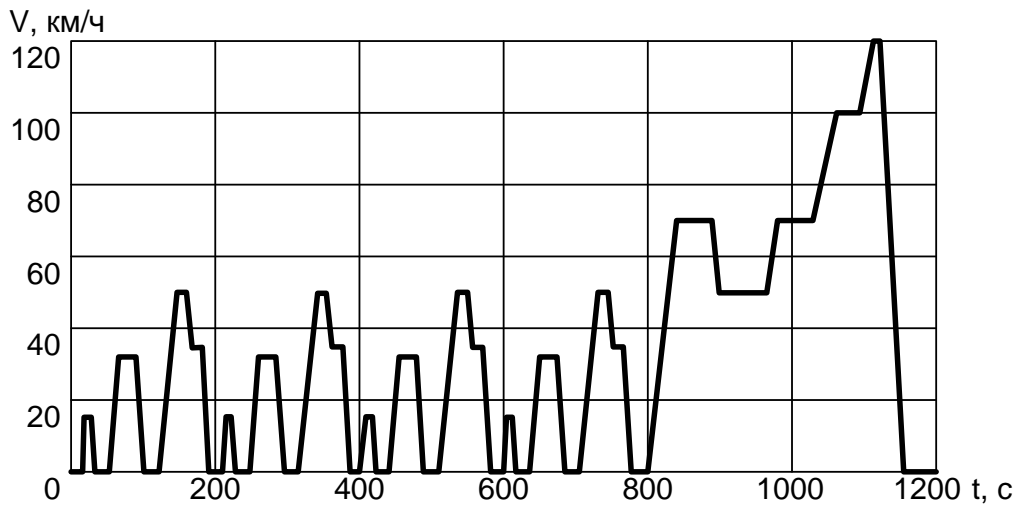


Рисунок 2.17 – Цикл NEDC

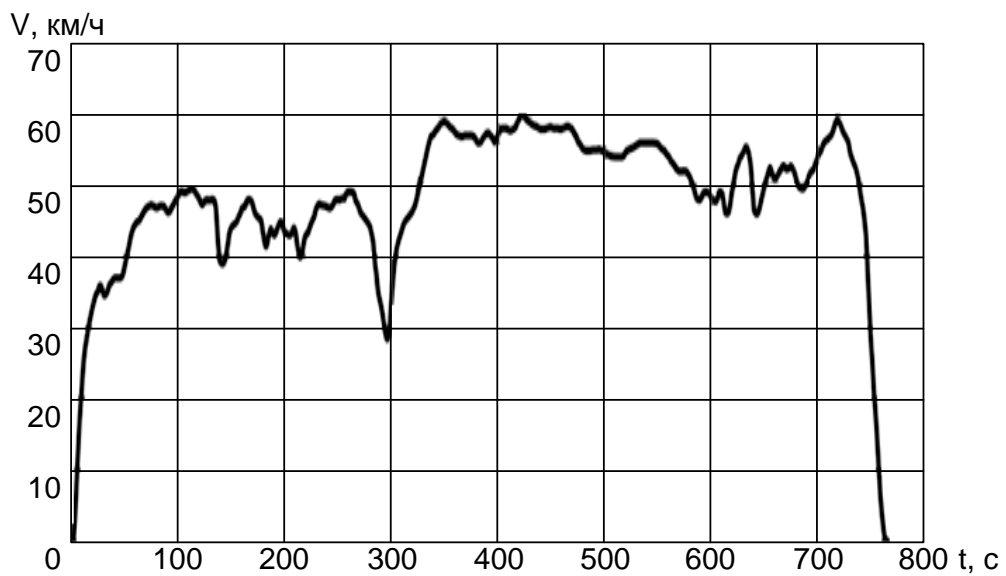


Рисунок 2.18 – Цикл HWFET

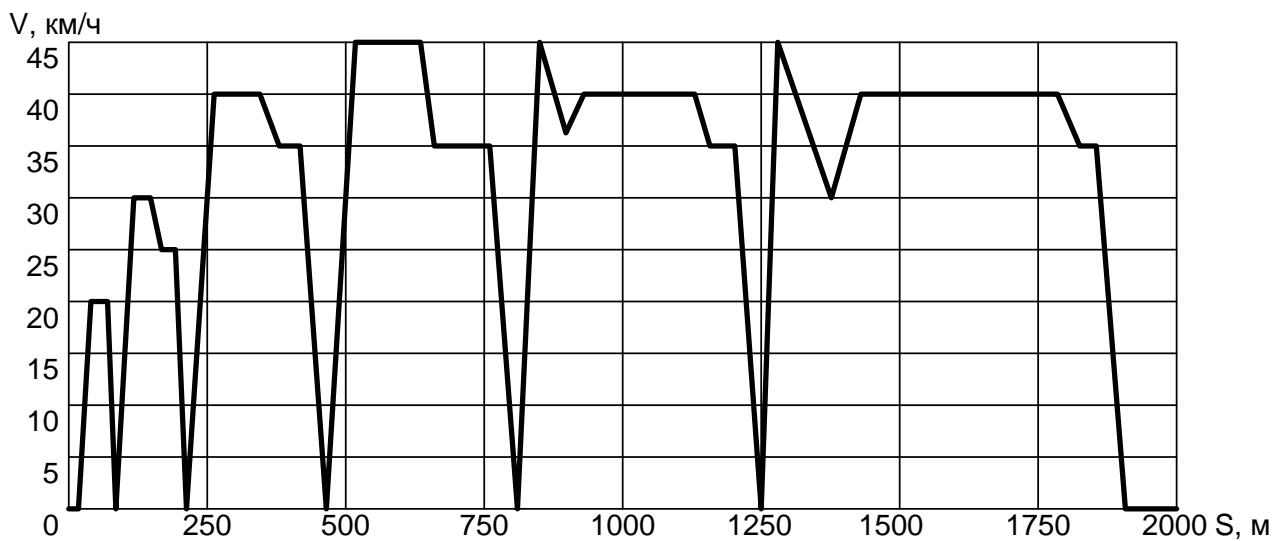


Рисунок 2.19 – Цикл для измерения расхода топлива городских автобусов согласно ГОСТ 20306-90

На основании нескольких принятых за рубежом стандартных циклов автором получены зависимости энергоемкости накопителя энергии от мощности первичного источника. Результат расчета показан на рисунке 2.20.

Итак, сложность выбора необходимого расчетного цикла приводит к необходимости исследования записей $V(t)$, полученных для реального ТС в эксплуатационных условиях.

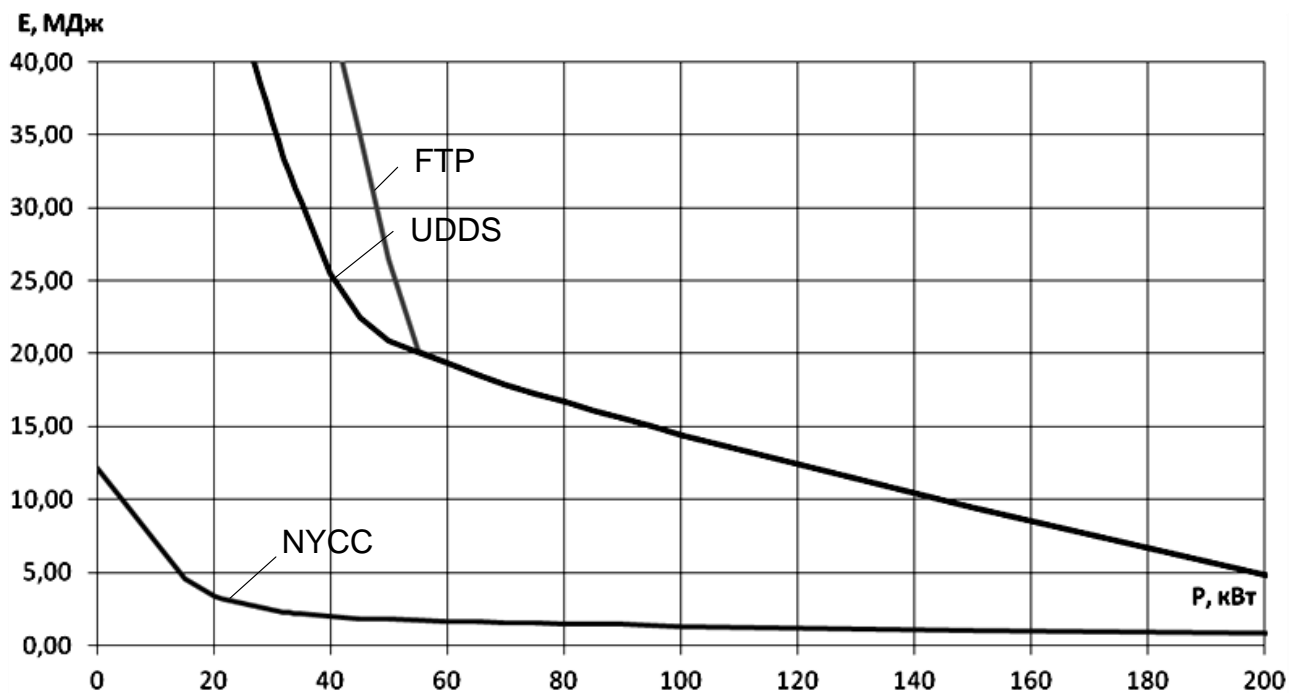


Рисунок 2.20 – Пример зависимости необходимой для обеспечения заданного режима движения энергоемкости БНЭ от мощности ПИЭ

2.8 Выводы

1. Установлено, что на подвижном составе городского транспорта целесообразно применение комбинированных энергоустановок последовательной схемы. Такая схема обеспечивает наиболее полное использование энергии электрического торможения при достаточно высоком КПД энергоустановки.

2. Показано, что при некоторых циклах движения ТС существует проблема снижения запаса энергии БНЭ ниже допустимого уровня, которая может быть решена только совместным повышением мощности ПИЭ и энергоемкости БНЭ сверх значений, определенных по усредненным характеристикам движения ТС.

3. Предложена методика определения зависимости энергоемкости БНЭ от мощности ПИЭ $E_{БНЭ}(P_{ПИЭ})$. В результате анализа стандартных циклов, используемых для определения топливной экономичности ТС, установлено, что использование их для получения зависимости $E_{БНЭ}(P_{ПИЭ})$ невозможно. Необходимо экспериментальное исследование циклов движения ТС.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИКЛОВ ДВИЖЕНИЯ ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА

3.1 Цели и задачи исследования

Существуют различные подходы, позволяющие получить информацию о цикле движения транспортного средства. Зависимость скорости его движения от времени может быть получена на основании как расчетных кривых движения, так и стандартных циклов, используемых для определения топливной экономичности автомобилей, и экспериментально полученных данных.

В условиях крупных городов движение общественного транспорта, как правило, оказывается затруднено и характеризуется как большим числом остановок на перегоне, так и необходимостью уменьшения скорости движения без полной остановки. В результате возрастает частота пусков и торможений, а ходовая скорость подвижного состава снижается. Таким образом, средняя энергия, вырабатываемая в процессе торможения, оказывается значительно меньше не только максимально возможной, рассчитанной в условиях торможения на спуске с полной загрузкой, но и энергии, оцененной для случая соблюдения расчетного режима движения. По этой причине допускаемое обычно при тяговых расчетах предположение, что цикл движения между остановочными пунктами состоит из однократных разгона, выбега и торможения [15, 17], оказывается не точным и не может использоваться для определения режимов движения и оценки потребления энергии транспортным средством.

При проектировании энергетических установок гибридных транспортных средств существенное влияние на параметры проектируемых установок может оказывать неравномерность средней потребляемой тяговым приводом мощности. Такая неравномерность может быть вызвана, например, чередованием циклов движения в заторе и на свободной дороге. Как показано в предыдущей главе, длительность нахождения в режиме с потреблением энергии выше среднего определяет необходимые величины запасов мощности первичного источника

энергии и энергоемкости буферного накопителя, что не позволяет воспользоваться стандартными циклами.

Таким образом, возникает необходимость экспериментального исследования режимов движения транспортного средства. Такое исследование может быть выполнено методом фиксации мгновенных значений скорости движения, а также напряжения и тока тягового преобразователя, необходимых для вычисления его мощности и потребляемой энергии.

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.

3.2. Оборудование и методика исследования

Исследование режимов движения выполнено на троллейбусе СТ-6217, на котором установлен тяговый привод постоянного тока с импульсной системой управления производства НПФ «АРС-Терм». Для его выполнения разработан и изготовлен устанавливаемый на троллейбусе специализированный электронный регистратор. Исследуемый троллейбус оборудован распределенной системой управления с целью сокращения протяженности низковольтных цепей и повышения надежности работы вспомогательного оборудования. Особенностью этой системы является подключение всего электрооборудования к одному из объединенных в распределенную по кузову сеть блоков системы управления, представляющих собой объединенные при помощи CAN-шины

микроконтроллеры. Через CAN-шину осуществляется питание блоков, а также двусторонняя передача информации: управляющих команд и показаний датчиков. Блок-схема распределенной системы управления показана на рисунке 3.1.

Регистратор подключается к CAN-шине и осуществляет прием передаваемой по ней информации, выделяя сообщения о показаниях датчиков, входящих в состав системы управления троллейбуса. Полученные данные преобразуются в формат .CSV и записываются в виде файлов на Flash накопителе SD-Card. Для обеспечения безопасности работы системы управления и упрощения конструкции регистратора он работает исключительно в режиме приема, не выдавая запросов на получение информации от других узлов. Программой его работы предусмотрена регистрация данных по четырем каналам: напряжения контактной сети, тока тягового преобразователя, тока собственных нужд и скорости движения троллейбуса.

Датчик скорости движения расположен на валу тягового электродвигателя, датчики напряжения контактной сети и тягового тока – на входе тягового преобразователя, датчик тока собственных нужд установлен в общей цепи аппаратов защиты собственных нужд.

Блоки системы управления получают информацию в аналоговом формате и с требуемой периодичностью преобразуют её в сообщения, соответствующие требованиям протокола CAN. В процессе нормальной работы системы управления передача сообщений с показаниями датчиков осуществляется с различной частотой, от 4 до 25 раз в секунду в зависимости от типа данных. Для гарантированной регистрации CAN сообщений и сокращения объема записываемой информации принята скорость записи 2 точки в секунду.

Структурная схема регистратора изображена на рисунке 3.2. Шина CAN, кроме линий CANH и CANL, содержит также вспомогательные проводники для питания, в том числе, и внешних устройств. Подводимое CAN шиной напряжение составляет 22 ... 27 В.

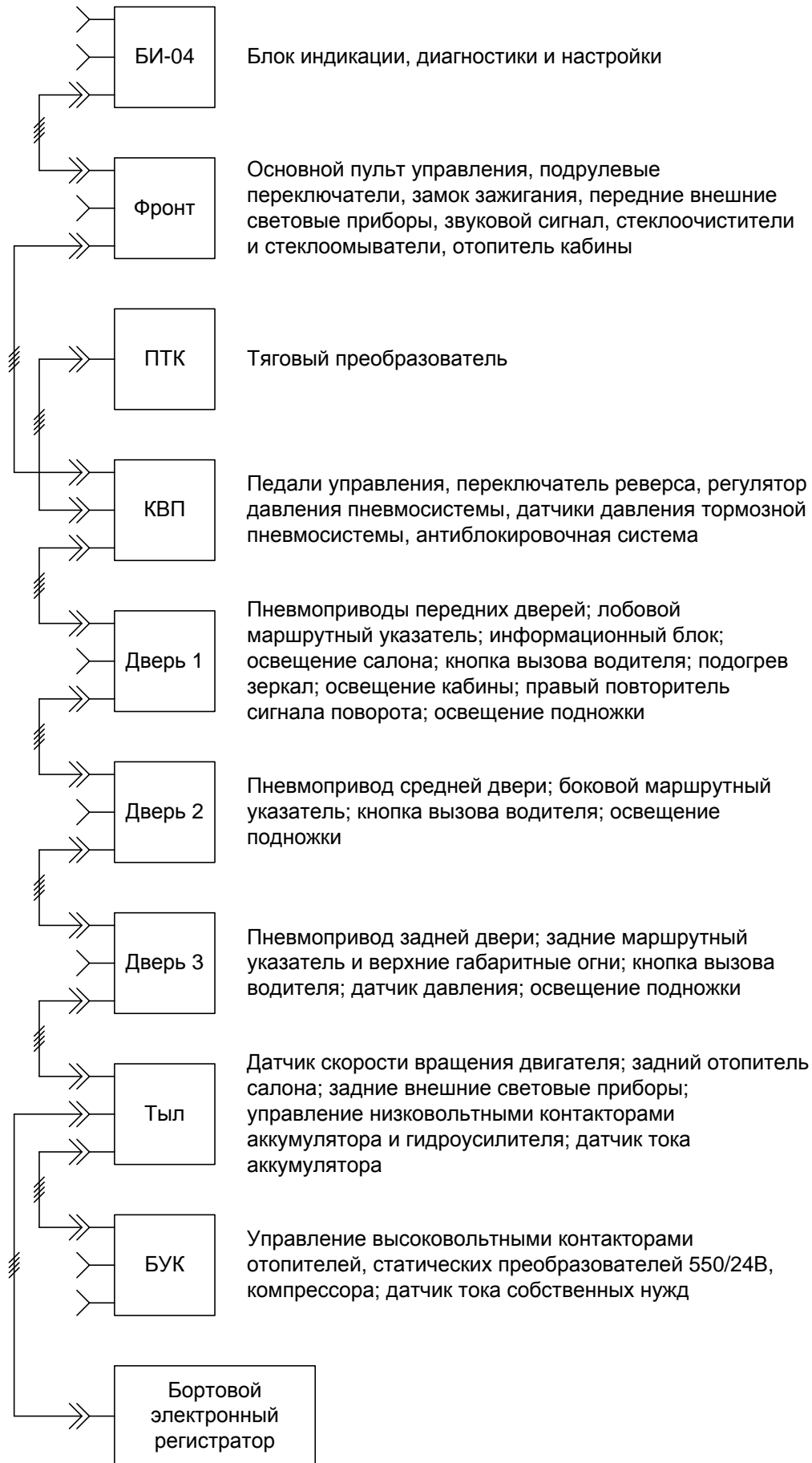


Рисунок 3.1 – Блок-схема распределенной системы управления троллейбуса

Всем элементам на представленной на рисунке 3.2 блок-схеме регистратора, кроме кнопок (элемент «клавиатура»), требуется источник питания. Внутренний источник питания самописца представляет собой аккумуляторную батарею, заряжаемую через стабилизатор бортовым источником питания троллейбуса. Аккумуляторная батарея обеспечивает автономную работу устройства до 15 часов.

Драйвер CAN-шины преобразует пакеты импульсов в дифференциальной линии CANH и CANL в передаваемые по одному каналу Receive нули и единицы. Клавиатура служит для управления оператором режимами работы самописца. Также с нее задаются константы задержек по времени и управление записью файлов на Flash накопитель. Цифровой накопитель SD Card имеет ёмкость 2 Гб и управляется по специально предусмотренному SPI протоколу. Напряжение питания лежит в диапазоне +2.7 ... +3.6 В.

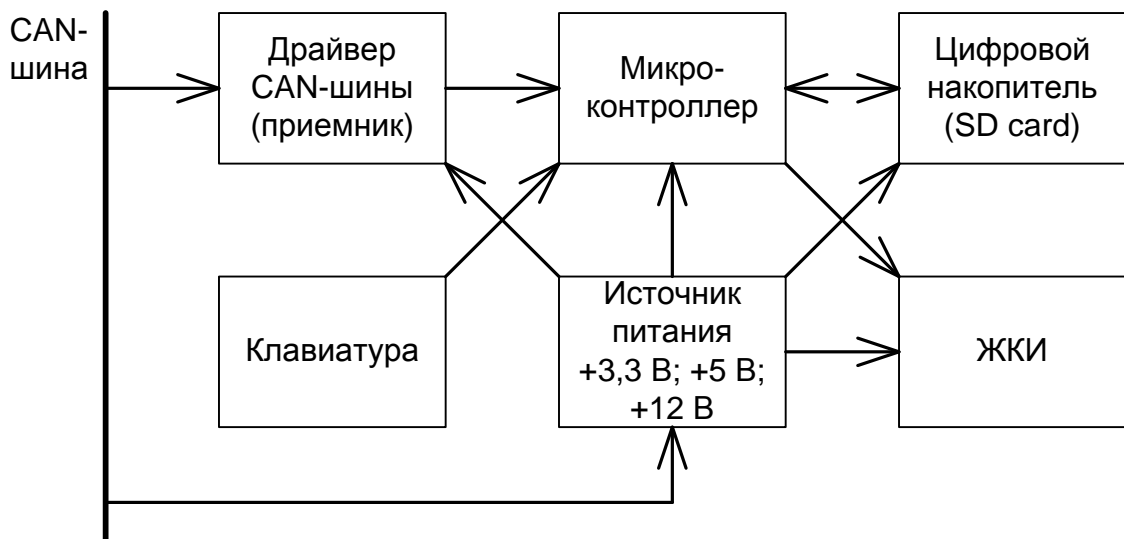


Рисунок 3.2 – Структурная схема регистратора

Микроконтроллер PIC 16-й серии взаимодействует со всеми обозначенными блоками в режиме приёма, передачи и приёма/передачи. Взаимодействие по CAN, SPI (Serial Peripheral Interface), PP (Parallel Port, для ЖКИ) протоколу выполнено программно. Частота кварцевого резонатора равна 20 МГц.

Жидкокристаллический индикатор (ЖКИ) служит для отображения текущего режима работы регистратора и установки констант. В устройстве также

программно предусмотрен режим сканера, позволяющий выделять конкретные информационные пакеты из всего потока.

На рисунке 3.3 изображена принципиальная схема бортового регистратора, адаптированного под работу на троллейбусе СТ-6217 с распределенной системой управления. Схема получает питание от низковольтной сети троллейбуса напряжением 27 В. Это напряжение понижается до 12 В стабилизатором, выполняющим, кроме того, защитную функцию: ток заряда ограничен значением 70 мА. Предусмотрена также защита цепи питания плавким предохранителем.

На схеме клавиатура самописца содержит три кнопки (SA1 – SA3 на рисунке 3.3) для выбора режима работы и поиска по меню.

Уровень напряжения батареи GB1 контролируется по аналоговому входу RA0 порта «А». В случае экстремального снижения напряжения аккумулятора (менее 9 В) автоматически выполняется завершение процесса записи файла, если он был открыт, и сохранение на внутреннюю энергонезависимую EEPROM память микроконтроллера содержимого регистров. Микроконтроллер переходит в режим ожидания с малым энергопотреблением. При восстановлении напряжения питания (более 11 В) с энергонезависимой памяти микроконтроллера считывается содержимое регистровых ячеек и устройство переходит в прежний режим работы.

Отображение получаемой по сигнальной шине информации выполняется двухстрочным текстовым индикатором, подключенным к порту «В» микроконтроллера.

Для приёма / записи данных Flash – накопителя SD Card используются выводы RC2-RC5 микроконтроллера. Требуемое напряжение питания SD Card +3.3 В создаётся микросхемой – стабилизатором (DD2 на рисунке 3.3). Адаптирование напряжения логических нулей и единиц пятивольтового порта «С» для совместимости с SD Card выполнено резисторными цепочками.

Приём информации по шине CAN ведётся микросхемой – приёмопередатчиком, работающей в данном устройстве только в режиме Receive (приёма). Микроконтроллер получает информацию о режимах работы троллейбуса по выводу RC0 порта «С» (рисунок 3.3).

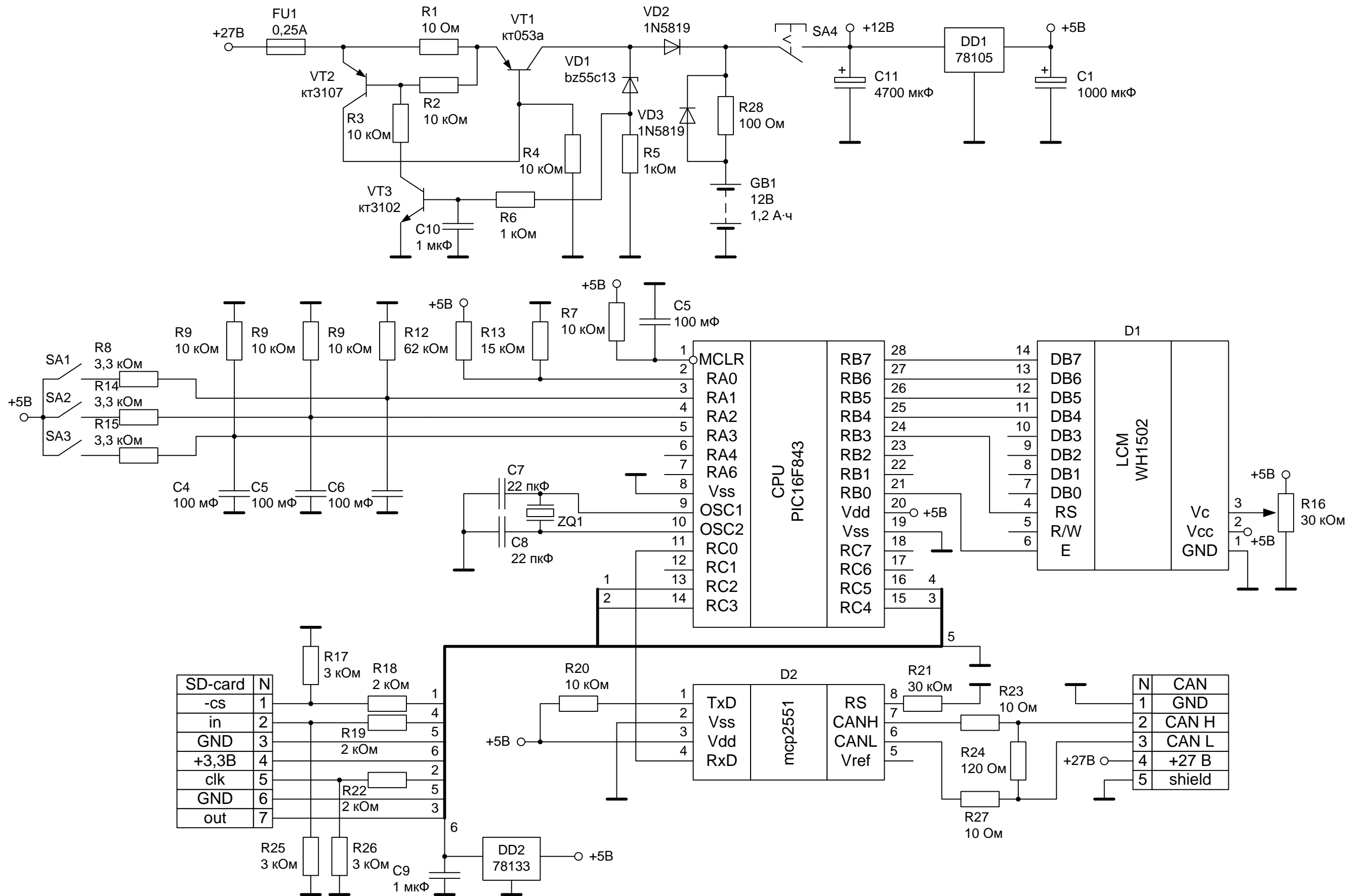


Рисунок 3.3 – Принципиальная схема регистратора

Упрощенный алгоритм внешнего цикла представлен на рисунке 3.4.

После паузы Power On Reset (POR) при подаче напряжения питания на микроконтроллер выполняется стартовая инициализация таймера TMR0, задающего задержку между записью пакетов данных в файл. Далее следует инициализация LCD индикатора, выполненного на основе контроллера HD44780. Затем следует стартовая загрузка регистра управления FAT_REG, в которой указывается инициализация SD Card и режим «Stop».

После этого выполняется процедура приёма одного из множества пакетов данных CAN протокола, производится отбор пакетов на соответствие требуемым. Если код пакета соответствует заданному, выполняется процедура Binary Code to Decimal (BCD), преобразующая двоичный код в десятичный.

До времени, меньшего значения задержки, заданной сервисным режимом, следует повтор процедуры CAN с последующим отбором пакетов. По истечении времени задержки следует процедура LCD, отображающая полученные данные на экран.

После её выполнения следует опрос состояния клавиатуры и результат заносится в регистр управления FAT_REG. Состояние регистра FAT_REG, полученное по результатам опроса клавиатуры, определяет дальнейший сценарий: открытие нового файла или запись данных в уже открытый при поданной команде записи, либо игнорирование записи при поданной команде паузы, либо выполнение процедуры закрытия файла по команде останова.

Далее следует возврат на процедуру CAN, и процесс отбора пакетов повторяется. Таким образом, цикл мониторинга данных замыкается.

Полученная информация записывается в электронном виде на карту памяти в формате .CSV, откуда она может быть скопирована на персональный компьютер и в дальнейшем обработана при помощи Excel либо специализированной программы. Регистратор оснащен аккумулятором, поддерживающим его работоспособность в случае кратковременного прекращения питания. В случае длительного прекращения питания регистрация данных прекращается и возобновляется автоматически при восстановлении питания. Считанные данные

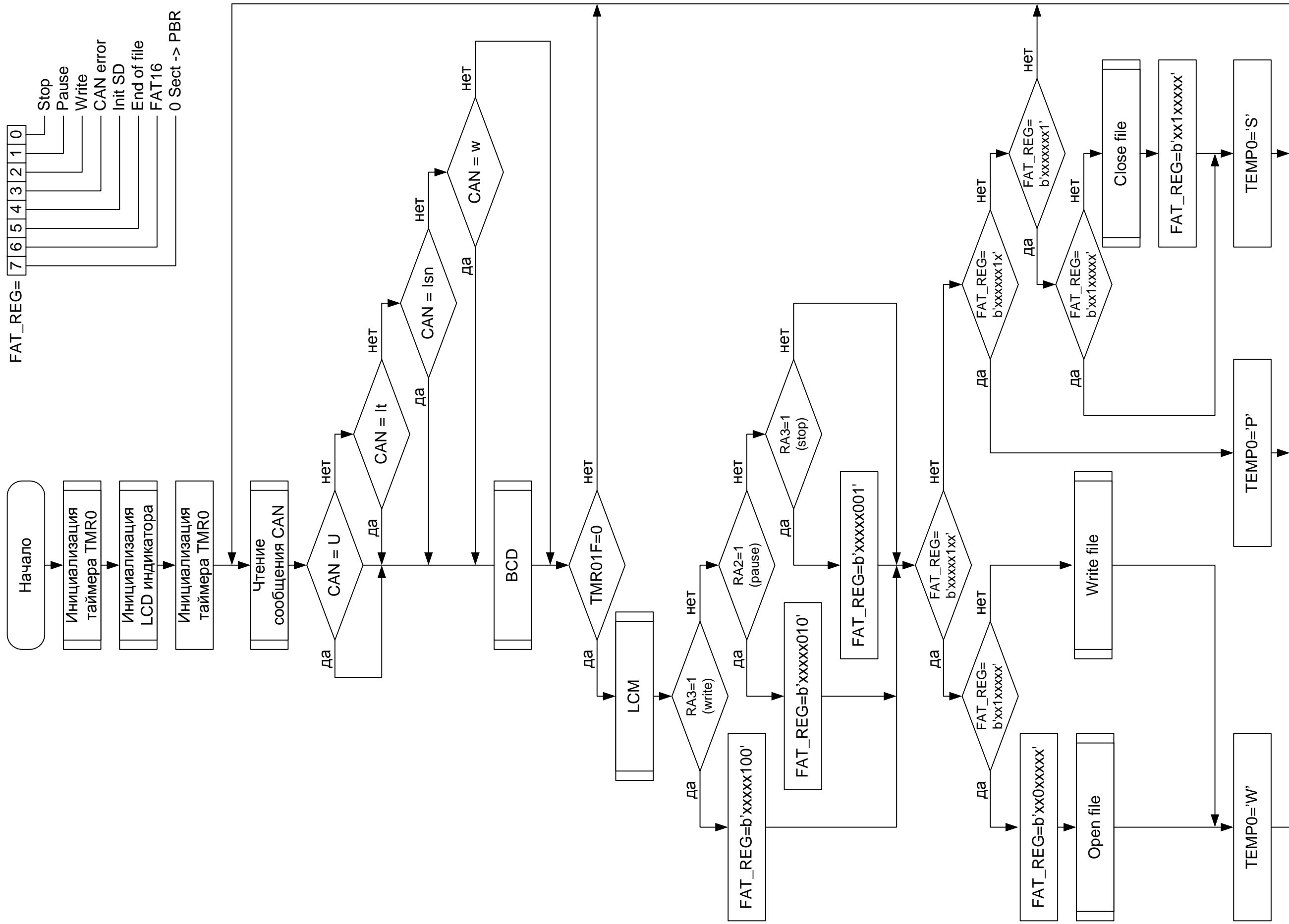


Рисунок 3.4 – Алгоритм работы внешнего цикла программы регистратора

записываются в виде отдельных файлов. Запись нового файла начинается при возобновлении питания, а также в случае непрерывной записи в течение 24 часов. Внешний вид регистратора показан на рисунке 3.5.



Рисунок 3.5 – Внешний вид бортового регистратора режимов движения

Всего было выполнено три серии регистрации режимов движения. В каждой из них регистратор фиксировал работу троллейбуса на протяжении одной недели. Установка и снятие прибора выполнялись при прохождении троллейбусом планового технического обслуживания (ТО-1). Наблюдения выполнены в феврале, марте и июне, что позволило сравнить режимы движения и потребление энергии троллейбусом в широком диапазоне температур. Всего было исследовано 210 рейсов троллейбуса, в которых зафиксировано около $2 \cdot 10^6$ мгновенных значений скорости движения.

3.3 Программный комплекс для анализа режимов движения троллейбуса

Для анализа результатов, полученных при помощи регистратора, разработано специализированное программное обеспечение, позволяющее просматривать зависимости регистрируемых величин от времени, вычислять интегральные величины, характеризующие расход энергии, и анализировать

режимы движения троллейбуса на выбранном участке. Общий вид окна специализированной программы показан на рисунке 3.6. Пример построенного с её помощью графика скорости движения троллейбуса в зависимости от времени для четырех рейсов троллейбуса приведен в приложении Б.

Программой предусмотрены несколько режимов работы. При просмотре исходных файлов, записанных при помощи регистратора, отображаются зависимости от времени тока тягового преобразователя и собственных нужд, напряжения контактной сети и скорости движения троллейбуса. При загрузке данных возможно задать время начала записи, а также ввести поправочный коэффициент, учитывающий отклонение скорости записи от 2 точек в секунду. Фактическое время начала и скорость записи определяются по данным эксплуатируемой на городском пассажирском транспорте навигационной диспетчерской системы, которая автоматически фиксирует время прохождения троллейбусом контрольных точек маршрута. Пример отчета о прохождении контрольных точек показан на рисунке 3.7. В таблице перечислены сокращенные наименования контрольных точек (например, «ГорАэ» – «Городской аэропорт», «Ленин» – «Улица Ленинградская»), ожидаемое время прохождения троллейбусом точки по графику и величина опоздания в минутах (отрицательное опоздание соответствует опережению графика). Если троллейбус не проходил контрольную точку, проставляется отметка об отсутствии информации.

Моменты отстоя троллейбуса на конечных остановках маршрута на графиках, полученных при помощи бортового регистратора, определяются по зависимости скорости от времени (длительные стоянки), а также по изменениям среднего уровня напряжения контактной сети, различающегося на протяжении маршрута по причине неравномерной загрузки тяговых подстанций, различного сопротивления фидеров и контактной сети.

Сравнение длительности рейсов по данным навигации свидетельствует о возможности накопления в течение дня суммарной ошибки до 30 минут (3,4%). Пример зависимости разности времен прохождения конечных остановок по данным регистратора и навигационной системы приведен на рисунке 3.8. После

вычисления корректирующего коэффициента при повторной загрузке данных может быть внесена необходимая поправка.

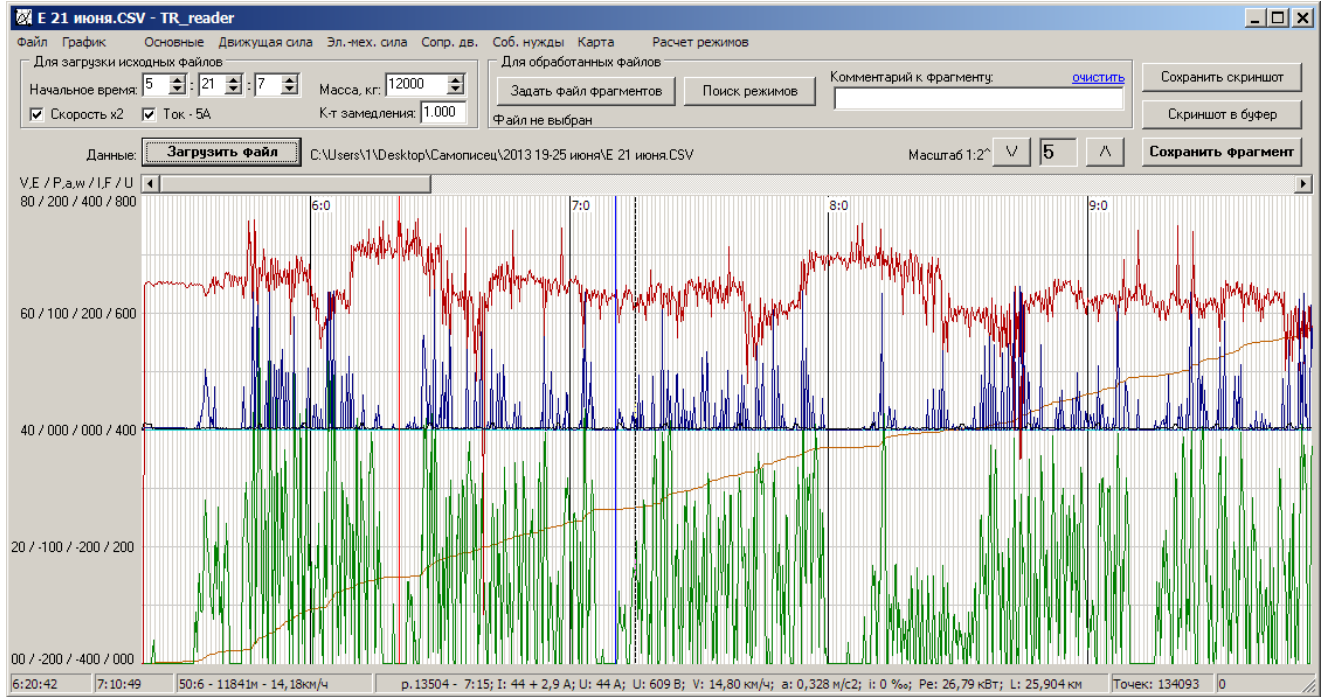


Рисунок 3.6 – Интерфейс программы для просмотра и анализа записей

05.03.2013 Т6-1 Форма 21

Подробный отчет о работе водителя за 04.03.2013

Гос. номер - 3314				Гараж. номер - 3314				Таб. номер - 7949							
Марш. гр. - 5				График - 6				Смена - 2							
Начало работы - 14:39				Окончание работы - 23:17											
КП	ПлВр	От.КП	РС.	КП	ПлВр	От.КП	РС.	КП	ПлВр	От.КП	РС.	КП	ПлВр	От.КП	РС.
ГорАэ	14:39	=0P		ГПНТБ	18:07	=0P		МКрПр	21:03	=0P		Т6-1	23:19	НетИВ	<<<
ГорАэ	15:07	=0P	Per	Ленин	18:33	=0P		МЗаел	21:09	=0P		ГорАэ	23:14	НетИВ	Нэч
МЗаел	15:22	=0P		Ленин	18:37	2P	Per	ГорАэ	21:20	=0P		МЗаел	23:24	НетИВ	
МКрПр	15:37	OM		ГПНТБ	18:49	-1P		ГорАэ	21:53	=0P	Per	МКрПр	23:30	НетИВ	
ГПНТБ	15:53	=0P		МКрПр	19:05	-3P		МЗаел	22:03	=0P		ГПНТБ	23:42	НетИВ	
Ленин	16:10	2P		МЗаел	19:23	2P		МКрПр	22:09	=0P		Ленин	23:53	НетИВ	
Ленин	16:13	2P	Per	ГорАэ	19:31	=0P		ГПНТБ	22:20	=0P		Ленин	23:57	НетИВ	Нэч
ГПНТБ	16:25	=0P		ГорАэ	19:50	1P	Per	Ленин	22:29	=0P		ГПНТБ	24:08	НетИВ	
МКрПр	16:41	=0P		МЗаел	20:01	-2P		Ленин	22:34	=0P	Per	МКрПр	24:19	НетИВ	
МЗаел	16:58	=0P		МКрПр	20:07	-3P		ГПНТБ	22:43	=0P		МЗаел	24:28	НетИВ	
ГорАэ	17:06	-2P		ГПНТБ	20:23	=0P		МКрПр	22:55	=0P		ГорАэ	24:36	НетИВ	
ГорАэ	17:16	=0P	Per	Ленин	20:35	2P		МЗаел	22:58	=0P		ГорАэ	23:12	НетИВ	
МЗаел	17:37	=0P		Ленин	20:39	=0P	Per	ГорАэ	23:11	OM		Т6-1	23:17	НетИВ	<<<
МКрПр	17:43	-2P		ГПНТБ	20:51	2P		ГорАэ	23:14	OM					

	Рейсы			%	Пробег общий	Пробег лин	Время наряд	Время отст	Время лин
	Все	Веч	Ноч						
Плн	10,00	0,00	0,00	100,00	124,6	123,8	07:49	00:47	07:44
Фкт	8,00	0,00	0,00	80,00	97,12	96,32	08:21	00:19	08:16
Рпл	8,00	0,00	0,00	80,00					

Рисунок 3.7 – Пример отчета о прохождении контрольных точек

При просмотре графиков доступны их масштабирование и перемещение. При перемещении курсора мыши над графиком для текущей точки отображаются

её порядковый номер, время и зафиксированные в этот момент значения регистрируемых величин. При просмотре исходных файлов регистратора на графике при помощи мыши может быть выделен фрагмент произвольной длины. Для выделенного фрагмента рассчитываются длительность, пробег троллейбуса (интегрированием зависимости скорости от времени) и средняя скорость.

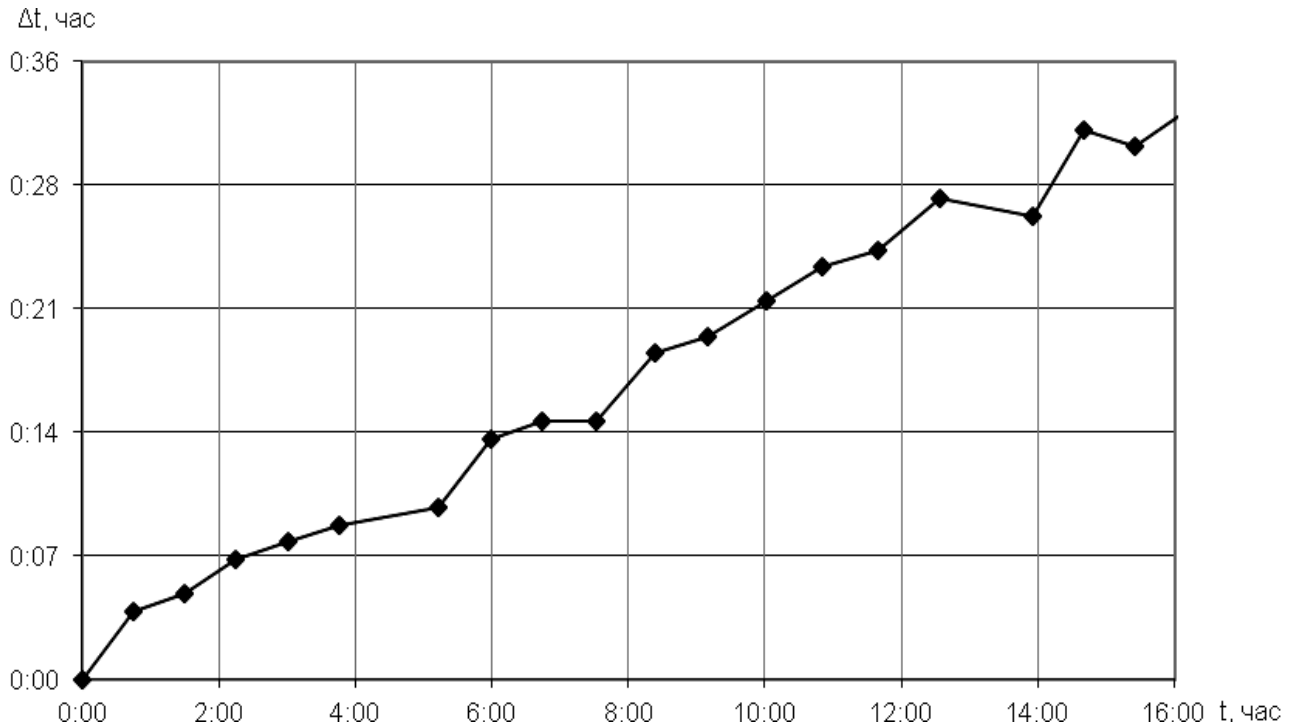


Рисунок 3.8 – Пример расхождения времен прохождения конечных остановок Δt по данным регистратора и навигационной системы

Для выделенного фрагмента могут быть вычислены величины, зависящие от непосредственно измеренных. На основании данных о скорости движения возможно вычислить ускорение и пройденный путь, а данные о токе и напряжении позволяют определить потребляемые из сети тяговым приводом и потребителями собственных нужд мощность и энергию. Для заданного значения массы троллейбуса возможно также вычисление силы тяги и работы по перемещению троллейбуса, но по причине отсутствия достаточно точной информации о массе машины и уклонах на маршруте значения последних двух величин невозможно найти с достаточной точностью. Все вычисленные значения сохраняются в файле формата .CSV, который может быть просмотрен либо с

использованием Excel (если длительность фрагмента не превышает $2^{15} = 32\,768$ точек, что соответствует примерно 8 часам), либо самой программы для обработки записей регистратора.

Кроме того, программой предусмотрены возможности для анализа записей. Для выделенных фрагментов анализируемой записи могут быть определены и сохранены в отдельный отчет начальное и конечное значение скорости, пройденный путь, длительность фрагмента, потребление электрической энергии, средние интегральные и наибольшие значения ускорения, тока, напряжения сети и текстовый комментарий. Таким образом, становится возможным выделить и исследовать, например, потребление энергии в отдельных рейсах либо величину энергии актов торможения.

Также предусмотрена возможность автоматической классификации режимов движения. При этом анализируемый участок разбивается на фрагменты, соответствующие нахождению троллейбуса в одном из режимов: стоянка, повторный пуск, торможение, выбег, пуск с остановки, торможение до остановки. Отдельный участок выделяется, если критерий нахождения троллейбуса в одном из режимов выполняется не менее чем для 2 точек на записи, что необходимо для отбрасывания случайных колебаний фиксируемых величин. Приняты следующие критерии различения режимов движения: остановка – скорость менее заданной (по умолчанию 3,5 км/ч), пуск – тяговый ток не менее заданного и ускорение не менее заданного (по умолчанию 10 А и $0,1 \text{ м/с}^2$), торможение – замедление свыше заданного (по умолчанию используется замедление, рассчитанное по эмпирическим формулам для случая торможения троллейбуса под действием сил основного сопротивления движению [108]), выбег – все прочие случаи.

Предусмотрена возможность изменения перечисленных параметров. Для каждого из участков фиксируются код режима движения, значения начальной и конечной скорости, длительность фрагмента и среднее ускорение.

3.4. Статистический анализ процесса потребления мощности тяговым электроприводом

Совершенствование производителем систем управления троллейбусов привело к созданию различных версий систем управления, отличающихся форматом передачи данных. Это ограничивает возможность установки регистратора на другие троллейбусы, поэтому в ходе работы режимы движения были исследованы на одной машине, постоянно осуществлявшей перевозки пассажиров по одному маршруту в Новосибирске, что, в свою очередь, препятствует обобщению результатов наблюдения и применения их в условиях других маршрутов и городов.

Поскольку система управления троллейбусом не позволяет непосредственно зафиксировать мощность тягового электропривода в режиме торможения, значения мгновенной мощности были получены расчетным путем на основании зависимости $V(t)$ способом, описанным в главе 2. На рисунке 3.9 приведен пример зависимости расчетной мощности тягового электропривода транспортного средства от времени. Отрицательные значения мощности соответствуют выработке энергии в режиме торможения, а положительные – потреблению энергии в режиме тяги.

Поскольку условия дорожного движения, влияющие на выбор водителем режима работы электропривода, случайны, то и процесс потребления мощности можно рассматривать как случайную функцию. Результаты исследования циклов движения на одном транспортном средстве в течение длительного промежутка времени могут быть распространены на всю их совокупность в случае, если процесс потребления мощности является стационарным и эргодичным. Стационарность здесь рассматривается «в широком смысле», что означает, что математическое ожидание случайного процесса не зависит от времени, а корреляционная функция зависит только от разности моментов времени. Поэтому для дальнейшего использования полученных результатов необходимо выполнить проверку его свойств. Для этого были использованы методы, описанные в [109].

Для проверки процесса потребления мощности тяговым электроприводом на стационарность был применен следующий алгоритм:

1. Реализация разделена на N интервалов, в предположении, что наблюдения в различных интервалах являются независимыми.
2. Определены математическое ожидание и дисперсия для каждого интервала.
3. Определено число серий полученных значений, являющихся большими или меньшими средних значений, рассчитанных для реализации случайного процесса.

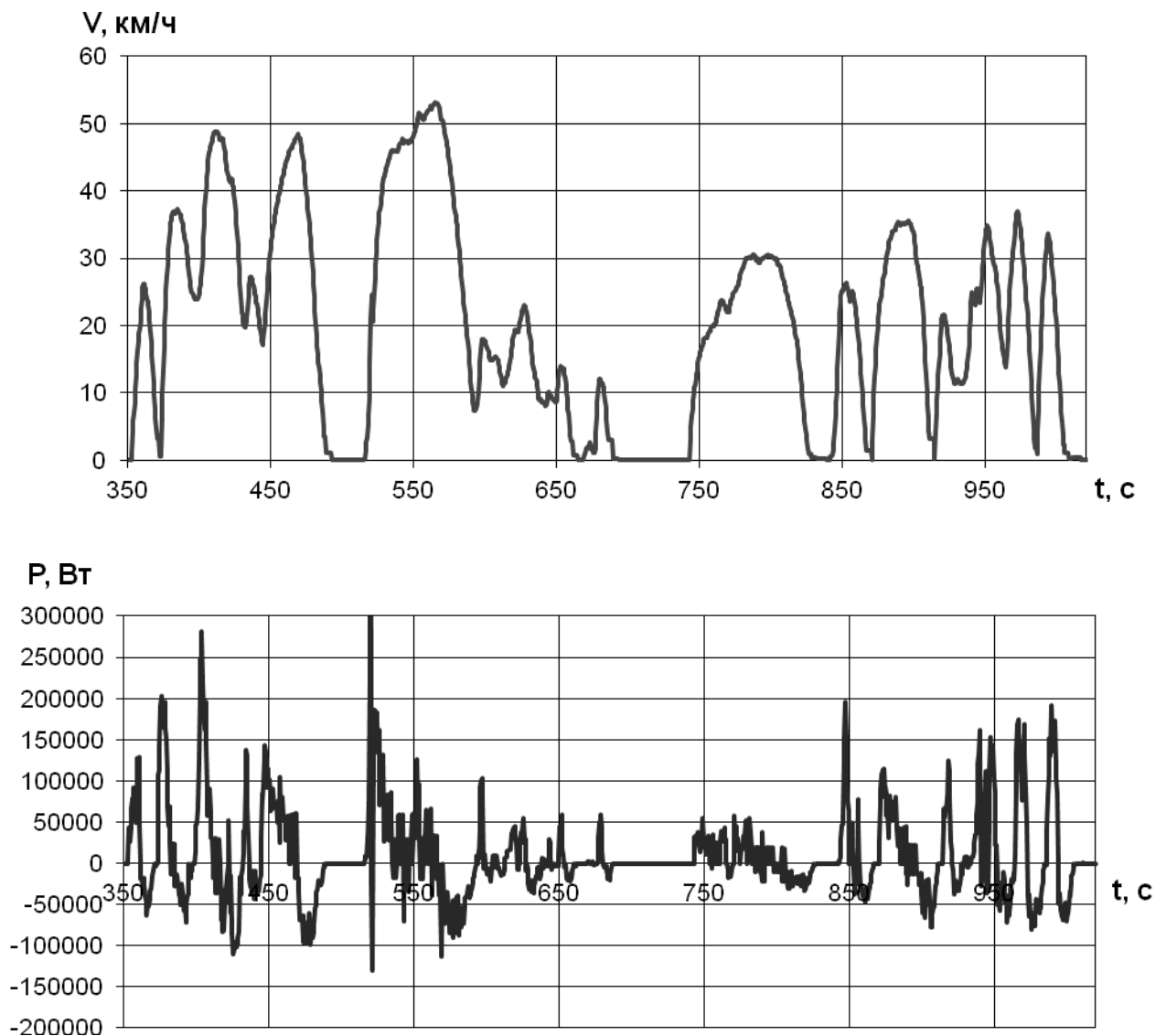


Рисунок 3.9 – Зависимость скорости движения транспортного средства и мощности его тягового электропривода от времени

4. При заданном уровне значимости α выполнено сравнение найденных числа серий r с граничными значениями $r_{n;1-\alpha/2}$ и $r_{n;\alpha/2}$, где $n = N / 2$.

Для доказательства стационарности случайного процесса использован критерий серий. Для соответствующих реализаций найдены медианные значения выборочного среднего и выборочного среднего значения квадрата случайного процесса. Если обозначить значения, большие своей медианы, знаком «+», а меньшие – знаком «-», то будет получена последовательность наблюдений, имеющих знак «минус» или «плюс». Серией называется последовательность одинаковых наблюдаемых значений, перед которыми или после которых находятся значения другой категории или наблюдения отсутствуют.

Для проверки гипотезы о стационарности процесса при заданном уровне значимости α необходимо выполнить сравнение наблюдаемого числа серий с граничными значениями $r_{n;1-\alpha/2}$ и $r_{n;\alpha/2}$. Если указанное число серий не выходит за границы этого интервала, то случайный процесс можно считать стационарным. Для выполнения проверки одна из реализаций случайного процесса по среднему значению была разбита на $N = 30$ интервалов. Медианное значение составило 19152 Вт. Расчётные значения для каждого интервала приведены в таблице 3.1. Гипотеза о стационарности процесса по среднему значению может быть принята при уровне значимости $\alpha = 0,05$, если последовательность серий находится в интервале от $r_{15;1-\alpha/2} = 10$ до $r_{15;\alpha/2} = 21$. Как видно из таблицы 1.1, последовательность серий равна 13. Таким образом, случайный процесс $P(t)$ можно считать стационарным по среднему значению.

Для окончательной проверки гипотезы о стационарности случайного процесса вычислены корреляционные функции для различных участков его реализации. На рисунке 3.10 показано семейство корреляционных функций, показывающее выполнение условий стационарности в широком смысле случайных процессов. Необходимым и достаточным условием эргодичности случайного процесса является его стационарность и метрическая транзитивность, проверка которой весьма затруднительна. Но если удовлетвориться слабой эргодичностью процесса, то в предположении, что закон их распределения близок

к нормальному, доказательство может быть существенно упрощено [109]. Достаточное условие эргодичности случайного процесса заключается в том, чтобы значения автокорреляционной функции $R(\tau, k)$ для различных реализаций были одинаковыми при разных значениях k , где k – индекс реализации, что подтверждается рисунком 3.10.

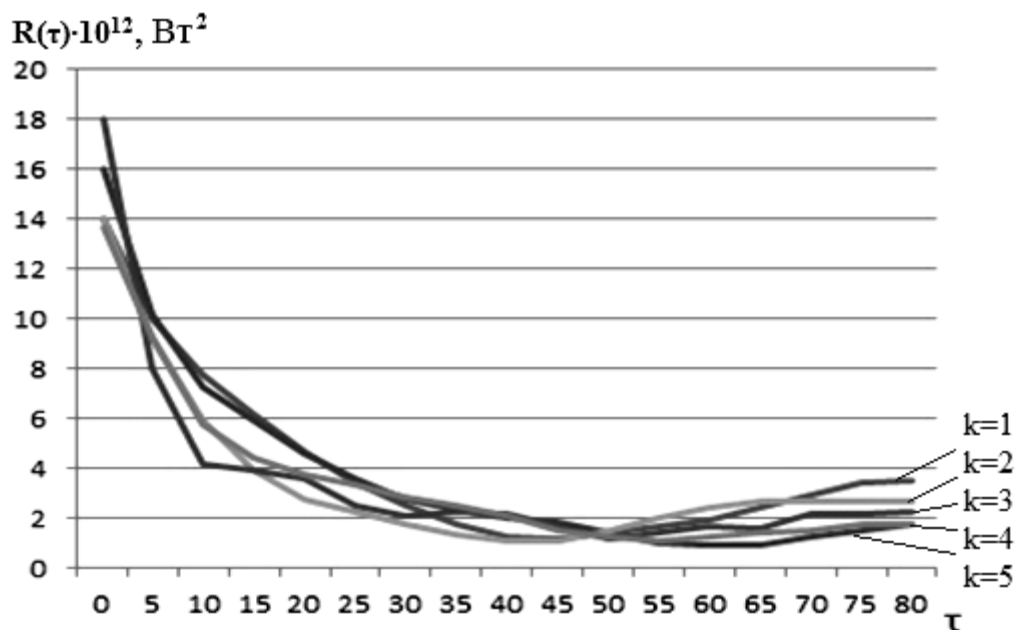


Рисунок 3.10 – Корреляционные функции случайного процесса потребления мощности тяговым электроприводом

Выполнение условий стационарности и эргодичности процесса потребления мощности тяговым электроприводом подтверждает достаточность полученного объема экспериментальных данных и возможность использования их для определения основных характеристик элементов гибридного тягового привода.

По полученным в результате расчета зависимостям потребляемой тяговым электроприводом мощности от времени получен эмпирический закон распределения мощности. Гистограмма плотности вероятности потребляемой тяговым приводом мощности приведена на рисунке 3.11.

Согласно полученным результатам, доля времени нахождения троллейбуса в режиме тяги составила 44,7 %, в режиме торможения 15,5 %, а в режиме выбега и стоянки – 39,8 %. Полученные результаты согласуются с результатами

измерений, выполненных в 2001 г. [17, 24] и показавших долю времени нахождения в режиме тяги 32 % и в режиме торможения 18 %.

Таблица 3.1 – Результаты расчёта стационарности случайного процесса по среднему значению и дисперсии

№	Среднее значение		Последовательность серий	Дисперсия		Последовательность серий
1	16731,38	-	1	1446748702	-	1
2	14691,69	-		1350330028	-	
3	21071,15	+	2	2231608837	+	2
4	18830,33	-	3	2094996003	+	
5	22647,65	+	4	2224948989	+	
6	21812,3	+		2782035533	+	
7	22724,01	+		3046909895	+	
8	16550,86	-	5	1630299898	-	3
9	14414,71	-		1018231640	-	
10	19955,71	+	6	2069497934	+	4
11	13394,1	-	7	1231246908	-	5
12	16440,35	-		1490748137	-	
13	20286,79	+	8	2043295652	+	6
14	22149,7	+		2409038122	+	
15	21709,92	+		2270317480	+	
16	19473,12	+		2191665365	+	
17	16378,99	-	9	1774841980	-	7
18	19601,45	+	10	2311267006	+	8
19	22176,64	+		2741370590	+	
20	16184,32	-	11	1386538278	-	9
21	18718,75	-		1773917923	-	
22	15790,01	-		1373612594	-	
23	16480,66	-		2480636188	+	
24	23376,93	+	12	3756664714	+	10
25	22255,33	+		2469115671	+	
26	20646,25	+		1898971959	-	11
27	20099,15	+		1987653850	-	
28	16782,25	-	13	1549717003	-	
29	17310,27	-		1463966359	-	
30	15952,82	-		1285664162	-	

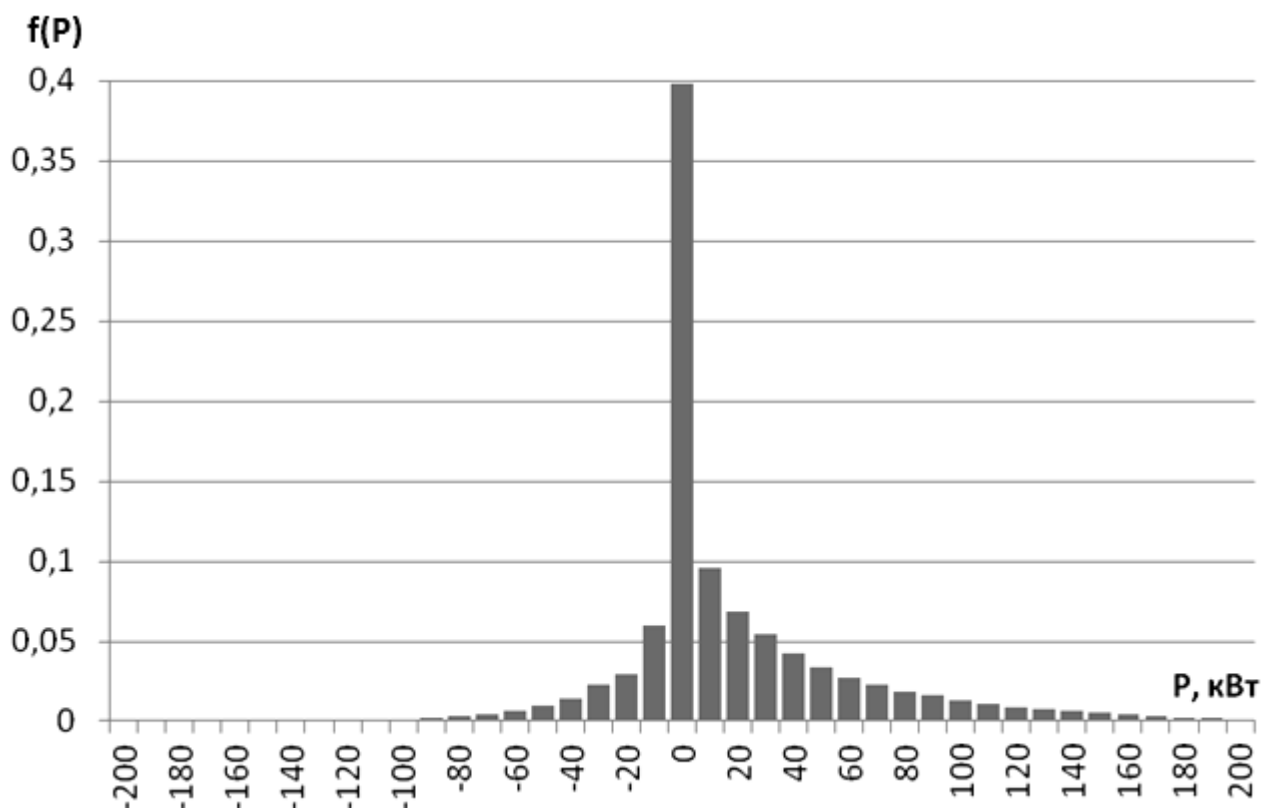


Рисунок 3.11 – Гистограмма распределения мощности тягового электропривода по времени

Несколько меньшая доля нахождения машины в режиме тяги может объясняться тем, что тяговый электропривод троллейбуса с импульсной системой управления обладает возможностью длительной работы электропривода с малой мощностью в отличие от троллейбуса с реостатно-контакторной системой управления (РКСУ). Распределение мощности тягового электропривода может быть приближенно описано нормальным законом со средним значением 18,5 кВт и стандартным отклонением 44,1 кВт. Распределение режимов работы тягового привода по доле отдаваемой и потребляемой энергии показано на рисунке 3.12.

3.5 Потребление энергии троллейбусом

На рисунке 3.13 показаны примеры кривых движения троллейбуса в различных режимах. 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. Так как импульсная система управления позволяет произвольно выбирать силу тяги двигателя, водители предпочитают не использовать режим выбега при движении. Водители также, как правило, выполняют разгон и торможение с относительно низкими ускорениями (около $0,5 \text{ м/с}^2$), не используя полную мощность двигателя.

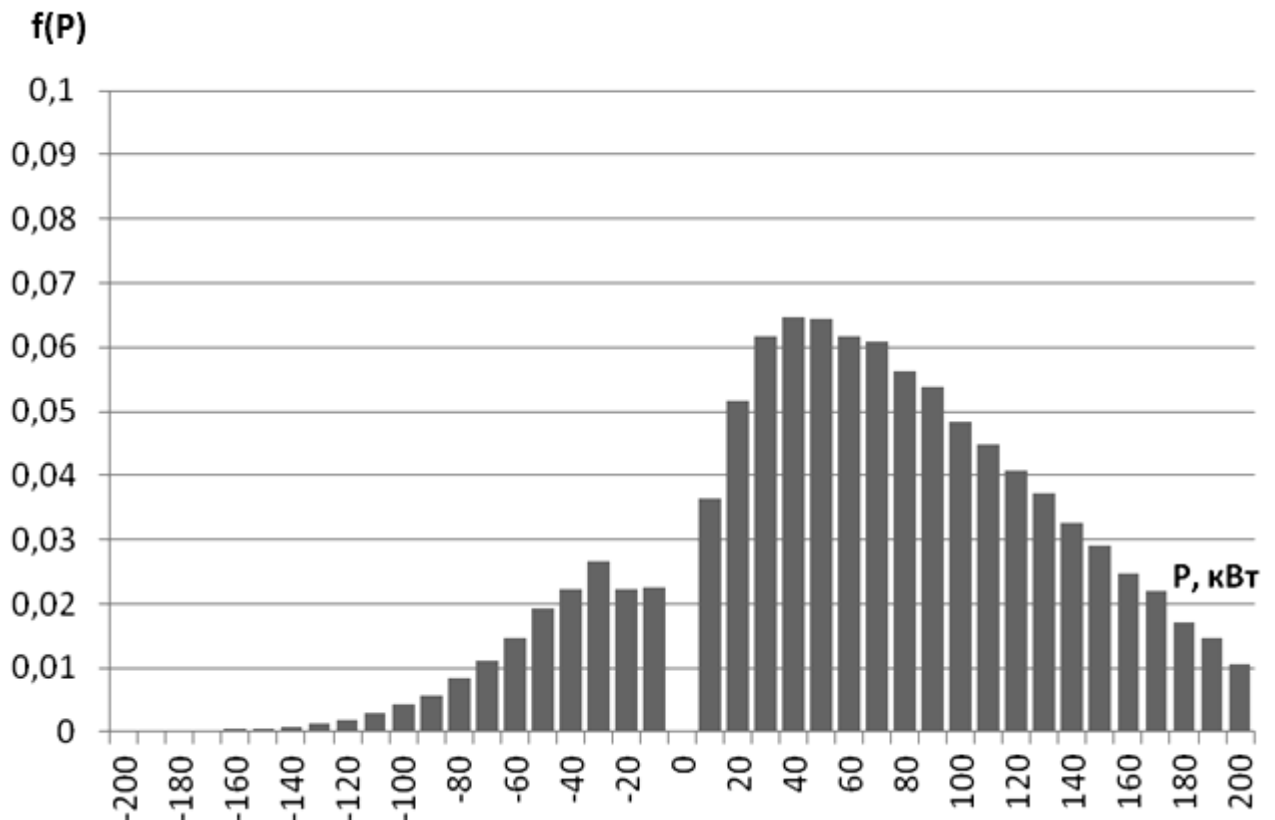
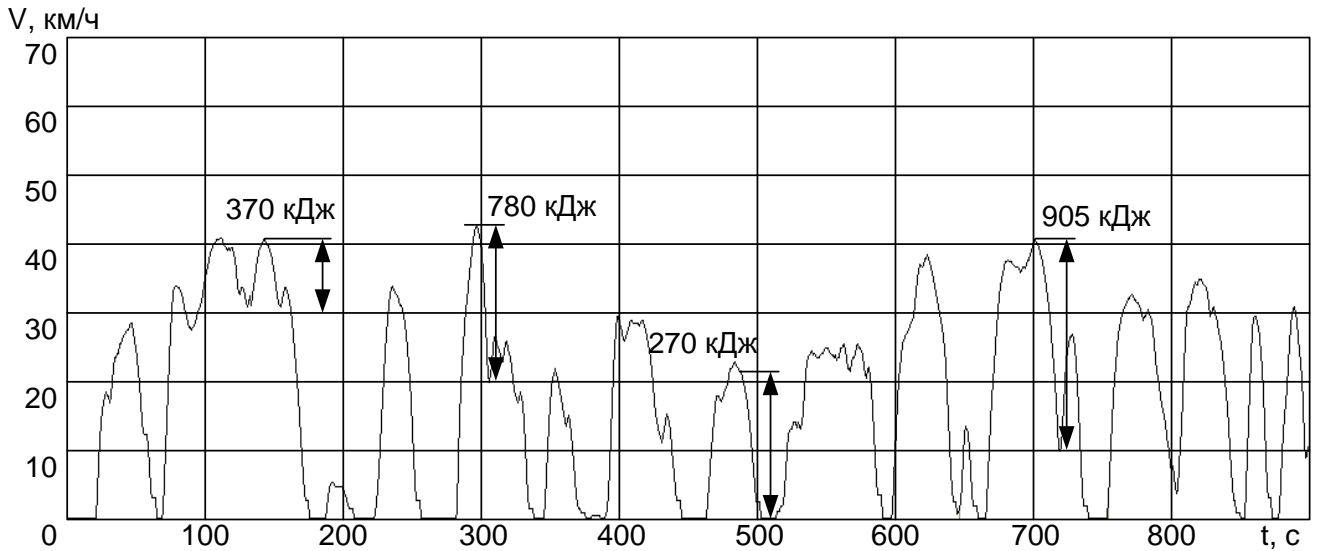


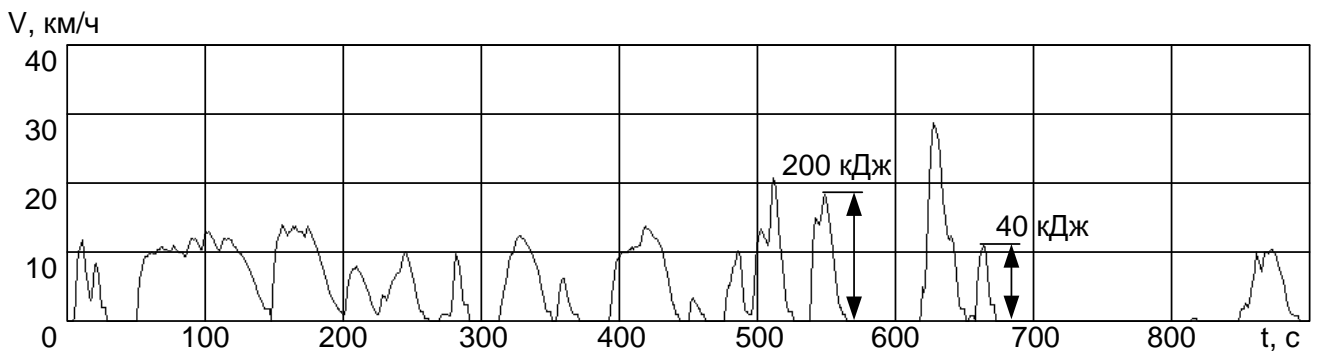
Рисунок 3.12 – Гистограмма распределения режимов работы тягового привода по доле отдаваемой и потребляемой энергии

Не во всех случаях торможение производится до полной остановки. Средняя скорость начала торможения составляет 23,2 км/ч, завершения – 6,7 км/ч, в то время как расчетные скорости начала торможения лежат в диапазоне 27 ... 38 км/ч [17]. По величинам скоростей начала и окончания актов торможения

для среднего значения массы троллейбуса и без учета влияния уклонов (что может быть допущено в условиях равнинного профиля) была оценена кинетическая энергия, поглощаемая при торможении. Распределение её по величине показано на рисунке 3.14.



а)



б)

Рисунок 3.13 – Примеры записанных при помощи регистратора кривых движения троллейбуса: а – на свободной дороге, б – в заторе. На рисунке приведена энергия некоторых актов торможения

Если энергоёмкость БНЭ ограничена, то он будет способен полностью принять энергию торможения, если её количество не превосходит энергоёмкость БНЭ. При попытке передать накопителю большее количество энергии после достижения предельного напряжения на конденсаторе непринятая часть энергии будет рассеяна на реостатах, как это делается в настоящее время при

невозможности рекуперативного торможения. Зная, как распределена энергия торможения, можно определить долю вырабатываемой при торможениях энергии β , которую БНЭ способен принять:

$$\beta = \int_{E < E_{\text{БНЭ}}} p(E) dE + \int_{E > E_{\text{БНЭ}}} \frac{E_{\text{БНЭ}}}{E} p(E) dE, \quad (3.1)$$

где $p(E)$ – вероятность, что энергия торможения примет значение E ;

$E_{\text{БНЭ}}$ – емкость буферного накопителя энергии.

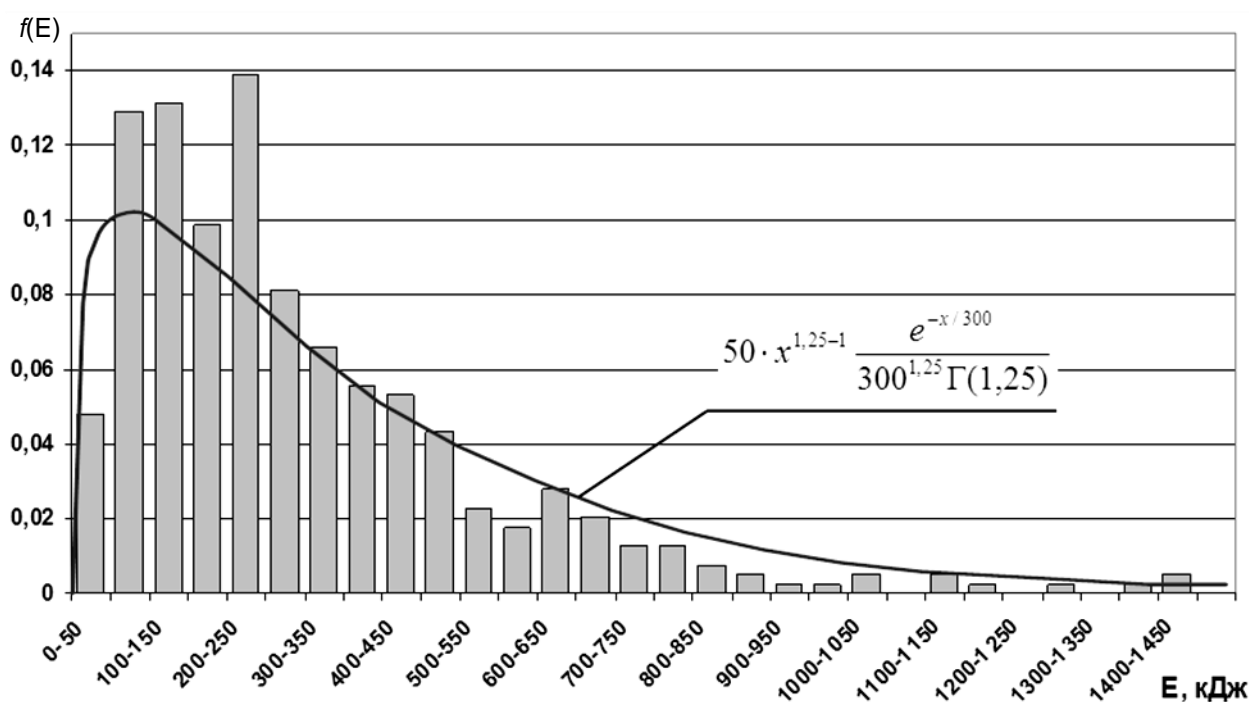


Рисунок 3.14 – Распределение величины кинетической энергии, рассеиваемой при торможении

Результат расчета показан на рисунке 3.15. Начиная с энергоемкости 300...500 кДж дальнейшее увеличение емкости БНЭ не приводит к существенному росту доли запасаемой в нем энергии. Действительно, чем выше энергия торможения и, соответственно, величина непринятой накопителем энергии, тем ниже вероятность торможения, при котором эта энергия могла бы быть выработана.

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 количество торможений – в 2-3 раза выше. С одной стороны, это означает снижение доли расходуемой подвижным составом энергии, которая могла бы быть сэкономлена в случае повторного её использования. Но, с другой стороны, создается возможность для значительного снижения энергоемкости, а значит, и стоимости БНЭ, что сократит срок его окупаемости. Таким образом, энергоемкость накопителя, рассчитанного на прием энергии торможения, может быть принята равной 400 кДж.

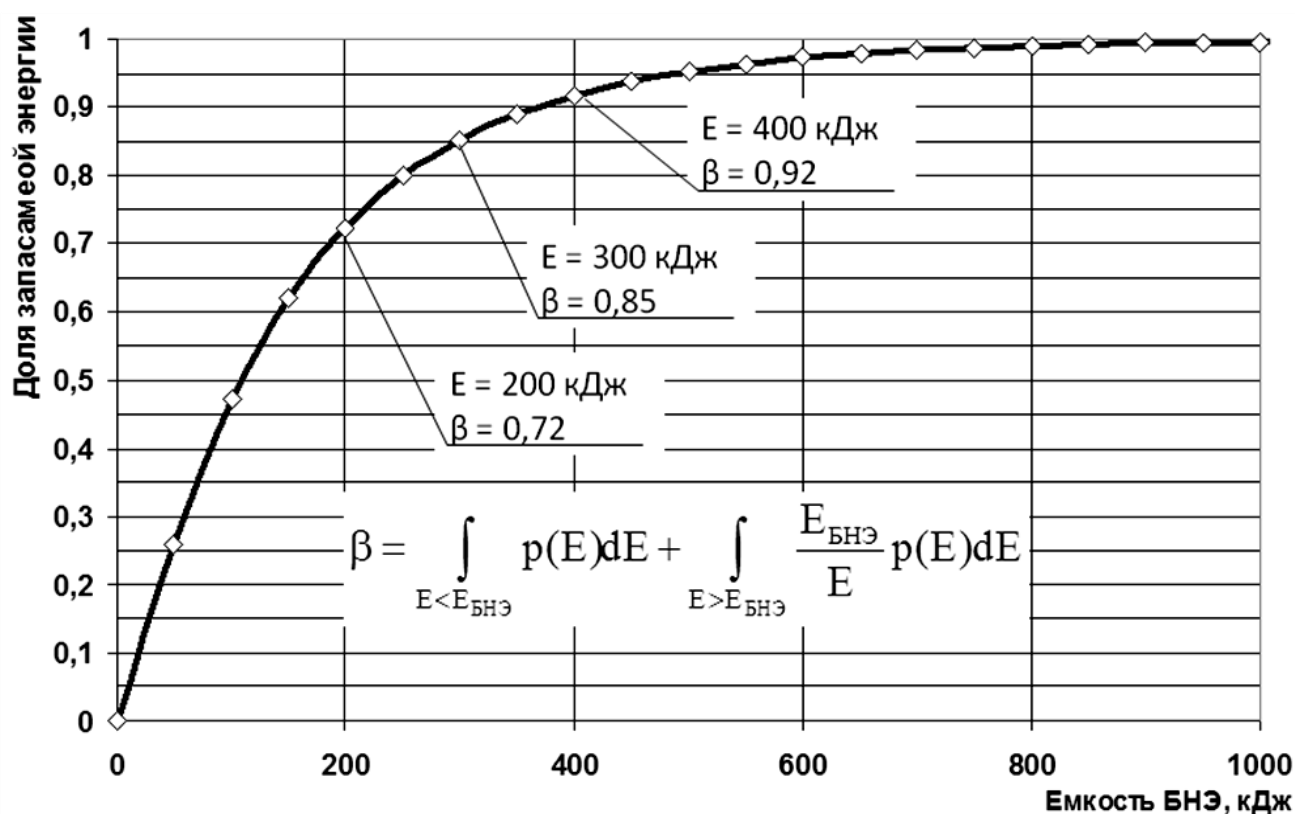


Рисунок 3.15 – Зависимость доли запасаемой энергии торможений от емкости БНЭ

На рисунке 3.16 показана гистограмма распределения зафиксированных регистратором мгновенных скоростей троллейбуса. Гистограмма распределения скоростей имеет несколько максимумов. Во-первых, значительную часть времени троллейбус не движется, и точки с нулевой скоростью выделены на гистограмме в отдельный столбец. Во-вторых, гистограмма имеет несколько максимумов в

областях скоростей, движение с которыми осуществляется длительное время. Это скорости около 5 км/ч, с которыми выполняется маневрирование при подъезде к остановкам, при обороте на конечных остановках, в заторах. В-третьих, это скорости в диапазоне 20-30 км/ч, которые выдерживаются относительно длительное время при движении в циклах разгона-торможения с преодолеваемым расстоянием 100-200 м.

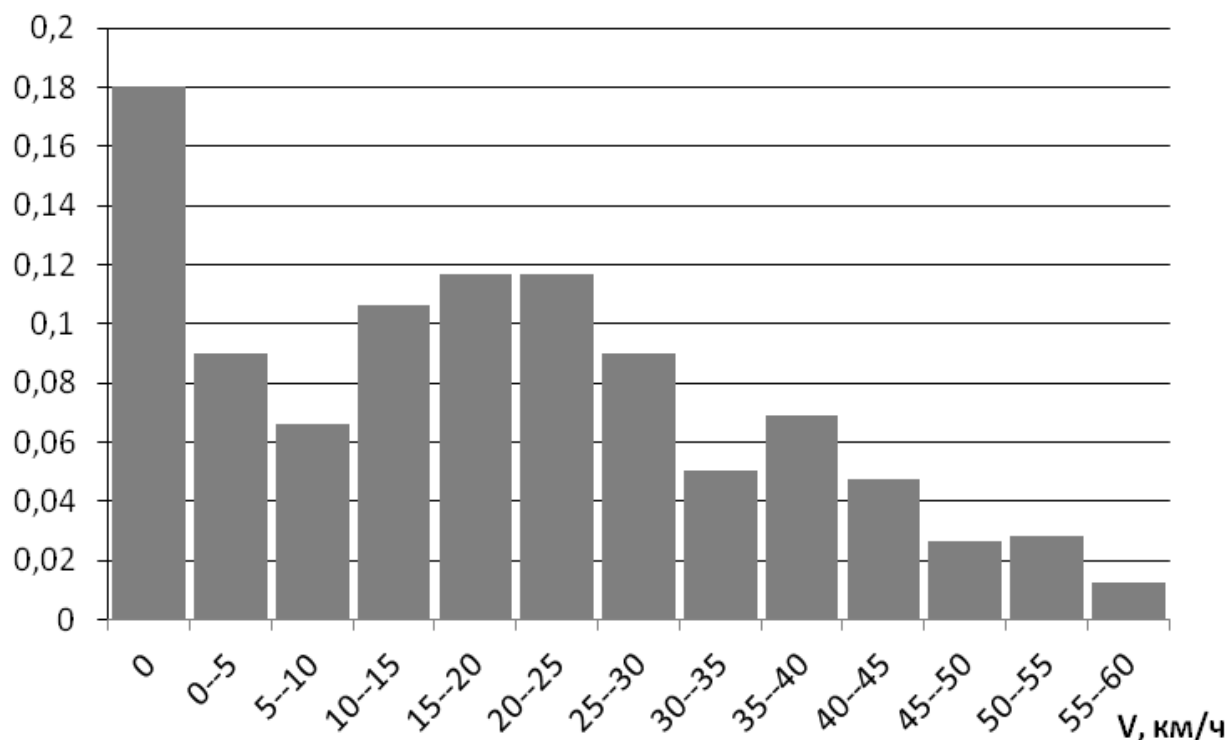


Рисунок 3.16 – Гистограмма распределения мгновенных скоростей троллейбуса в одном из рейсов

На рисунке 3.17 показана зависимость расхода энергии на тягу и собственные нужды от температуры воздуха. Представленные данные подтверждают наличие зависимости обеих величин от температуры.

Снижение расхода энергии на тягу с ростом температуры воздуха может быть объяснено снижением сопротивления движению, отсутствием пробуксовки колес при положительных температурах, а также сокращением числа заторов, что снижает количество пусков. Основным фактором, влияющим на расход энергии на собственные нужды, является изменение количества работающих

отопительных приборов и длительности их включения, необходимых для достижения комфортной температуры воздуха в салоне.

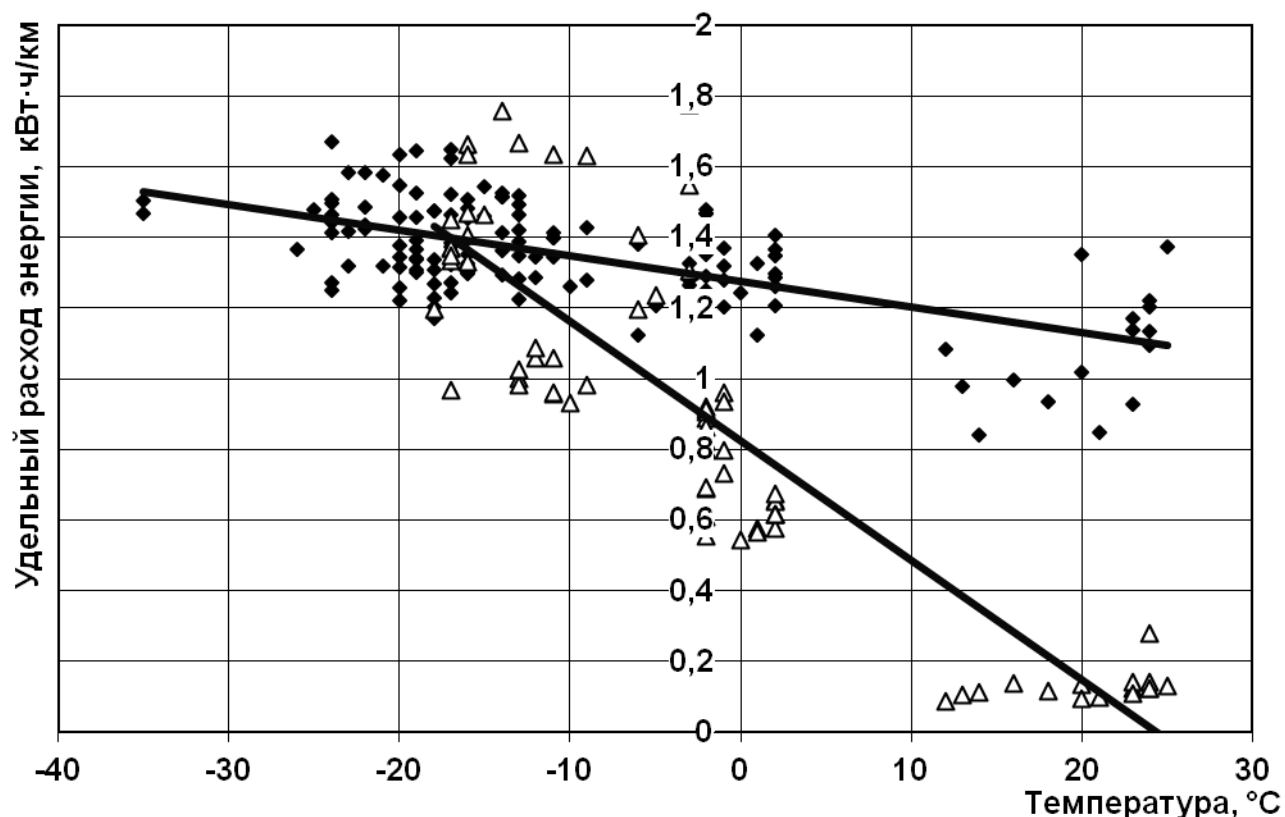


Рисунок 3.17 – Зависимость расхода энергии троллейбусом от температуры воздуха. Черными точками обозначено потребление на тягу, белыми точками – на собственные нужды

Большой разброс измеренных значений позволяет лишь приблизительно представить зависимость расхода энергии от температуры линейной функцией. На графике показаны аппроксимирующие линейные функции, полученные методом наименьших квадратов. Среднее потребление энергии на тягу за 1 км пробега составляет

$$E_T = 1,3 - 0,007 \cdot T \text{ кВт}\cdot\text{ч}, \quad (3.2)$$

а на собственные нужды

$$E_{CH} = 0,8 - 0,035 \cdot T \text{ кВт}\cdot\text{ч}, \quad (3.3)$$

где T – температура воздуха в градусах Цельсия.

Коэффициент достоверности линейной аппроксимации R^2 составляет 0,40

для потребления на тягу и 0,75 для потребления собственных нужд.

Полученные результаты также показывают, что доля потребления энергии на собственные нужды в летнее время составляет около 10 %, а в зимнее может достигать 55 %, то есть в некоторых случаях превышать потребление энергии на передвижение. Указанные зависимости позволяют оценить долю собственных нужд в годовом потреблении энергии троллейбусом как 35 ... 40 %.

Приближенно считая мощность дополнительного и вспомогательного электрооборудования, кроме отопительных приборов, постоянной, можно сделать вывод, что доля потребления энергии отопительными приборами в общем расходе энергии на собственные нужды зимой достигает 80 %. Полученные результаты свидетельствуют, что одним из наиболее важных направлений повышения общей энергетической эффективности пассажирских ТС, особенно эксплуатируемых в климатических условиях Сибири, является сокращение затрат энергии на отопление пассажирского салона. В [26] предложен ряд мер, направленных на решение указанной проблемы.

3.6 Выводы

1. Разработанные бортовой регистратор и программный комплекс для первичной обработки записей позволяют исследовать режимы движения транспортного средства в реальных условиях эксплуатации. С их помощью исследованы записи, охватывающие свыше 200 рейсов троллейбуса, выполненных в различные времена года и дни недели.

2. Доказаны стационарность и эргодичность полученных в ходе эксперимента случайных процессов потребления мощности тяговым электроприводом, что дает основание для проведения исследования циклов движения на одном транспортном средстве в течение длительного промежутка времени.

3. На основании полученного закона распределения величины энергии торможения показано, что для приема 90% вырабатываемой при торможении

энергии достаточно установить накопитель энергоемкостью 400 кДж в случае транспортного средства со стандартной длиной кузова 12 м.

4. По итогам обработки собранного статистического материала подготовлены исходные данные для расчета основных параметров энергетической установки транспортного средства.

4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С КОМБИНИРОВАННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

4.1 Зависимость энергоемкости буферного накопителя от мощности первичного источника энергии

Выбор основных параметров энергетической установки гибридного транспортного средства – мощности его первичного источника энергии и энергоемкости буферного накопителя энергии – требует учета особенностей циклов его движения с использованием методики, подробно рассмотренной в главе 2. Для решения этой задачи в качестве исходных данных были использованы полученные в ходе эксперимента записи скорости движения троллейбуса от времени. При дальнейшем расчете принято, что гибридный автобус, работая по тому же маршруту, двигался бы в аналогичном цикле. Такое предположение можно принять, поскольку анализ записей показал, что водители, как правило, не полностью используют динамические возможности тягового привода. Это означает, что записанные циклы движения определяются не конструктивными особенностями транспортных средств, а дорожной обстановкой, расписанием движения и подобными факторами, не зависящими от вида транспорта и предела его динамических возможностей.

На основании полученных при помощи регистратора записей скорости движения от времени $V(t)$ выполнена оценка запаса энергии БНЭ транспортного средства, движущегося в аналогичном режиме, в течение рейса по выбранному маршруту. В расчете принято, что время междурейсового отстоя маршрутных ТС, составляющее 3-5 минут, является достаточным для заряда БНЭ, и в начале каждого рейса накопитель заряжен до требуемого значения.

При анализе записей отдельные зависимости получены для каждого из рейсов. Полученные значения зависят от условий движения в конкретном рейсе и имеют случайный характер. На рисунке 4.1 показаны пределы изменения требуемой энергоемкости накопителя при разной мощности первичного

источника энергии.

Для каждого из значений мощности генератора получено распределение энергоемкости БНЭ и подобраны показатели функции распределения. Распределение значений в области малых мощностей первичного источника энергии близко к нормальному, а при мощности первичного источника энергии свыше 20 кВт описывается законом гамма-распределения. Поскольку нормальный закон является частным случаем гамма-распределения при больших значениях параметра формы, то для любой мощности первичного источника энергии могут быть определены параметры закона распределения необходимой энергоемкости БНЭ по рейсам.

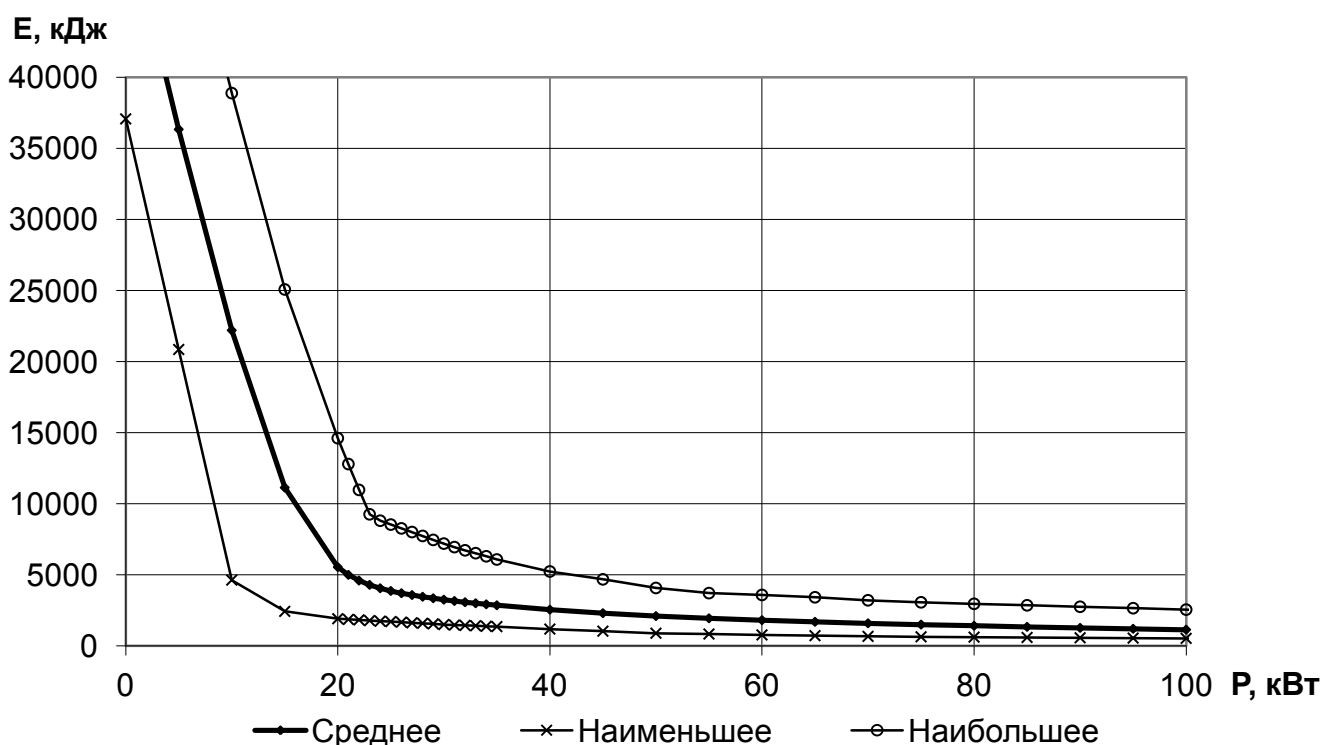


Рисунок 4.1 – Пределы изменения требуемой энергоемкости БНЭ при разной мощности первичного источника энергии

Примеры распределений необходимой энергоемкости БНЭ среди 210 исследованных рейсов при мощности ПИЭ 20 и 60 кВт представлены на рисунках 4.2 и 4.3. Зависимость параметров распределения от мощности первичного источника энергии показана на рисунках 4.4 и 4.5. В приложении В для каждого из рейсов приводятся результаты расчета потребления энергии ТС.

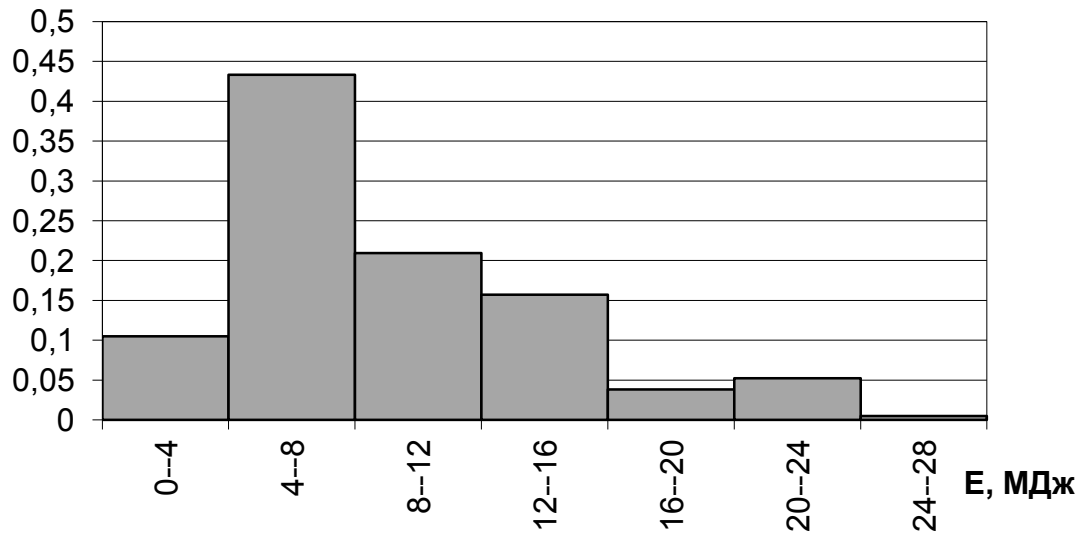


Рисунок 4.2 – Распределение энергоемкости БНЭ при мощности ПИЭ 20 кВт

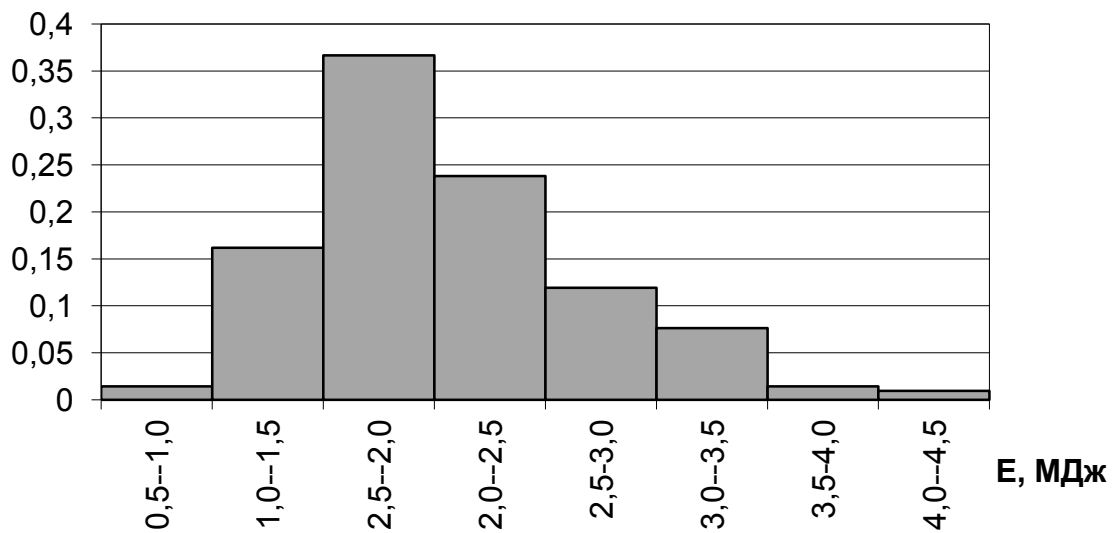


Рисунок 4.3 – Распределение энергоемкости БНЭ при мощности ПИЭ 60 кВт

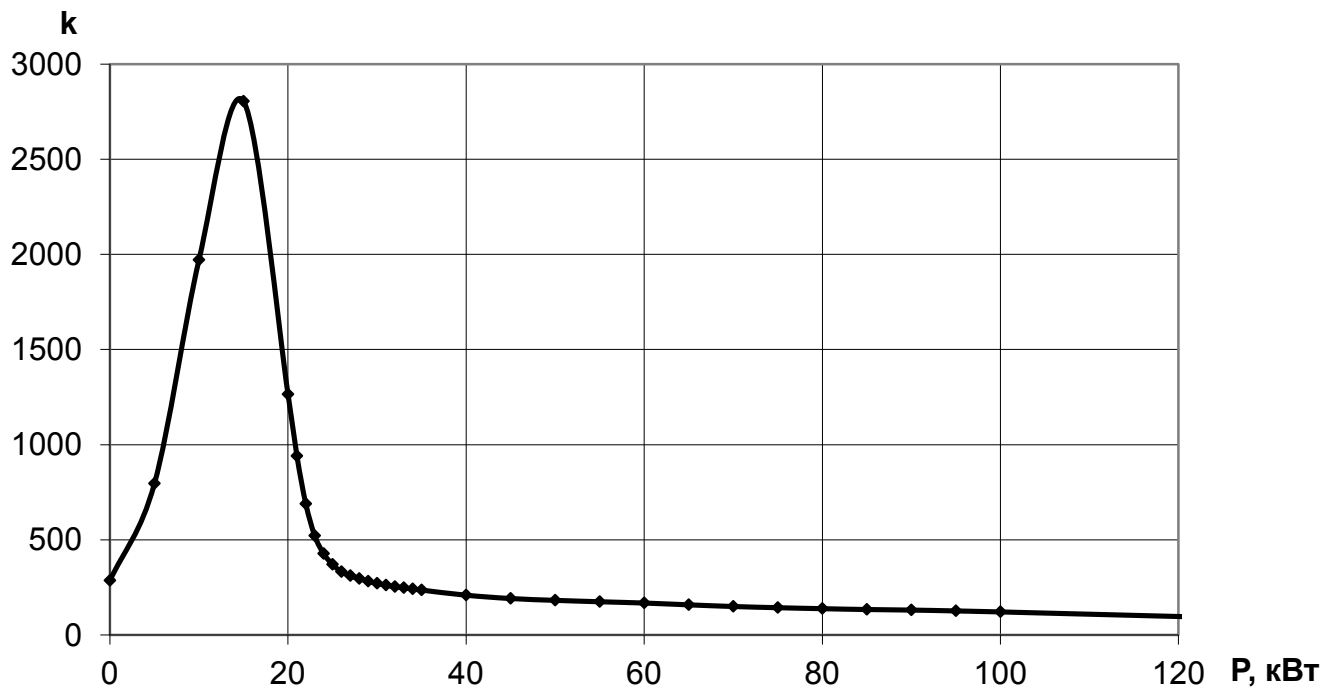


Рисунок 4.4 – Зависимость параметра масштаба распределения энергоёмкости БНЭ от мощности первичного источника энергии

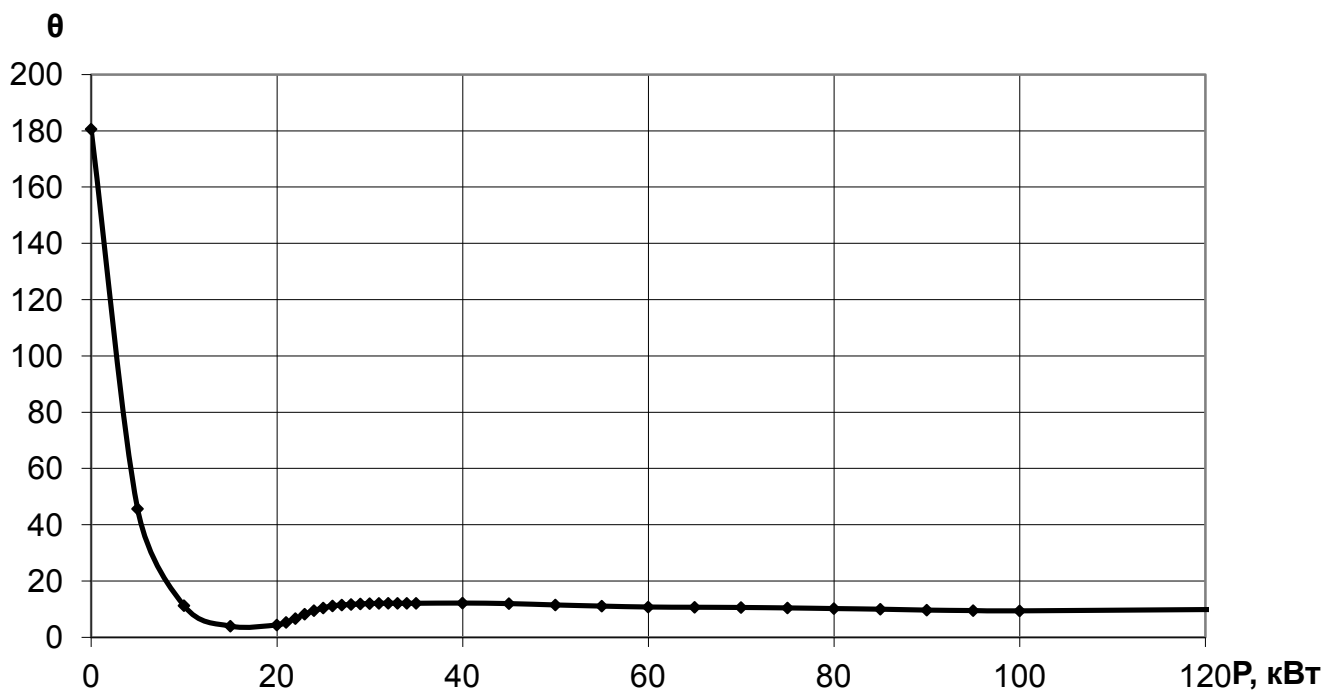


Рисунок 4.5 – Зависимость параметр формы распределения энергоёмкости БНЭ от мощности первичного источника энергии

Вероятностное представление энергоёмкости БНЭ позволяет определить её значения, обеспечивающие реализацию требуемых динамических характеристик

ТС для заданной доли рейсов. На рисунке 4.6 показаны величины энергоемкости БНЭ для долей рейсов p от 90 % до 99,5 % в зависимости от мощности первичного источника энергии. Для сравнения на рисунке показано также среднее значение необходимой энергоемкости БНЭ.

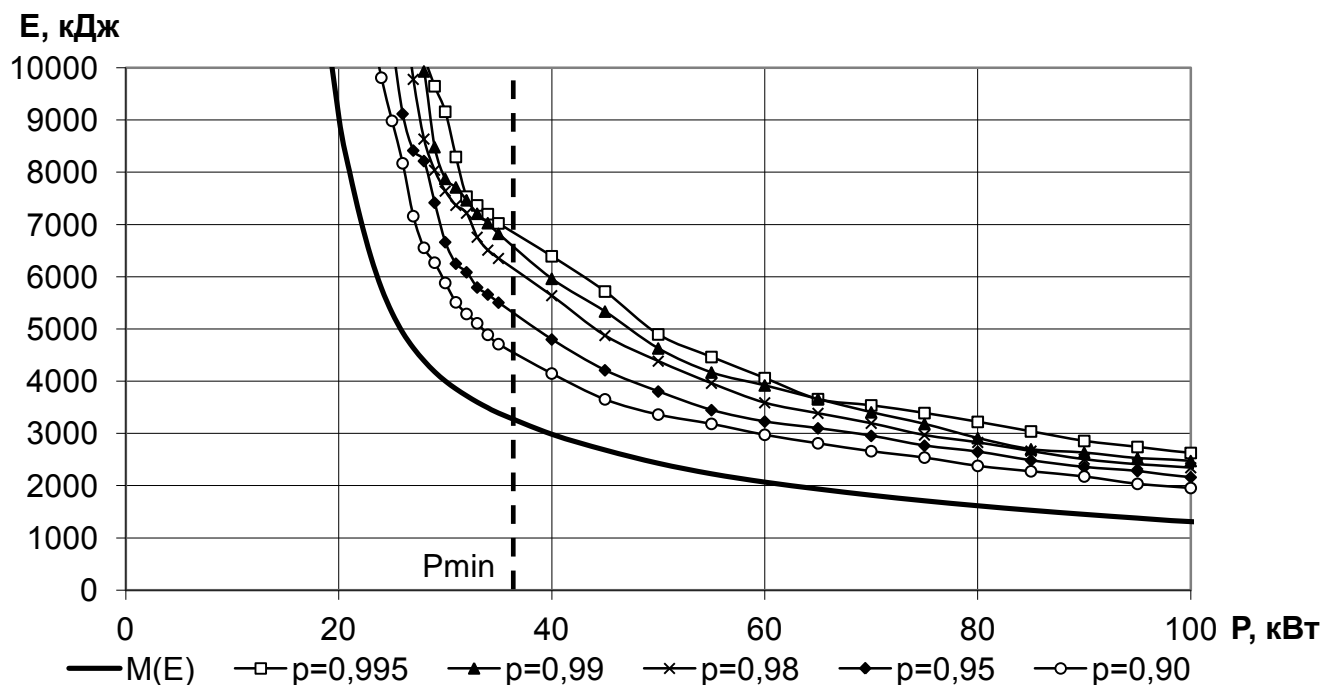


Рисунок 4.6 – Зависимость энергии БНЭ, обеспечивающей реализацию динамических характеристик ТС для заданной доли рейсов p от мощности первичного источника энергии

Для сравнения результатов, полученных на основании экспериментальных и расчетных циклов движения, а также с целью выявления зависимости необходимой энергоемкости буферного накопителя от особенностей цикла движения построены зависимости энергоемкости БНЭ от мощности ПИЭ для случая движения ТС по расчетному циклу, состоящему из тяги, выбега и торможения. При расчете было принято предположение, что движение осуществляется по перегону стандартной длиной 350 м, с требованием обеспечить среднюю скорость движения 17 км/ч при времени стоянки 30 с.

Для получения серий исходных зависимостей скорости движения ТС от времени поочередно варьировались скорость, ускорение и длина перегона. Пример цикла, полученного в результате тягового расчета, приведен на рисунке

4.7. На рисунках 4.8 – 4.10 показано изменение зависимости $E_{БНЭ}(P_{ПИЭ})$ в зависимости от различных факторов.

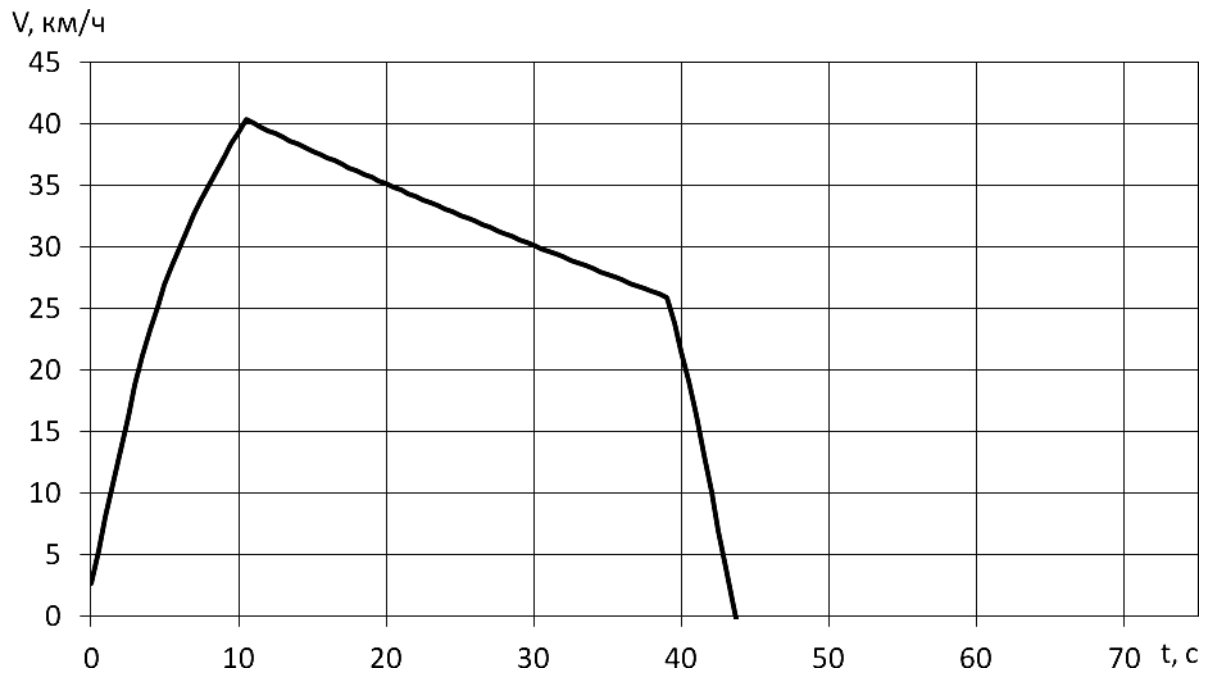


Рисунок 4.7 – Зависимость скорости движения ТС от времени при движении по расчетному циклу

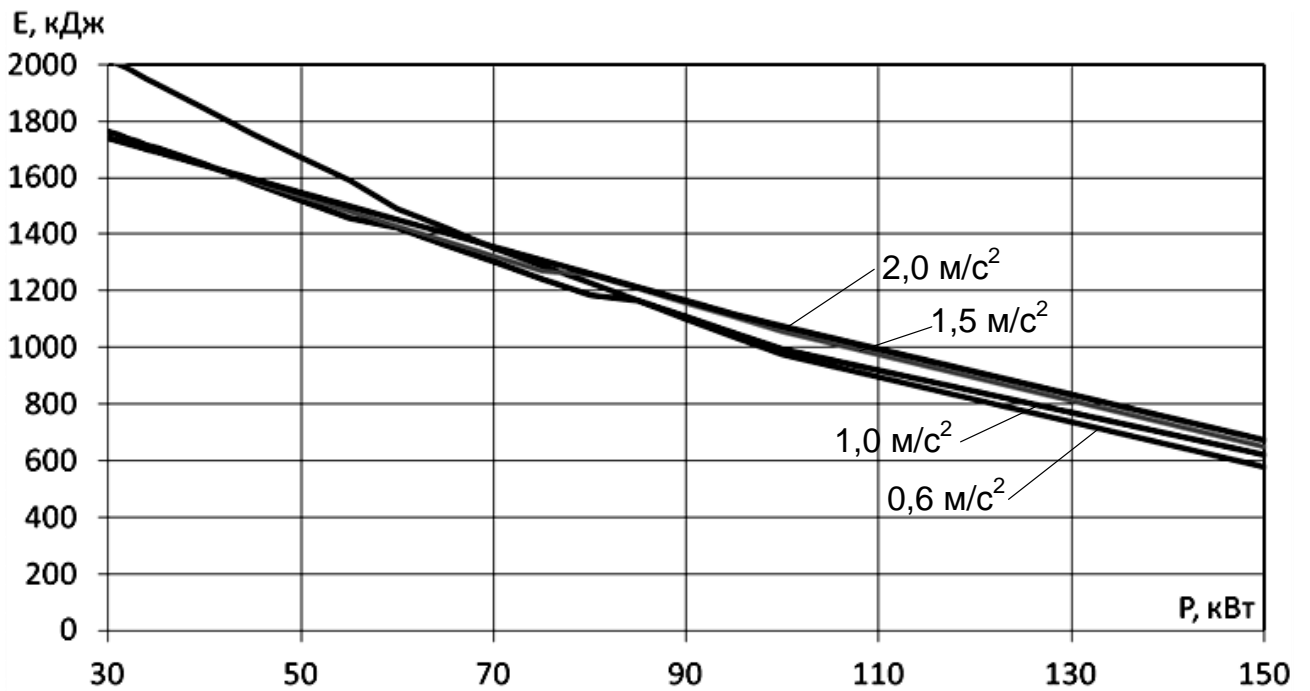


Рисунок 4.8 – Влияние ускорения ТС в режиме тяги на энергоемкость буферного накопителя

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что основным фактором, определяющим параметры комбинированной энергетической установки, является скорость сообщения при движении транспортного средства по маршруту. Результаты расчета также показали, что при чередовании на протяжении рейса ТС перегонов с различной средней скоростью параметры накопителя необходимо выбирать для цикла движения по перегону, в котором достигается наибольшая скорость сообщения.

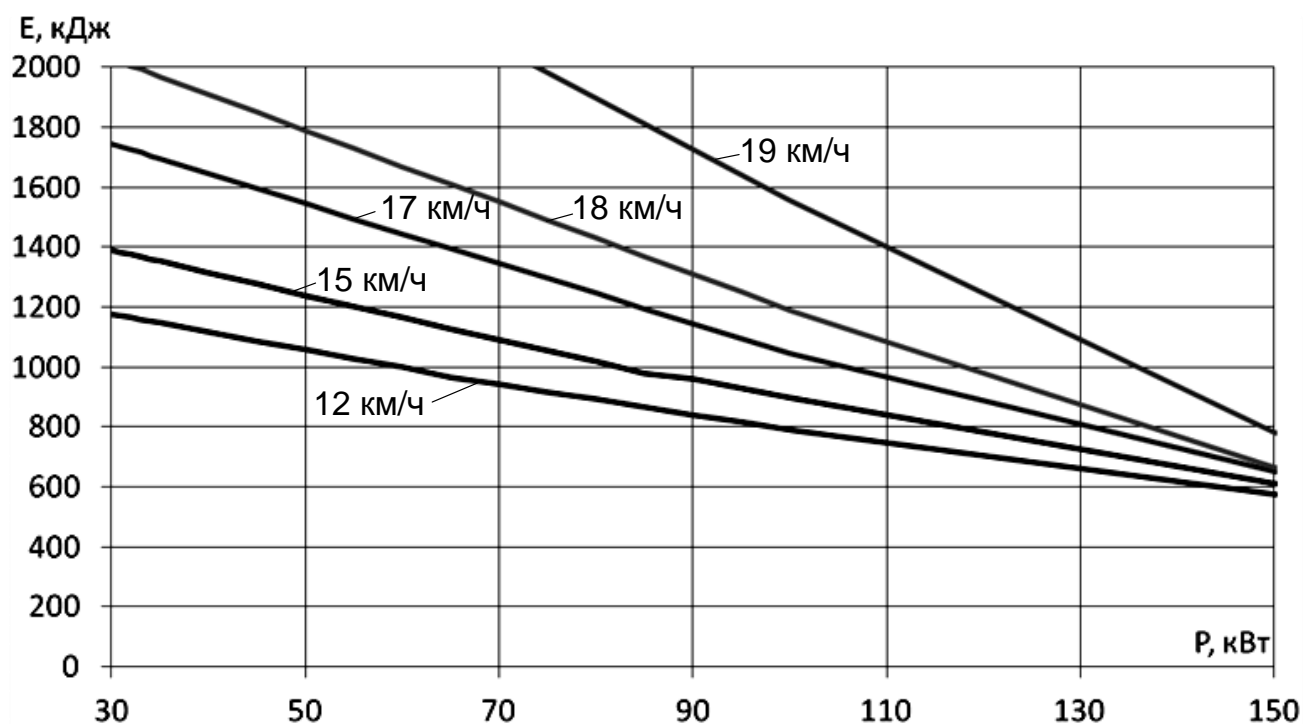


Рисунок 4.9 – Влияние средней скорости движения ТС на энергоемкость буферного накопителя

Необходимо отметить, что полученные значения энергоемкости существенно (в 1,5 – 2,5 раза) ниже значений, найденных на основании экспериментальных данных при той же мощности ПИЭ и скорости сообщения за рейс. Это объясняется тем, что на протяжении рейса ТС периодически реализуются отдельные циклы движения со средней скоростью, значительно превышающей общую скорость сообщения. В качестве иллюстрации на рисунке 4.11 приведены зависимости $E_{БНЭ}(P_{ПИЭ})$ при разной скорости сообщения, полученные при использовании в качестве исходных данных фрагментов

экспериментальных кривых движения ТС.

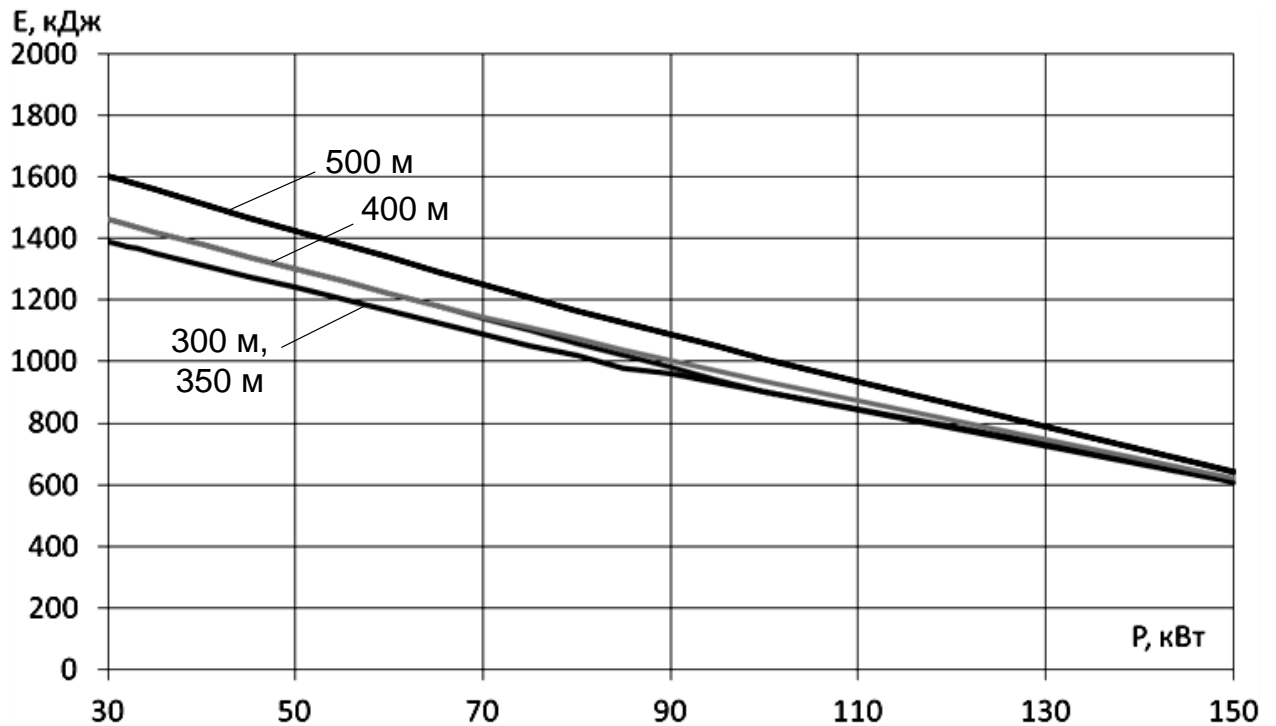


Рисунок 4.10 – Влияние длины перегона на энергоемкость
буферного накопителя

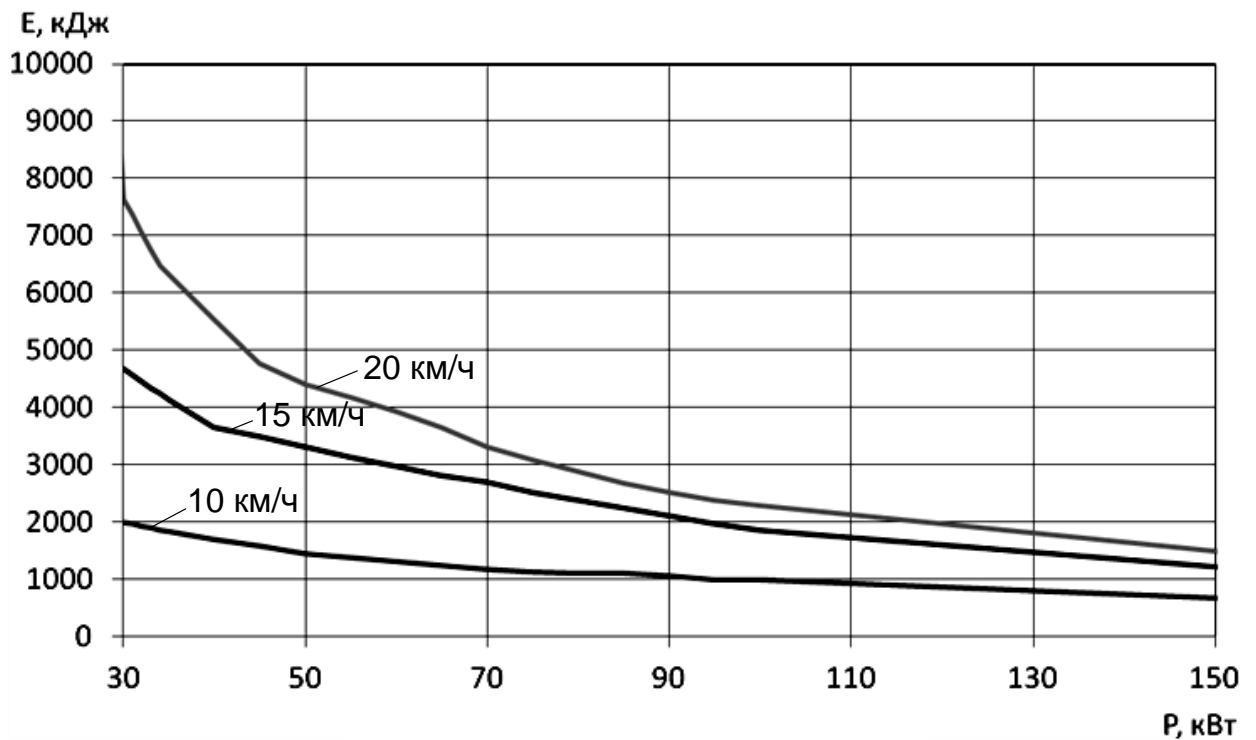


Рисунок 4.11 – Влияние средней скорости движения ТС на энергоемкость
буферного накопителя. Расчет выполнен по фрагментам экспериментальных
кривых движения

4.2 Определение минимально необходимой мощности первичного источника энергии

Представленные результаты позволяют осуществить выбор необходимой энергоёмкости накопителя, задавшись мощностью первичного источника энергии. При этом мощность не может быть менее некоторого наименьшего значения, отделяющего «подзаряжаемые» (plug-in) гибридные ТС от обычных, получающих энергию только от бортового источника. Достаточно точно эта граница может быть определена из графика энергии, вырабатываемой генератором в течение рейса (рисунок 4.12). Как следует из графика, начиная с некоторой мощности источника P_{\min} вырабатываемая им энергия остается практически постоянной. Незначительные её колебания объясняются изменением количества энергии рекуперативного торможения, которую способен принять накопитель, из-за различий темпа заряда его от генератора.

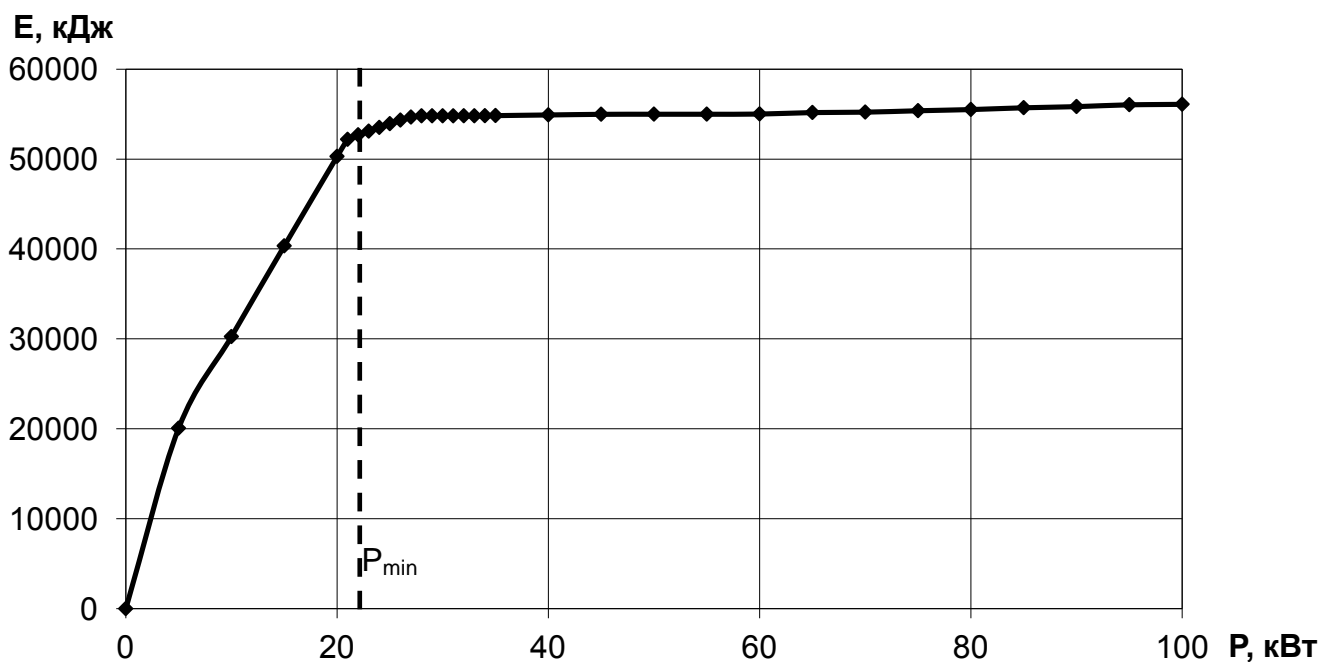


Рисунок 4.12 – Зависимость энергии, вырабатываемой генератором за рейс, от мощности генератора

Делением величины вырабатываемой генератором энергии на длительность рейса можно получить среднюю мощность, вырабатываемую генератором за рейс.

Если установленная мощность генератора равна средней, ему необходимо быть включенным в течение всего рейса. Если же мощность генератора выше средней, то становится необходимым периодически его отключать при повышении заряда БНЭ до заданного уровня либо ограничивать режим его работы.

Несмотря на равную протяженность рейсов, средняя мощность при разных условиях движения оказывается различной, то есть зависящей от цикла движения, наблюдаемого в конкретных условиях. Гистограмма распределения рейсов по средней мощности показана на рисунке 4.13. Приблизительно можно считать, что мощность подчиняется нормальному закону распределения со средним значением 20,9 кВт и среднеквадратичным отклонением 4,9 кВт. Поскольку длительность рейса многократно превосходит длительность процесса заряда накопителя, то вследствие буферизации энергии стандартное отклонение средней мощности рейса оказывается на порядок ниже отклонения значений мгновенной мощности.

Итак, на мощность первичного источника энергии гибридного автобуса необходимо наложить следующее условие: в заданной доле рейсов средняя потребляемая мощность не должна быть ниже мощности источника энергии. Полученные результаты показывают, что с вероятностью 99,7 % мощность генератора не превзойдет $M + 3\sigma = 35,6$ кВт.

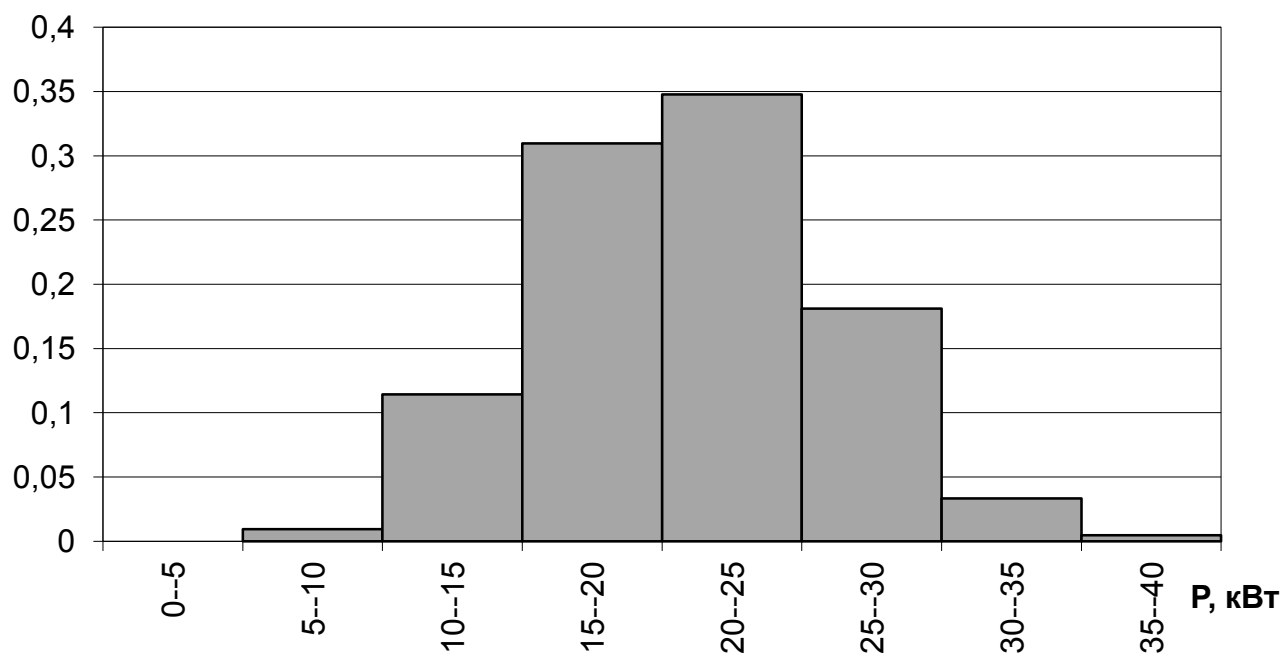


Рисунок 4.13 – Распределение рейсов по средней мощности генератора

Средняя мощность, потребляемая гибридным автобусом за рейс, приближенно может считаться линейной функцией скорости сообщения (средней скорости выполнения рейса без учета стоянки на конечных остановках [110]). Значение коэффициента корреляции между этими величинами составляет 0,949. Зависимость их друг от друга показана на рисунке 4.14.

Методом наименьших квадратов может быть получена функция, описывающая эту взаимосвязь:

$$P = (1,68 V_c - 4,01) \pm 25\% , \text{ кВт.} \quad (4.1)$$

Хотя экспериментальные данные показывают наличие корреляции, теоретически можно предложить зависимости $V(t)$ с равной средней скоростью и значительно различающейся мощностью. Однако на практике отсутствует возможность реализации циклов движения произвольного вида, поскольку они в значительной степени ограничены условиями дорожного движения и особенностями маршрута. В качестве примера на рис. 4.15 приведены две зависимости $V(t)$, обеспечивающие перемещение ТС по перегону длиной 1 км со средней скоростью 15 км/ч. В случае, соответствующем функции (1), средняя мощность составляет 12,3 кВт, т. е. на 42 % ниже ожидаемой мощности 21,2 кВт. В случае, соответствующем функции (2), средняя мощность составляет 27,9 кВт, или на 32 % выше ожидаемой.

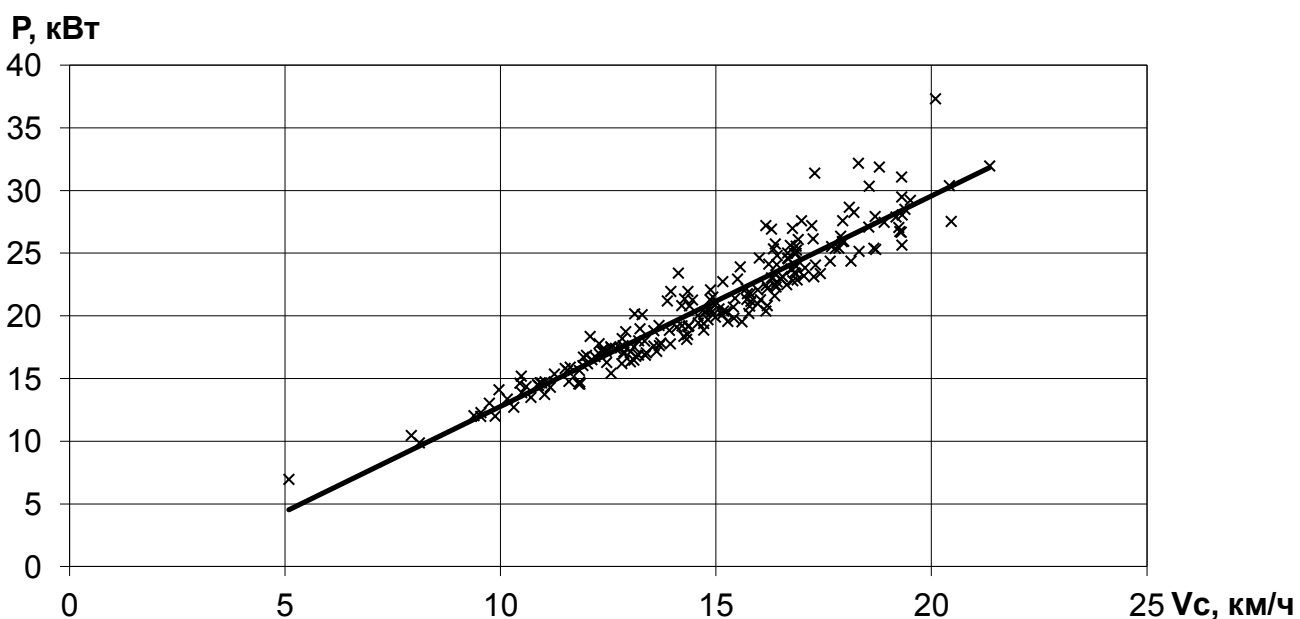


Рисунок 4.14 – Зависимость средней мощности рейса от скорости сообщения

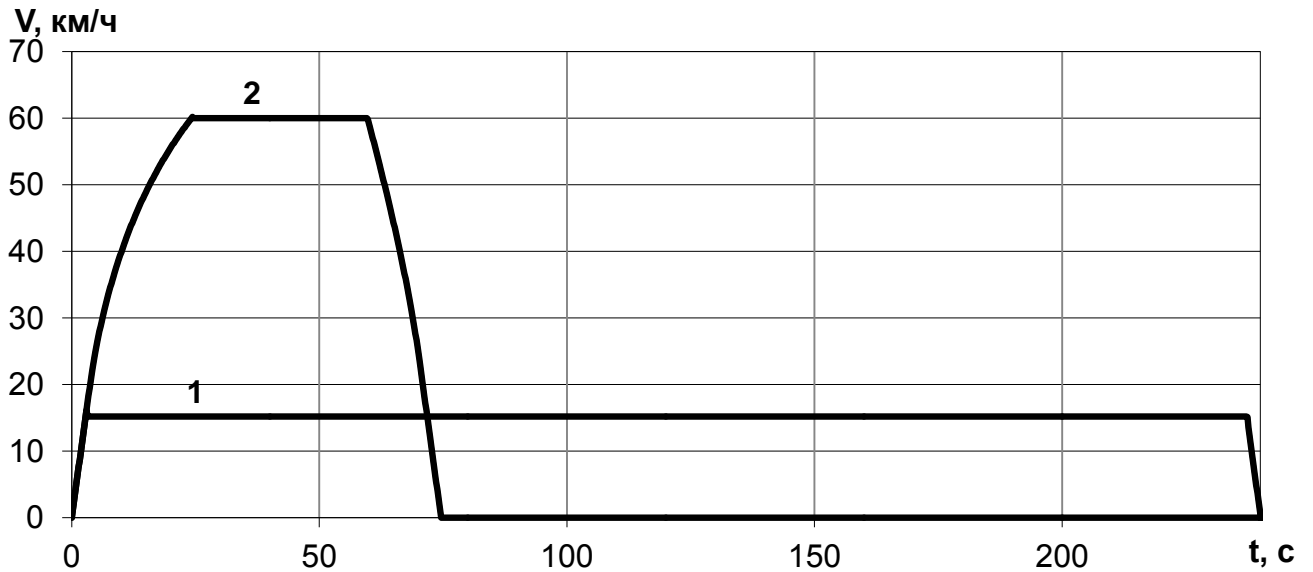


Рисунок 4.15 – Примеры кривых движения с различной средней мощностью

Распределение рейсов по скорости сообщения также приблизительно может быть описано нормальным законом. Его гистограмма показана на рисунке 4.16. Среднее по исследованным рейсам значение скорости сообщения составляет 14,8 км/ч, а её среднеквадратичное отклонение – 2,8 км/ч.

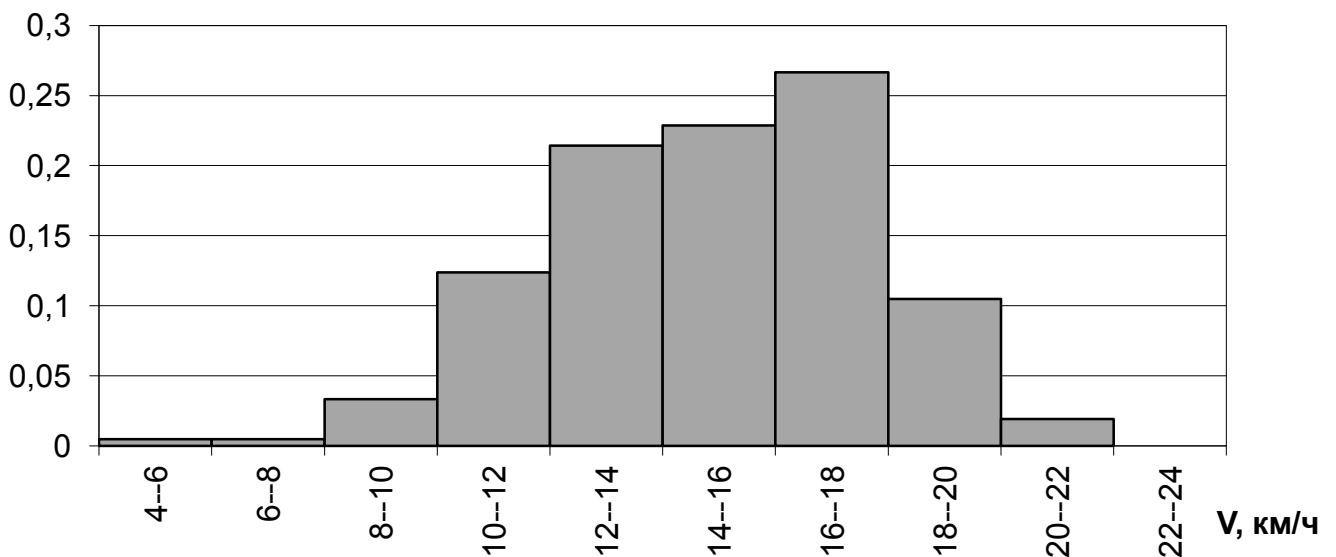


Рисунок 4.16 – Гистограмма распределения скорости сообщения

Кроме ограничения по средней мощности, необходимо учитывать также ограничение на мощность первичного источника энергии по времени заряда буферного накопителя энергии. При известной полезной энергоемкости БНЭ и

мощности источника энергии длительность его заряда t_3 составляет

$$t_3 = \frac{E_{\text{БНЭ}}}{P_{\text{ПНЭ}}}, \text{ с.} \quad (4.2)$$

Таким образом, зависимость времени заряда от мощности первичного источника энергии (генератора) может быть получена по графику зависимости энергии БНЭ от мощности первичного источника энергии. Найденные значения времени заряда показаны на рисунке 4.17. Необходимо, чтобы время междурейсового отстоя маршрутных ТС, составляющее 3 ... 5 минут (200 ... 300 с), было достаточным для заряда БНЭ. Расчет выполнен в предположении, что при движении по маршруту была исчерпана вся полезная энергоемкость БНЭ, но потерями «мертвого» запаса энергии, вызванными саморазрядом конденсатора, можно пренебречь по причине относительно малого времени хранения энергии. Как видно из графика, накопитель может быть заряжен за время междурейсового отстоя при мощности источника энергии выше 30 ... 35 кВт.

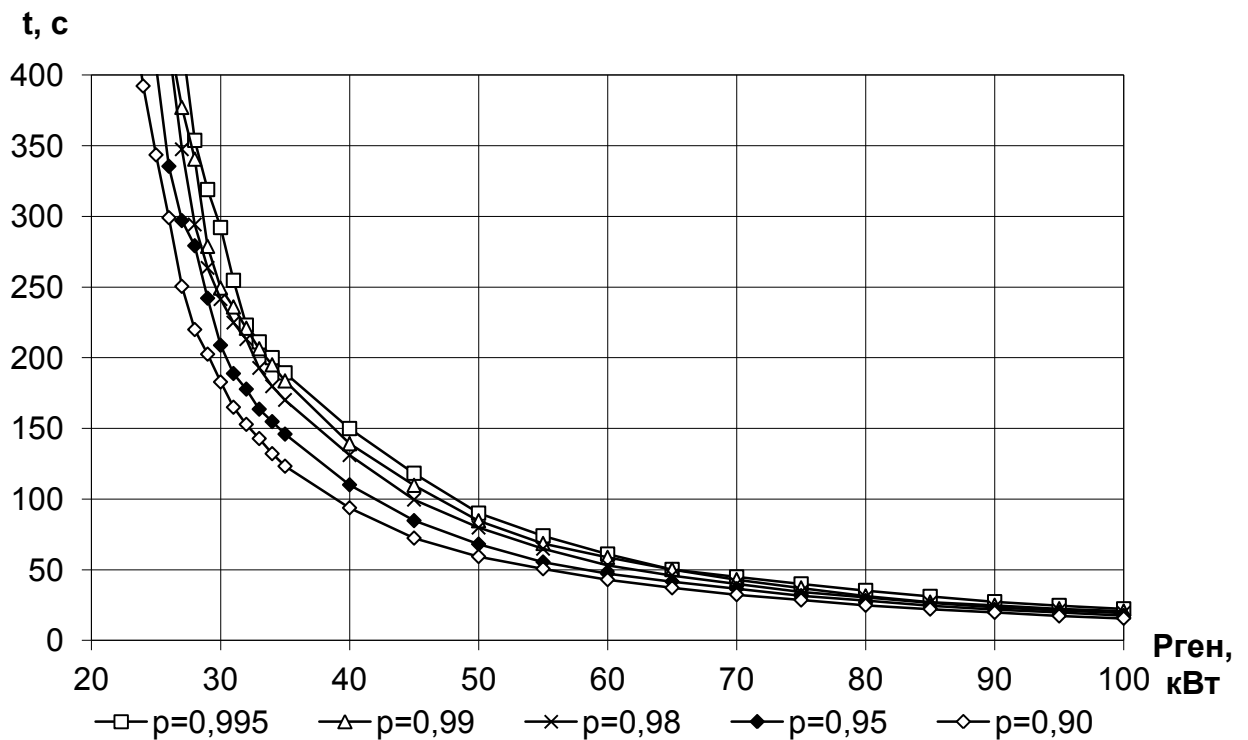


Рисунок 4.17– Зависимость длительности заряда буферного накопителя энергии от мощности первичного источника энергии

В отличие от мощности первичного источника энергии, корреляция величины энергоемкости БНЭ со скоростью сообщения выражена слабее. Она является выраженной только при малых мощностях первичного источника энергии, поскольку в этом случае накопитель частично выполняет функции источника энергии. В области же характерных для гибридных ТС мощностей ПИЭ свыше 30 ... 40 кВт коэффициент корреляции скорости сообщения и необходимой энергоемкости БНЭ находится в диапазоне 0,3 ... 0,4. На рисунке 4.18 показана зависимость коэффициента корреляции от мощности ПИЭ. На рисунке 4.19 показан пример зависимости энергоемкости БНЭ от средней скорости для ГТС с ПИЭ мощностью 40 кВт. Разброс возможных значений энергоемкости БНЭ при реализации различных циклов движения оказывается значительно больше разброса значений мощности первичного источника энергии, что необходимо учитывать при выборе параметров накопителя.

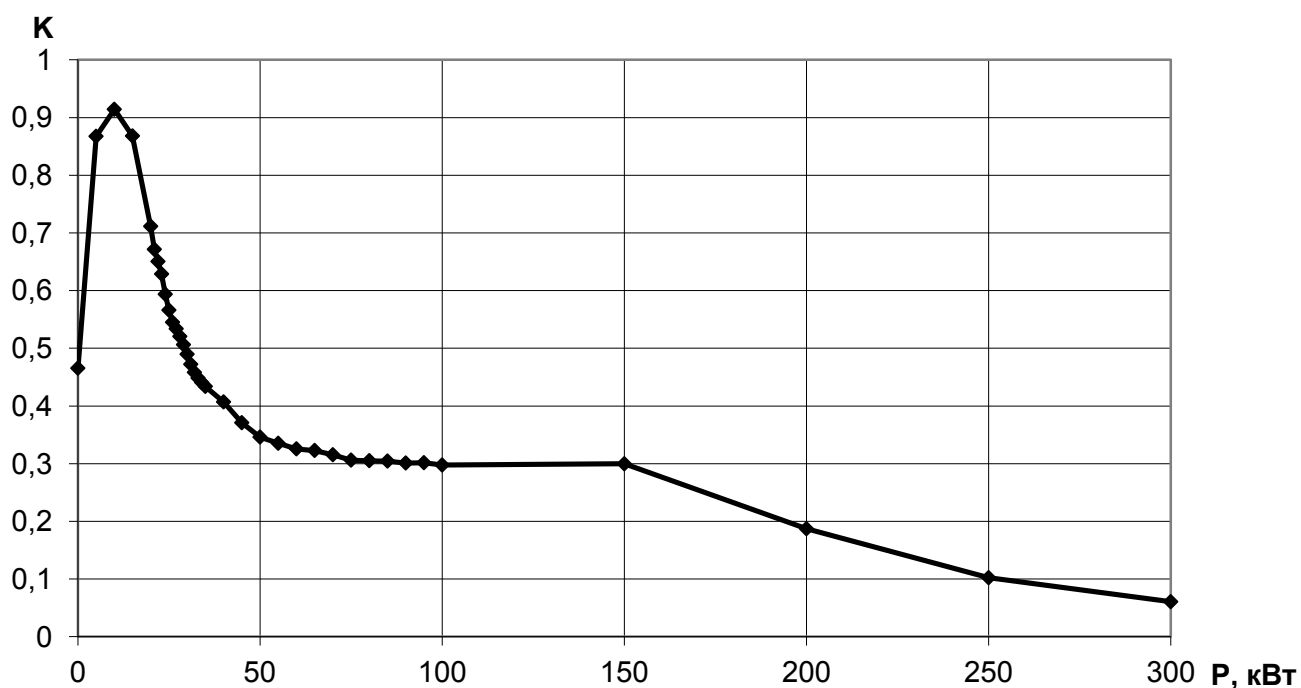


Рисунок 4.18 – Зависимость коэффициента корреляции между средней скоростью движения и энергоемкостью БНЭ от мощности первичного источника энергии

Итак, на основании сказанного выше может быть предложена следующая последовательность выбора основных характеристик гибридной силовой установки маршрутных транспортных средств. Полученные результаты

позволяют сделать выбор для подвижного состава безрельсового городского транспорта, работающего в условиях уличного движения со скоростью сообщения до 20 ... 25 км/ч. При полной массе транспортного средства 15 т полезная (передаваемая БНЭ либо тяговому приводу) мощность первичного источника энергии должна составлять не менее 30 ... 35 кВт по условиям длительности заряда накопителя и покрытия среднего расхода энергии в течение рейса. Максимально возможная мощность ПИЭ равна мощности тягового привода и составляет 120 ... 150 кВт.

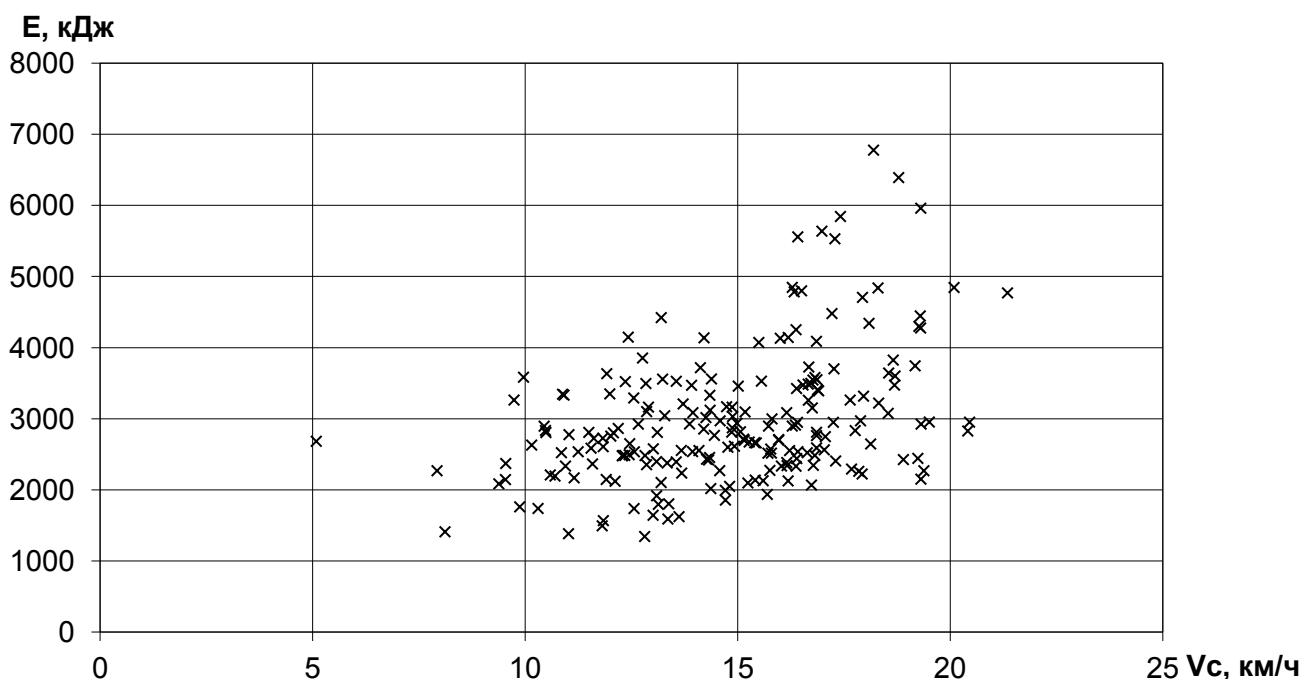


Рисунок 4.19 – Зависимость энергоемкости БНЭ от скорости сообщения при мощности ПИЭ 40 кВт

Задаваясь долей рейсов p , в которых цикл движения ТС может быть реализован без недопустимого снижения запаса энергии БНЭ, выбирается зависимость полезной энергоемкости БНЭ от мощности ПИЭ. Выбор сочетания мощности ПИЭ и энергоемкости БНЭ из множества заданных графиком вариантов следует выполнять из соображений минимизации массы и стоимости энергетической установки. При мощности ПИЭ 35 кВт и $p = 0,995$ необходимая энергоемкость БНЭ составит около 7 МДж, или 2 кВт·ч. Несмотря на сравнительно малую мощность ПИЭ, в случае нехватки запаса энергии БНЭ он

способен поддерживать установившуюся скорость движения ТС с номинальной загрузкой равной 40 км/ч на площадке, а при движении без пассажиров – 45 ... 50 км/ч.

Тем не менее, по причине высокой стоимости суперконденсаторных накопителей энергии целесообразно повышение мощности ПИЭ с целью сокращения энергоемкости БНЭ. При повышении мощности ПИЭ до мощности тягового привода необходимая энергоемкость БНЭ составит 1,5 ... 2,0 МДж, или 0,5 кВт·ч.

Полученные результаты могут быть легко масштабированы. Поскольку расчетные значения силы тяги и мощности пропорциональны полной массе ТС, при её изменении могут быть получены параметры энергетических установок P и E для гибридных ТС полной массы m :

$$P = \frac{m}{15} P_{ПИЭ}, \text{ кВт} \quad (4.3)$$

$$E = \frac{m}{15} E_{БНЭ}, \text{ МДж} \quad (4.4)$$

4.3 Типы перспективного безрельсового подвижного состава городского транспорта

Полученные результаты позволяют определить параметры перспективного подвижного состава городского безрельсового транспорта. Предложены различные схемы реализации ПС, различающиеся между собой видами используемых источников энергии (рисунок 4.20). Различные источники энергии имеют свои достоинства и недостатки. Их удельные показатели приведены на рисунке 4.21 [111].

Тепловые двигатели (главным образом ДВС), работающие на дизельном топливе либо газе, используют топливо с высокой энергоемкостью (для дизельных двигателей 10 ... 20 МДж/кг). Удельная мощность ДВС как источника энергии составляет порядка 0,1 кВт/кг. Основными их недостатками являются

высокая стоимость топлива по сравнению с электрической энергией, а также производство загрязняющих окружающую среду выбросов [55].

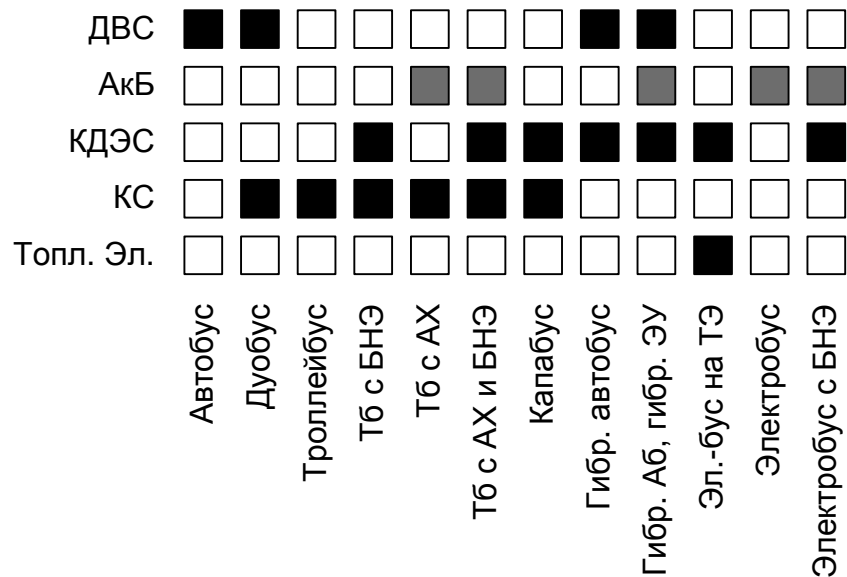


Рисунок 4.20 – Возможные схемы безрельсовых транспортных средств

Аккумуляторные батареи на основе 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. Таким образом, использование аккумуляторов в качестве источника энергии может приводить к повышению массы батареи свыше значения, определенного по необходимой энергоёмкости, для обеспечения необходимой мощности АБ. Другим существенным недостатком аккумуляторов является срок службы, ограниченный 5 ... 15 тысячами циклов заряда-разряда, что приводит к необходимости замены дорогостоящих батарей в течение срока службы транспортного средства.

Конденсаторы двойного электрического слоя (КДЭС), наоборот, обладают высокой удельной мощностью до 10 кВт/кг и допускают более миллиона циклов заряда-разряда, имея малую удельную энергоёмкость – около 0,05 МДж/кг.

Питание от контактной сети позволяет передать транспортному средству практически любую необходимую мощность. Однако передача энергии связана с

существенными потерями энергии, а также ограничивает автономность ТС.

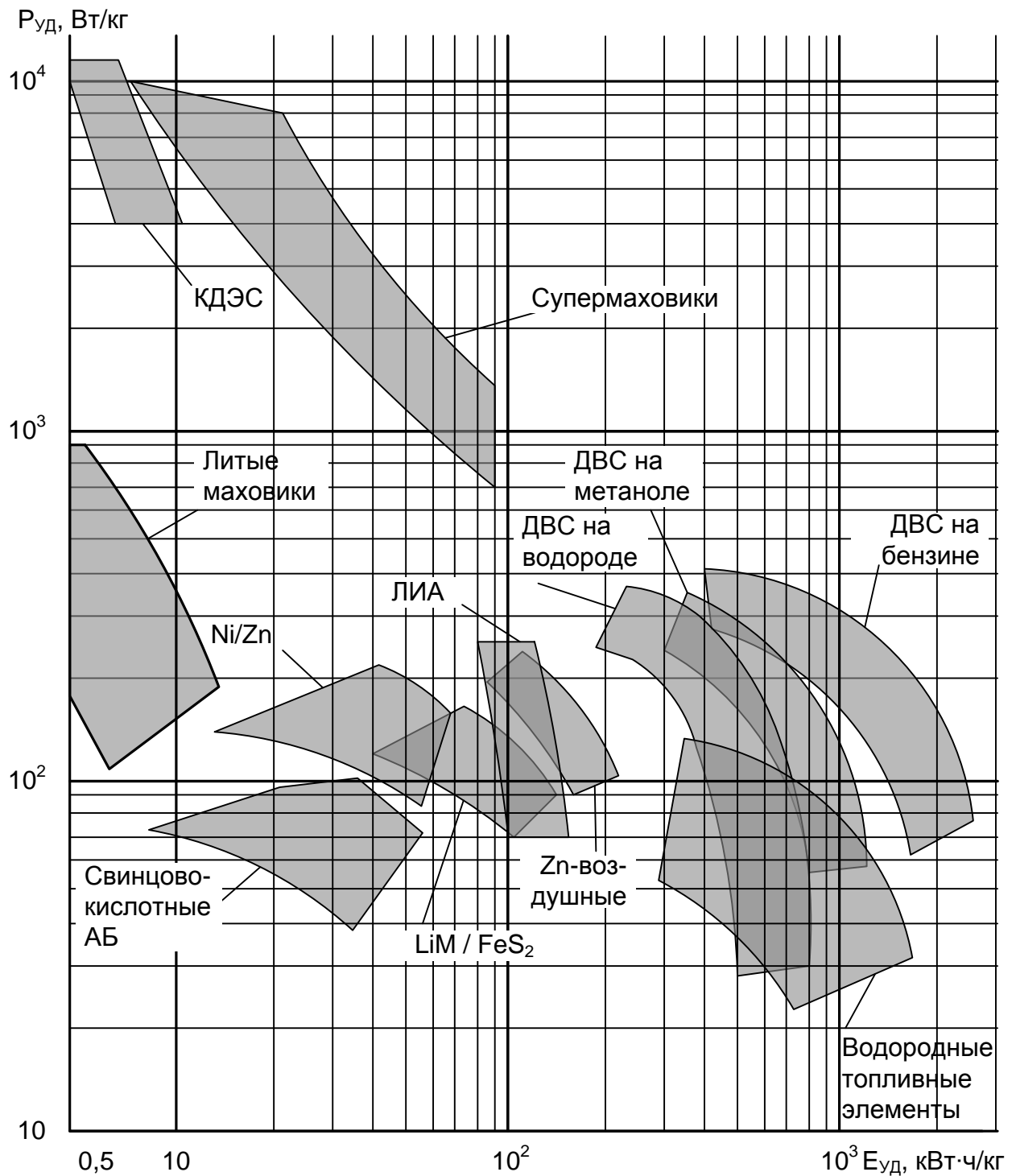


Рисунок 4.21 – Удельные характеристики различных источников энергии

Наконец, водородные топливные элементы обладают сравнимой с обычным топливом удельной энергоемкостью, но обеспечивают низкую удельную мощность.

По стоимости киловатт-часа запасенной энергии конденсаторы двойного

электрического слоя значительно превосходят литий-ионные батареи: она составляет 3 ... 20 тыс. руб/кВт·ч и 600 ... 4 000 тыс. руб/кВт·ч соответственно. В то же время по стоимости единицы мощности КДЭС имеют преимущество. При мощности, соответствующей 5 % потерь на внутреннем сопротивлении КДЭС, их удельная стоимость составляет 1500 руб/кВт, а удельная стоимость ЛИА – 10 000 руб/кВт [55].

С целью увеличения срока службы аккумуляторных батарей возможно совместное использование аккумуляторов и КДЭС. В этом случае параметры аккумуляторной батареи определяются величиной необходимого запаса энергии и не могут быть существенно сокращены. Поскольку мощность батареи электробуса будет достаточна для питания двигателя при любом режиме работы, энергоемкость конденсаторного накопителя может быть рассчитана только на прием энергии торможения и для автобуса с 12-метровым кузовом составит 400 ... 600 кДж. Такое решение, тем не менее, полностью не устраняет необходимость замены аккумуляторов в процессе эксплуатации, существенно увеличивает вес и стоимость энергетической установки как за счет собственно накопителя, так и вследствие необходимости в дополнительном преобразователе энергии.

Для транспортных средств, имеющих дальность автономного хода менее 30 ... 40 км (например, троллейбус с автономным ходом), характеристики аккумуляторной батареи выбираются по мощности тягового привода. В этом случае установка конденсаторного накопителя повышенной энергоемкости позволила бы снизить мощность, а следовательно, и размеры батареи в случае, если потребность в автономном ходе мала. Предельным решением такого рода является ТС с АБ мощностью 35 кВт, способной обеспечить 6 ... 8 км автономного хода и конденсаторным накопителем энергоемкостью 7 МДж. Но в этом случае энергоемкость батареи 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. Как было указано в главе 1, при оценке различных конструкций важно учитывать стоимость жизненного цикла ТС, складывающуюся из стоимости его приобретения, 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 сжатом природном газе, троллейбус с автономным ходом, гибридный автобус и электробус. Техничко-экономические характеристики их энергетических установок показаны в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Техничко-экономические характеристики перспективных энергоустановок безрельсовых ТС с длиной кузова 12 м

Вид ТС	Автобус на КПГ	Троллейбус с АХ	Гибр. автобус	Электробус
Мощность ТЭД, кВт	–	150	150	150
Энергоемкость ЛИА, кВт·ч	–	45	–	500
Мощность ЛИА, кВт	–	150	–	150
Энергоемкость КДЭС, кВт·ч	–	–	2 / 0,5	–
Мощность КДЭС, кВт	–	–	150	–
Мощность ДВС, кВт	150	–	35 / 100	–
Расход топлива (энергии) на 100 км пробега	50 м ³	200 кВт·ч	35 м ³	200 кВт·ч
Вес энергоустановки, кг	1500	1800	2000	6000
Стоимость энергоустановки, т. руб.	1500	5000	4000	10 000
Стоимость топлива (энергии) при пробеге 300 тыс. км., т. руб.	1800	1500	1200	1500
Стоимость 6-летнего эксплуатационного цикла, т. руб.	3200	6500 без замены ЛИА	5200	11 500

Как видно из таблицы, в настоящее время наиболее конкурентоспособными среди перспективных решений являются автобус и гибридный автобус, использующие КПГ в качестве топлива в силу его низкой стоимости. Стоимость цикла эксплуатации автобуса на дизельном топливе составила бы около 6000 тыс. руб. Хотя в настоящее время наименьшей стоимостью

эксплуатационного цикла обладает автобус с традиционным приводом, по мере ужесточения экологических требований либо появления новых источников энергии соотношение может измениться.

Необходимо отметить тенденцию к интеграции транспортных средств по мере повышения экологических требований и развития технологий накопления и преобразования энергии. На рисунке 4.22 показаны направления эволюции подвижного состава в координатах дальности автономного хода и удельного объема выбросов оксидов азота – наиболее опасного из загрязнителей.

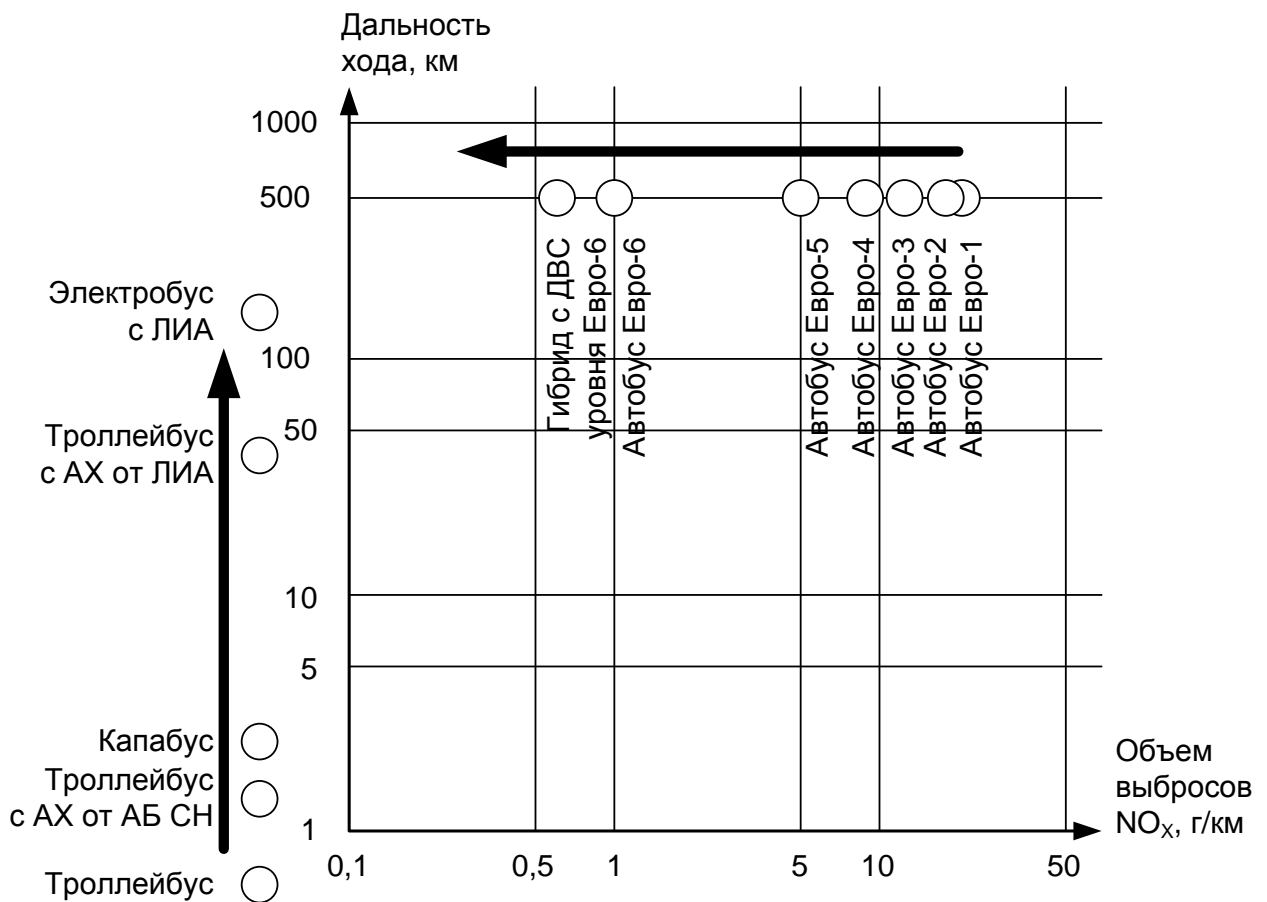


Рисунок 4.22 – Направления развития подвижного состава безрельсового городского транспорта

По мере развития источников электрической энергии оба направления развития объединятся в общей конструкции. Такое решение может возникнуть при повышении удельной энергоемкости одного из возможных источников – аккумуляторных батарей, топливных элементов или КДЭС – до величины,

сравнимой с удельной энергоемкостью жидкого топлива. 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 сохраняют свою актуальность [112]. 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.

4.4 Выводы

1. Установлено наличие зависимости мощности первичного источника энергии от скорости сообщения при движении транспортного средства по маршруту, ограничивающее наименьшую необходимую мощность первичного источника энергии.

2. На основании анализа средней мощности, потребляемой тяговым приводом за рейс, и расчета времени заряда накопителя показано, что в условиях эксплуатации на городских маршрутах минимальная мощность первичного источника энергии пассажирского транспортного средства с 12-метровым кузовом и комбинированной энергоустановкой должна составлять 35 кВт, или 2 кВт/т.

3. Путем интегрирования процессов потребления мощности тяговым электроприводом получена зависимость энергоемкости буферного накопителя энергии от мощности первичного источника энергии. Полученная зависимость позволяет выбрать сочетание элементов тягового привода, обеспечивающее выполнение требований к динамическим характеристикам транспортного средства в заданной доле рейсов.

4. Показано, что наиболее перспективными типами подвижного состава городского безрельсового транспорта в настоящее время являются троллейбус с накопителями энергии и гибридный автобус. Для указанных транспортных средств определены основные параметры тягового привода.

По мере развития источников энергии можно ожидать, что эволюция транспортных средств с различными первичными источниками энергии приведет к объединению их конструкций с заменой в составе гибридного тягового привода дизель-генераторной либо турбогенераторной установки на топливные элементы либо аккумуляторы повышенной удельной энергоемкости. При этом предложенные в работе принципы выбора мощности первичного источника энергии и энергоемкости буферного накопителя энергии сохранят свою актуальность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы были получены следующие результаты:

1. Установлено, что на подвижном составе городского транспорта наиболее энергетически эффективным решением является применение комбинированных энергетических установок последовательной схемы, обеспечивающее наиболее полное использование энергии электрического торможения.

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

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 транспортном средстве.

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. Получена зависимость $E_{БНЭ}(P_{ПИЭ})$ путем интегрирования процессов потребления мощности тяговым электроприводом. Показано, что в условиях эксплуатации на городских маршрутах минимальная мощность первичного источника энергии ТС с комбинированной энергоустановкой 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 первичного источника энергии, уточнена расчетная модель путем более детализированного учета потерь в составных частях комбинированной энергетической установки, 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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Основы электрической тяги / В. Е. Розенфельд и др. – под ред. В. Е. Розенфельда. – Москва–Ленинград: Госэнергоиздат, 1957. – 311 с.
- 2 Кутыловский, М. П. Электрическая тяга на городском транспорте / М. П. Кутыловский, Д. А. Сургучев. – Москва : Стройиздат, 1964. – 348 с.
- 3 Ефремов И. С. Теория и расчет электрического оборудования подвижного состава городского электрического транспорта / И. С. Ефремов, Г. В. Косарев. – Москва : Высшая школа, 1976. – 480 с.
- 4 Ефремов, И. С. Теория и расчет тягового привода электромобиля / И. С. Ефремов – Москва : Высшая школа, 1984. – 383 с.
- 5 Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквардт. – Москва : Транспорт, 1982 – 528 с.
- 6 Феоктистов, В. П. Анализ энергозатрат в перевозочном процессе на железнодорожном транспорте методом энергобаланса // Транспорт: наука, техника, управление. – Москва : ВИНТИ, 1992, №10. – С. 23 – 26.
- 7 Rufer, A. Power-Electronic Interface for a Supercapacitor-Based Energy-Storage Substation in DC-Transportation Networks, EPE 2003: European Conference on Power Electronics and Applications, 2-4 September, Toulouse, France [Электрон. ресурс] / A. Rufer. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/37436786_Power-Electronic_Interface_for_a_Supercapacitor-Based_Energy-Storage_Substation_in_DC-Transportation_Networks – загл. с экрана.
- 8 Варакин, И. Н. Электробус и грузовик с электрохимическими конденсаторами в качестве единственного источника энергии [Электрон. ресурс] / И. Н. Варакин, А. В. Дзенкевич, А. Д. Клементов и др. / Режим доступа: <http://www.esma-cAppcom/FAQ/electrobus.pdf> – загл. с экрана.
- 9 Markel, T. Energy storage system considerations for grid-charged hybrid electric vehicles [Электрон. ресурс] / T. Markel, A. Simpson. – Режим доступа: <http://www.nrel.gov/docs/fy05osti/38538.pdf> – загл. с экрана.
- 10 Energy storage system requirements for hybrid fuel cell vehicles [Электрон.

ресурс] / T. Markel, M. Zolot, K. B. Wipke, A. A. Pesaran. – Режим доступа: http://www.nrel.gov/transportation/energystorage/pdfs/aabc03_nrel_esfc_vr3.pdf – загл. с экрана.

11 Burke, A. Review of ultracapacitor technologies for vehicle Applications [Электрон. ресурс] / A. Burke. – Режим доступа: http://www.nesscApp.com/data_nesscap/papers/2001/Review%20of%20Ultracapacitor%20Technologies%20for%20Vehicle%20APPLication.pdf – загл. с экрана.

12 Kermani, S. Predictive energy management for hybrid vehicle / Kermani S., Delprat S., Guerra T. M., Trigui R., Jeanneret B. // Control Engineering Practice. – Vol. 20 (2012). – P. 408–420.

13 Zilin, Ma. Parameters Design for a Parallel Hybrid Electric Bus Using Regenerative Brake Model / Zilin Ma // Advances in Mechanical Engineering. – Vol. 2014. – Article ID 760815. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/760815>.

14 Глушенков, В. А. Тяговый привод троллейбуса с конденсаторным накопителем / В. А. Глушенков, М. А. Слепцов, А. А. Каледин. – Вестник ГЭТ России. – 2004. – № 4 (61). – С. 2–6.

15 Щуров, Н. И. Методы и средства экономии и повышения эффективности использования энергии в системе городского электрического транспорта : дисс. на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук : 05.09.03 / Н. И. Щуров. – Новосибирск, 2003. – 385 с. : ил., табл.

16 Сопов, В. И. Энергосберегающие мероприятия при эксплуатации трамваев и троллейбусов / В. И. Сопов, Ю. А. Прокушев, А. А. Штанг; под. ред. В. Н. Аносова. – Автоматизированные электромеханические системы. Коллективная монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – С. 253 – 263.

17 Штанг, А. А. Повышение эффективности электротранспортных систем на основе использования накопителей энергии : дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук : 05.09.03 / А. А. Штанг. – Новосибирск, 2006. – 233 с. : ил., табл.

18 Спиридонов, Е. А. Повышение эффективности использования энергии в электротранспортных комплексах с накопительными устройствами : дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук : 05.09.03 / Е. А. Спиридонов. – Новосибирск, 2009.

– 165 с. : ил., табл.

19 Аносов, В. Н. Методы и средства повышения эффективности систем тягового электропривода автономных транспортных средств : дисс. на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук : 05.09.03 / В. Н. Аносов. – Новосибирск, 2008. – 252 с. : ил., табл.

20 Аносов, В. Н. Повышение эффективности систем тягового электропривода автономных транспортных средств : монография / В. Н. Аносов, В. М. Кавешников. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. – 218 с.

21 Федеральный закон Российской Федерации от 23 ноября 2009 г. N 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» / Российская газета. – №5050 (226), 27 ноября 2009 г.

22 Транспорт в России – 2009 г.: Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.gks.ru/bgd/regl/B09_55/Main.htm – загл. с экрана.

23 Байрыева, Л. С. Электрическая тяга: городской наземный транспорт / Байрыева Л. С., Шевченко В. В. – Москва : Транспорт, 1986. – 206 с.

24 Щуров, Н. И. Повышение эффективности использования электрической энергии в субподсистеме электрического транспорта / Н. И. Щуров, В. И. Сопов, Ю. А. Прокушев, А. А. Штанг // Совершенствование технических средств электрического транспорта: Сборник научных трудов. – Ответ. ред. Г. Н. Ворфоломеев. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2002. – С. 6-20.

25 Ярославцев, М. В. Определение потерь в тяговом приводе автономного транспортного средства с комбинированной энергетической установкой методом имитационного моделирования / М. В. Ярославцев ; науч. рук. В. Н. Аносов // Наука. Технологии. Инновации : сб. науч. тр. : в 9 ч., Новосибирск, 1–5 дек. 2015 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2015. – Ч. 5. – С. 174-175.

26 Мятеж, А. В. Исследование сезонных изменений потребления электрической энергии троллейбусом / А. В. Мятеж, М. В. Ярославцев, Д. Д. Забелина // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2014. –

№ 1-2. – С. 282-286.

27 Solaris trollino characteristics. – Solaris bus & coach [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://solarisbus.pl/en/trollino.html> – загл. с экрана.

28 Super capacitor buses in Shanghai [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://slideshare.net/ResearchIndia/super-capacitor-buses-in-shanghai-5156990>

29 Colvers Enterprises: product portfolio [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.colversenterprise.com/products>

30 Environmentally Friendly Electric Buses in Vienna. – Siemens [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.siemens.com/innovation/en/news/2013/e_inno_1308_2.htm – загл. с экрана.

31 Alé EL. – Rampini [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.rampini.it/en/buses/2_ale-el-elettrico.php – загл. с экрана.

32 Multiple Energy Sources Hybridization: The Future of Electric Vehicles?- InTech open [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.intechopen.com/books/new-generation-of-electric-vehicles/multiple-energy-sources-hybridization-the-future-of-electric-vehicles-> – загл. с экрана.

33 ZEBRA plus ultracapacitors: A good match for energy efficient EVs [Электронный ресурс] / J. Dixon, M. Ortúzar. – Режим доступа: <http://web.ing.puc.cl/~power/paperspdf/dixon/72a.pdf> – загл. с экрана.

34 10.5m Pure Electric City Bus with Super Capacitor, Lithium-ion Batteries and Zero Displacement [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://1052164.en.makepolo.com/products/10.5m-Pure-Electric-City-Bus-with-p39381668.html> – загл. с экрана.

35 Тяговый электропривод транспортного средства: интернет-портал МЭИ. – [Электронный ресурс] / В. А. Глушенко. – Режим доступа: http://mpei.ru/Science/AcademicWork/Documents/project_93.pdf – загл. с экрана.

36 Каталог продукции. – ЗАО «Тролза» [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.trolza.ru/catproduct.pl> – загл. с экрана.

37 Парфенов, С. И. Троллейбус с автономным ходом / С. И. Парфенов // Транспорт Российской Федерации. – 2012. – №3–4 (41–42). – С. 66-67.

38 Литиевые аккумуляторы. Электронный образовательный портал МИСиС [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://eef.misis.ru/sites/default/files/lectures/3-4+Тема++4.+Литиевые+аккумуляторы.pdf> – загл. с экрана.

39 Литий-ионные аккумуляторы // Справочник по радиоэлектронике и электротехнике [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.elwiki.ru/wiki/litii-ionnye-akkumulyatory-li-ion> – загл. с экрана.

40 Литий-ионные аккумуляторы. Продукция и цены [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.liotech.ru/newsection7159> – загл. с экрана.

41 Thunder Sky Winston WB-LYP400АНА [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://en.winston-battery.com/index.php/products/power-battery/item/wb-lyp400aha?category_id=176 – загл. с экрана.

42 Суперконденсаторы. Электронный образовательный портал МИСиС [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://eef.misis.ru/sites/default/files/lectures/3-4+Тема+6.+Суперконденсаторы.pdf> – загл. с экрана.

43 Пат. 2140681 Российская Федерация, Н01G9/00, Н01G9/04. Асимметричный электрохимический конденсатор / С. Н. Разумов, С. В. Литвиненко, А. Д. Клементов, А. И. Беляков. – № 98121076/09 ; заявл. 27.11.1998 ; опубл. 27.10.1999. – 5 с. : ил.

44 Yunasko ultracapacitor product line [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://yunasko.com/index.php?option=com_content&view=article&id=83&Itemid=105&lang=en – загл. с экрана.

45 ОАО «Новосибирский завод радиодеталей «Оксид»: Суперконденсаторы [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.oksid.com/index.php/produksiya/item/213-суперконденсаторы> – загл. с экрана.

46 YEC Ni-cap ultracapacitor [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://yec.com.tw/ProductPdf/NL%20Type.pdf> – загл. с экрана.

47 Nesscap Ultracapacitors, Supercapacitors and Modules [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.nesscap.com/product/overview.jsp> – загл. с экрана.

48 Panasonic Electric Double Layer Capacitors [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://industrial.panasonic.com/cdbs/www-data/pdf/RDH0000/ABC0000C60>

.pdf – загл. с экрана.

49 Maxwell Technologies: Ultracapacitor Overview [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/> – загл. с экрана.

50 LS Ultracapacitor [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://ultracapacitor.co.kr/index.html> – загл. с экрана.

51 Korchip: Energy Storage Innovator [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.korchip.com/eng/> – загл. с экрана.

52 Eaton Large cells [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://cooperindustries.com/content/public/en/bussmann/electronics/products/eaton-supercapacitors/cylindrical1.html> – загл. с экрана.

53 JSR Micro ULTIMO prismatic cell [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.jsrmicro.com/index.php/lp-prismatic-cell> – загл. с экрана.

54 Illinois Capacitor EDLC / Supercapacitors [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.illinoiscapacitor.com/products/super-capacitors.aspx> – загл. с экрана.

55 Bayindir, K. A comprehensive overview of hybrid electric vehicle: Powertrain configurations, powertrain control techniques and electronic control units / K. Bayindir, M. Gozukucuk, A. Teke // *Energy conversion and Management*. – Vol. 52 (2011). – P. 1305-1313.

56 Mamadou, Bailo Camara. Design and new control of DC/DC converters to share energy between supercapacitors and batteries in hybrid vehicles / Bailo Camara Mamadou, Gualous Hamid, Gustin Frederic, Berthon Alain // *IEEE Transactions on Vehicular Technologies*. – Vol. 57(5), 2008. – P. 2721–2735.

57 Hyunjae, Yoo. System integration and power-flow management for a series hybrid electric vehicle using supercapacitors and batteries / Yoo Hyunjae, Sul Seung-Ki, Park Yongho, Jeong Jongchan // *IEEE Transactions on Industrial Applications*. – Vol. 44 (1), 2008. – P. 108–114.

58 Jianping, Gao. A comparative study of supervisory control strategies for a series hybrid electric vehicle / Gao Jianping, Sun Fengchun, He Hongwen; Zhu GG, Strangas EG // *Power and energy engineering conference, Asia-Pacific, 2009*. – P. 1–7.

59 Northcott, D. R. Design of a bidirectional buck-boost dc/dc converter for a series hybrid electric vehicle using PSCAD/EMTDC. / D. R. Northcott, S. Filizadeh, A. R. Chevretil // IEEE vehicle power and propulsion conference, 2009. – P. 1561–1566.

60 Hyunjae, Yoo. A power flow control strategy for optimal fuel efficiency of a variable speed engine-generator based series hybrid electric vehicle / Yoo Hyunjae, Cho Byung-Geuk, Sul Seung-Ki, Kim Sang-Min, Park Yongho // IEEE Energy Convers Congress Exposition, 2009. – P. 443–450.

61 Bingzhan, Zhang. Multi-objective parameter optimization of a series hybrid electric vehicle using evolutionary algorithms. / Zhang Bingzhan, Chen Zhihang, Mi C, Murphey Y. L. // IEEE Vehicle power and propulsion conference, 2009. – P. 921–925.

62 Gokasan, M. Sliding mode based powertrain control for efficiency improvement in series hybrid-electric vehicles power electronics / M. Gokasan, S. Bogosyan, D. J. Goering // IEEE Transactions. – Vol. 21(3), 2006. – P. 779-790.

63 Bogosyan, S. A novel model validation and estimation Approach for hybrid serial electric vehicles / S. Bogosyan, M. Gokasan, D. J. Goering // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – Vol. 56 (4 part 1), 2007. – P. 1485–1497.

64 Ehsani, M. Hybrid electric vehicles: architecture and motor drives / M. Ehsani, Gao Yimin, J. M. Miller // Proceedings of the IEEE. – Vol. 95(4), 2007. – P. 719–728.

65 Emadi Ali. Handbook of automotive power electronics and motor drives / Emadi Ali. – CRC Press – Taylor & Francis Inc., 2005. – 736 p.

66 Toth-Nagy Csaba. Investigation and simulation of the planetary combination hybrid electric vehicle / Toth-Nagy Csaba. – MSc in Mechanical Engineering Department of Mechanical and Aerospace Engineering. – Morgantown, West Virginia, 2000. – 124 p.

67 Jih-Sheng. Energy management power converters in hybrid electric and fuel cell vehicles / Jih-Sheng, D. J. Land Nelson // Proceedings of the IEEE. – Vol. 95(4), 2007. – P. 766–777.

68 Kohler, T. P. Investigation of control strategies for hybrid energy storage systems in hybrid electric vehicles / T. P. Kohler, D. Buecherl, H. G. Herzog // Vehicle

power and propulsion conference, VPPC'09. – IEEE, 2009. – P. 1–5. – DOI: 10.1109/VPPC.2009.5289686

69 Lukic, S. M. Power management of an ultracapacitor / battery hybrid energy storage system in an HEV / S. M. Lukic et al. // Vehicle power and propulsion conference, VPPC'06. – IEEE, 2006. – P. 1–6.

70 Matsuo, H. Characteristics of the multiple-input DC–DC converter / H. Matsuo et al. // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – Vol. 51(3), 2004. – P. 625–631.

71 Solero, L. Design of multiple-input power converter for hybrid vehicles / L. Solero, A. Lidozzi, J. A. Pomilio // IEEE Transactions on Power Electronics. – Vol. 20(5), 2005. – P. 1007–1016.

72 Schaltz, E. Influence of battery / ultracapacitor energy storage sizing on battery if etimein a fuel cell hybrid electric vehicle / E. Schaltz, A. Khaligh, P. O. Rasmussen // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – Vol. 58(8), 2009. – P. 3882–3891.

73 Camara, M. B. Design and new control of DC/DC converters to share energy between supercapacitors and batteries in hybrid vehicles / M. B. Camara et al. // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – Vol. 57(5), 2008. – P. 2721–2735.

74 Camara, M. B. DC/DC converter design for supercapacitor and battery power management in hybrid vehicle Applications; polynomial control strategy / M. B. Camara et al. // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – Vol. 57(2), 2010. – P. 587–597.

75 Siang Fui Tie. A review of energy sources and energy management system in electric vehicles / Siang Fui Tie, Chee Wei Tan // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – Vol. 20 (2013). – P. 82–102.

76 Liu, D. A Z vs bi-directional DC –DC converter for multiple energy storage elements / D. Liu, L. Hui // IEEE Transactions on Power Electronics. – Vol. 21(5), 2006. – P. 1513–1517.

77 Lei, W. Maximum fuel economy – oriented power management design for a fuel cell vehicle using battery and ultracapacitor / W. Lei, L. Hui // IEEE Transactions

on Industry Applications. – Vol. 46(3), 2010. – P. 1011–1020.

78 Chan, C. C. Electric vehicles charge forward / C. C. Chan, Y. S. Wong // IEEE Power Energy Magazine. – Vol. 2(6), 2004. – P. 24–33.

79 Katsargyri, G. E. Optimally controlling hybrid electric vehicles using path forecasting / G. E. Katsargyri, I. Kolmanovsky, J. Michelini et al. // Proceedings of 2009 American control conference, 2009. – P. 4613–4617.

80 Salmasi, F. R. Control strategies for hybrid electric vehicles: evolution, classification, comparison and future trends / F. R. Salmasi // IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 56(5 part 1), 2007. – P. 2393–2404.

81 Sadegh, N. Optimization of the fuel consumption of a parallel hybrid electric vehicle, advanced intelligent mechatronics / N. Sadegh, B. Khan, J. Meisel // Proceedings of IEEE/ASME international conference, 2005. – P. 128–133.

82 Gao, J. P. Equivalent fuel consumption optimal control of a series hybrid electric vehicle / J. P. Gao, G. M. G. Zhu, E. G. Strangas, F. C. Sun // Proceedings of the institution of mechanical engineers. – Part D. – Journal of Automobile Engineering. – Vol. 223 (2009). – P. 1003–1018.

83 Hajimiri, M. H. A predictive and battery protective control strategy for series HEV / M. H. Hajimiri, F. R. Salmasi // Journal of Asian Electric Vehicles, Vol. 6(2), 2008. – P. 1159–1165.

84 Phillips, A. M. Vehicle system controller design for a hybrid electric vehicle control Applications / A. M. Phillips, M. Jankovic, K. E. Bailey // Proceedings of the 2000 IEEE international conference, 2000. – P. 297–302.

85 Amiri, M. Minimization of power losses in hybrid electric vehicles in view of the prolonging of battery life / M. Amiri, M. Esfahanian, M. R. Hairi-Yazdi, V. Esfahanian // Journal of Power Sources, Vol. 190(2), 2009. – P. 372–379.

86 Karbowski, D. Plug-in vehicle control strategy: from global optimization to real time Application / D. Karbowski, A. Rousseau, S. Pagerit, P. Sharer // Proceedings of 22th International Electric Vehicle Symposium, 2006. – P. 1–12.

87 Tate, E. D. Finding ultimate limits of performance for hybrid electric vehicles / E. D. Tate, S. P. Boyd // SAE technical paper 2000-01-3099, 2000. – P. 33-44.

88 Delpar, S. Control of a parallel hybrid powertrain: optimal control / S. Delpar, J. Lauber, T. M. Guerra, J. Rimoux // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – Vol. 53(3), 2004. – P. 872–881.

89 Lin, C. C. Power management strategy for a parallel hybrid electric truck / C. C. Lin, H. Peng, J. W. Grizzle, J.-M. Kang // IEEE Transactions on Control System Technology. – Vol. 11(6), 2003. – P. 839–848.

90 Lin, C. C. A stochastic control strategy for hybrid electric vehicles / C. C. Lin, H. Peng, J. W. Grizzle // Proceedings of American control conference, Boston, MA, 2004. – P. 4710–4715.

91 Gielniak, M. J. Power management strategy based on game theory for fuel cell hybrid electric vehicles / M. J. Gielniak, Z. J. Shen // Proceedings of 60th IEEE Vehicular Technology Conference, 2004. – P. 4422–4426.

92 Piccolo, A. Optimization of energy flow management in hybrid electric vehicles via genetic algorithms / A. Piccolo, L. Ippolito, V. Galdi, A. Vaccaro // Proceedings of IEEE/ASME Intern. Conf. Adv. Intellectual Mechatronics, 2001. – P. 434–439.

93 Sciarretta, A., Optimal control of parallel hybrid electric vehicles / A. Sciarretta, M. Back, L. Guzzella // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – Vol. 12(3), 2004. – P. 352–363.

94 Xu Liangfei. Optimal vehicle control strategy of a fuel cell/battery hybrid city bus / Xu Liangfei, Li Jianqiu, Hua Jianfeng, Li Xiangjun, Ouyang Minggao // International Journal of Hydrogen Energy. – Vol. 34(17), 2009. – P. 7323–7333.

95 Pisu, P. Energy management and drivability control problems for hybrid electric vehicles / P. Pisu, K. Koprubasi, G. Rizzoni // Proceedings of 44th IEEE conference on decision control, 2005. – P. 1824–1830.

96 Pisu, P. Control for hybrid electric vehicles / P. Pisu, G. Rizzoni // Proceedings of 43rd IEEE conference on decision control, 2004. – P. 3497–3502.

97 Salman, M. Predictive energy management strategies for hybrid vehicles / M. Salman, M.-F. Chang, J.-S. Chen // Proceedings of 44th IEEE conference on decision control, 2005. – P. 21–25.

98 Бирюков, В. В. Энергосбережение на электрическом транспорте / В. В. Бирюков – Иркутск : изд-во ИГТУ, 2009. – 244 с.

99 Ефремов, И. С. Теория и расчет троллейбусов (электрическое оборудование). В 2 т. Т. 1 / И. С. Ефремов, Г. В. Косарев. – Москва : Транспорт, 1981. – 294 с.

100 Троллейбус пассажирский ЗиУ-682Г-01: руководство по эксплуатации 682Г-3902001-01РЭ / АО «Троллейбусный завод»: Саратов, 1999. – 292 с.

101 Мятеж, А. В. 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.

102 Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance / Ed. R. Folkson. – Woodhead Publishing Limited, Elsevier, 2014. – 784 p.

103 Ribau, J. Analysis of four-stroke, Wankel, and microturbine based range extenders for electric vehicles / J. Ribau, C. Silva, F. P. Brito, J. Martins // Energy Conversion and Management. – Vol. 58 (2012). – P. 120–133.

104 ГОСТ 20306-90 Автотранспортные средства. Топливная экономичность. Методы испытаний / Москва : изд-во стандартов, 1990. – 34 с.

105 Santiangeli, A. Experimental analysis of the auxiliaries consumption in the energy balance of a pre-series plug-in hybrid-electric vehicle / A. Santiangeli, C. Fiori, F. Zuccari, A. Dell’Era, F. Orecchini, A. D’Orazio // Energy Procedia. – Vol. 45 (2014). – P. 779 – 788.

106 Masih-Tehrani, M. Optimum sizing and optimum energy management of a hybrid energy storage system for lithium battery life improvement / Masih-Tehrani M., M.-R. Ha’iri-Yazdi, V. Esfahanian, A. Safaei // Journal of Power Sources. – Vol. 244 (2013). – P. 2-10.

107 Lajunen, A. Energy consumption and cost-benefit analysis of hybrid and electric city buses / A. Lajunen. – Transportation Research. – Part C. – Vol. 38 (2014). – P. 1–15.

108 Байрыева, Л. С. Тяговые расчеты подвижного состава: учеб. пособие / Л. С. Байрыева, А. В. Прокопович; под ред. И. К. Никольского. – Москва : Изд-во МЭИ, 1997. – 87 с.

109 Бендат, Дж. Прикладной анализ случайных данных / Дж. Бендат, А. Пирсол. – Москва : Мир, 1989. – 408 с.

110 Ефремов, И. С. Теория городских пассажирских перевозок / И. С. Ефремов, В. М. Кобозев, В. А. Юдин. – Москва : Транспорт, 1981. – 535 с.

111 Sustainable Energy: Choosing Among Options / J. W. Tester, E. M. Drake, M. J. Driscoll, M. W. Golay, W. A. Peters. – Cambridge, MA : MIT Press, 2005. – 872 p.

112 ELFA – The Electric Powertrain [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.industry.usa.siemens.com/drives/us/en/electric-drives/hybrid-drives/Documents/elfa-brochure.pdf> – загл. с экрана.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

**Основные характеристики современных
конденсаторов двойного электрического слоя**

Таблица А.1 – Технические характеристики КДЭС

Производитель	Тип элемента	Емкость, Φ	Номинальное напряжение, В	Запасы энергии, Вт·ч	Внутреннее сопротивление, мОм	Масса, кг	Удельная энергоемкость, Вт·ч/кг	Удельная мощность, кВт/кг
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Yunasko	Power cell	400	2,7	0,41	0,25	0,105	3,8	33
Yunasko	Power cell	1200	2,7	1,2	0,15	0,26	4,7	22
Yunasko	Energy cell	1200	2,7	1,2	0,3	0,215	5,6	13,5
Yunasko	Energy cell	3000	2,7	3,0	0,15	0,49	6,2	12
ОАО НЗР Оксид	ЭКДЭС НЗР 650 Э27	650	2,7	0,65	0,59	0,23	2,9	н/д
ОАО НЗР Оксид	ЭКДЭС НЗР 1200 Э28	1200	2,7	1,2	0,47	0,3	4,1	н/д
ОАО НЗР Оксид	ЭКДЭС НЗР 1500 Э29	1500	2,7	1,52	0,41	0,33	4,6	н/д
ОАО НЗР Оксид	ЭКДЭС НЗР 2000 Э30	2000	2,7	2,0	0,32	0,4	5,1	н/д
ОАО НЗР Оксид	ЭКДЭС НЗР 3000 Э31	3000	2,7	3,0	0,26	0,53	5,7	н/д

1	2	3	4	5	6	7	8	9
ОАО НЗР Оксид	ЭКДЭС НЗР 5000 Э32	5000	2,7	5,06	0,23	0,8	6,3	н/д
YEC	NL 100	100	2,7	0,10	15	0,023	4,4	2,5
YEC	NL 200	200	2,7	0,20	13	0,042	4,8	1,6
YEC	NL 400	400	2,7	0,405	12	0,075	5,4	1
Nesscap	ESHSR-0650C0- 002R7A5	650	2,7	0,656	0,6	0,205	3,2	7,1
Nesscap	ESHSR-1200C0- 002R7A5	1200	2,7	1,215	0,48	0,28	4,3	6,5
Nesscap	ESHSR-2000C0- 002R7A5	2000	2,7	2,025	0,33	0,39	5,2	6,7
Nesscap	ESHSR-3000C0- 002R7A5	3000	2,7	3,0	0,26	0,53	5,7	6,3
Panasonic	HL 50	50	2,7	0,05	15	0,019	2,7	1,4
Panasonic	HL 100	100	2,7	0,10	10	0,025	4,05	1,62
Maxwell	K2 2.85V/3400F	3400	2,85	3,84	0,28	0,52	7,4	6,7

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Maxwell	BCAP0650 P270	650	2,7	0,66	0,8	0,16	4,1	6,8
Maxwell	BCAP1500 P270	1500	2,7	1,52	0,47	0,28	5,4	6,6
Maxwell	BCAP3000 P270	3000	2,7	3,0	0,29	0,51	6	5,9
LS Mtron	LSUC 002R8S 0100F EA	100	2,8	0,11	9	0,023	4,7	8,7
LS Mtron	LSUC 002R8S 0120F EA	120	2,8	0,13	9	0,023	5,7	9,5
LS Mtron	LSUC 002R7C 0650F EA	650	2,7	0,66	0,57	0,2	3,3	8,64
LS Mtron	LSUC 002R7C 1500F EA	1500	2,7	1,52	0,28	0,32	4,7	12,0
LS Mtron	LSUC 002R7C 3000F EA	3000	2,7	3,0	0,23	0,515	5,9	12,6
Korchip	DL2R5107	100	2,5	0,087	18	н/д	н/д	н/д
Korchip	DL2R5407E	400	2,5	0,35	16	н/д	н/д	н/д
Korchip	DL2R7107	100	2,7	0,10	9	н/д	н/д	н/д

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Korchip	DL2R7407E	400	2,7	0,405	12	н/д	н/д	н/д
Cooper (Eaton)	XB3550-2R5307-R	300	2,5	0,26	7	0,069	3,77	3,2
Cooper (Eaton)	XB3585-2R5607-R	600	2,5	0,52	3,7	0,122	4,27	3,4
Cooper (Eaton)	XV3550-2R7307-R	300	2,7	0,30	4,5	0,062	4,90	6,6
Cooper (Eaton)	XV3585-2R7607-R	600	2,7	0,61	2,6	0,108	5,63	7,3
Cooper (Eaton)	XL60-2R7308W-R	3000	2,7	3,04	0,23	0,525	5,79	15,0
JSR	CPQ2300S	2300	3,8	4,61	0,7	0,58	8	н/д
JSR	CPP3300S	3300	3,8	6,62	1	0,51	13	н/д
Illinois Capacitor	506DCR2R3SKV	50	2,3	0,037	100	0,007	5,25	0,91
Illinois Capacitor	227DCR2R3SNI	220	2,3	0,161	45	0,025	6,47	0,56
Illinois Capacitor	407DCR2R3SDG	400	2,3	0,29	25	0,066	4,45	0,38
Illinois Capacitor	807DCR2R3SEK	800	2,3	0,59	15	0,074	7,94	0,58

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

**Пример зарегистрированных зависимостей
скорости движения троллейбуса от времени**

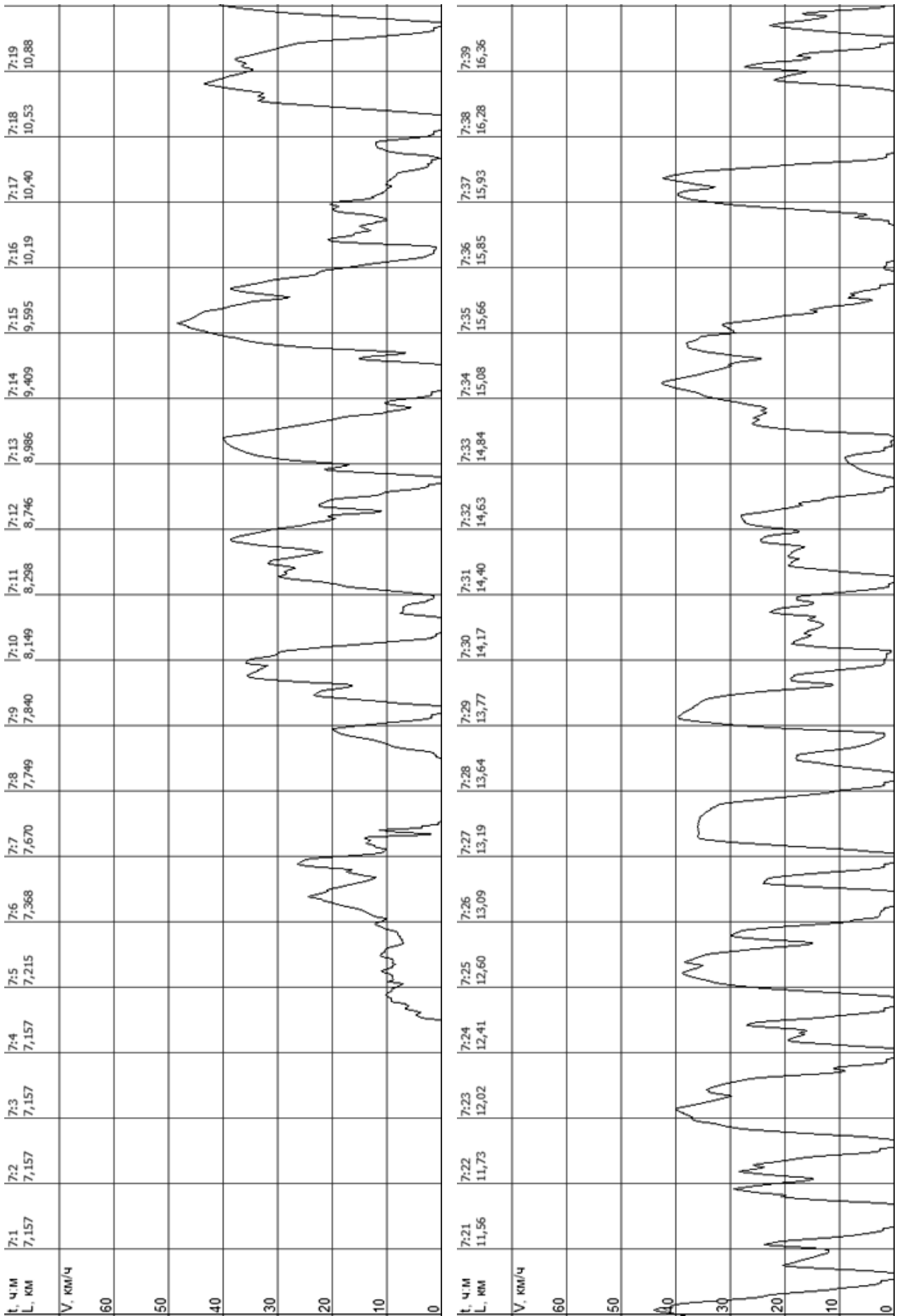


Рисунок Б.1 – Пример зарегистрированной зависимости $V(t)$

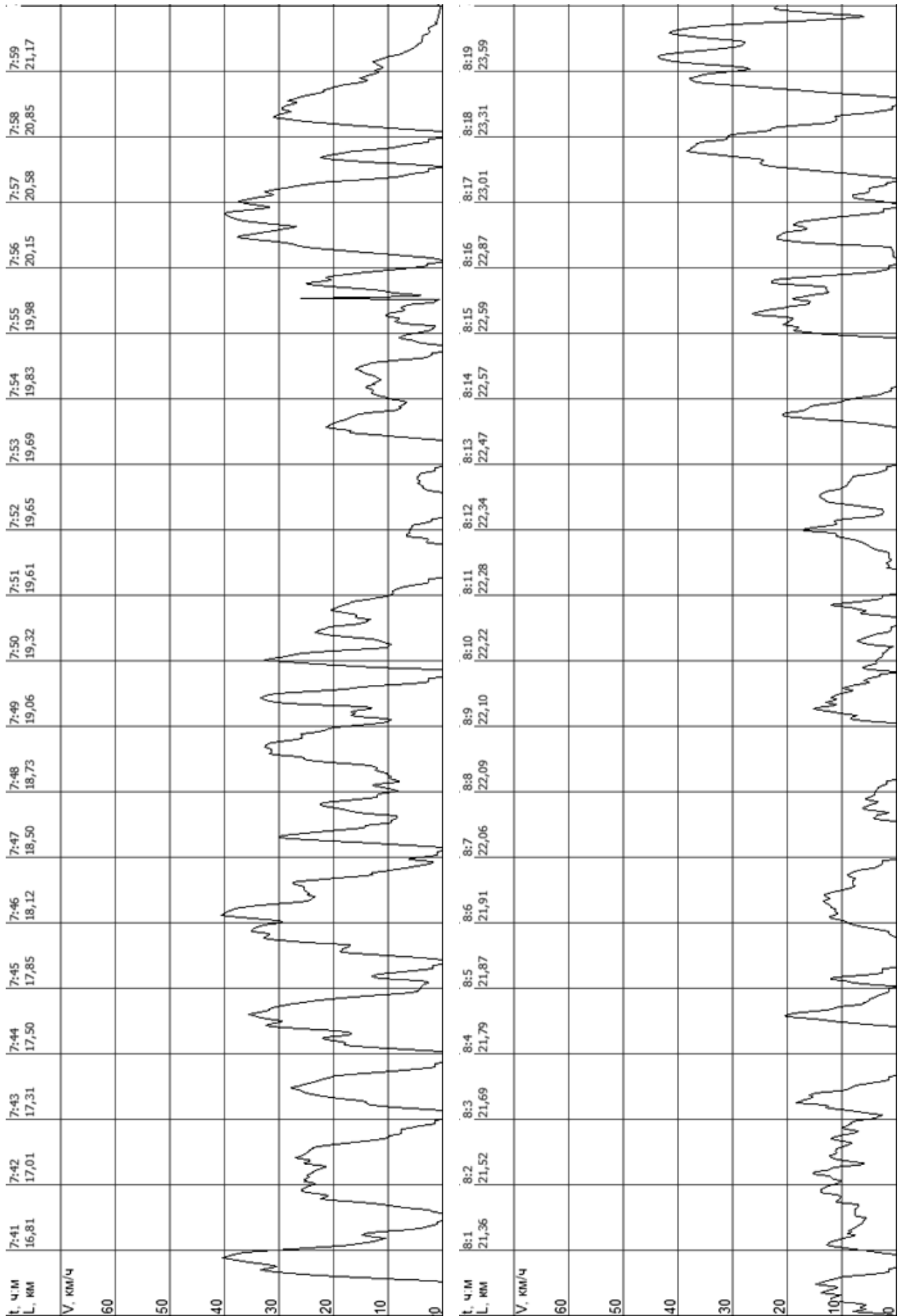


Рисунок Б.2 – Пример зарегистрированной зависимости $V(t)$

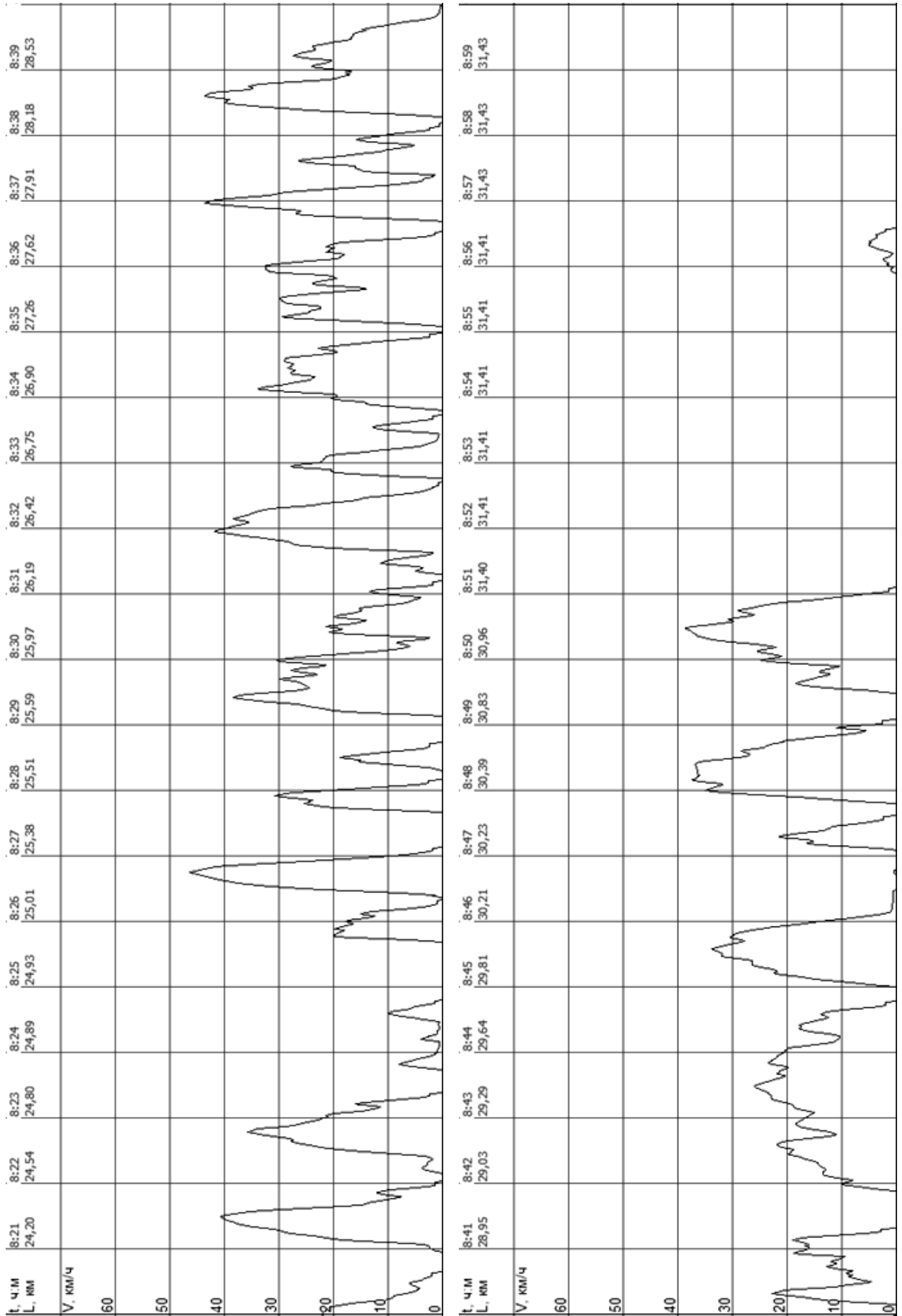


Рисунок Б.3 – Пример зарегистрированной зависимости $V(t)$

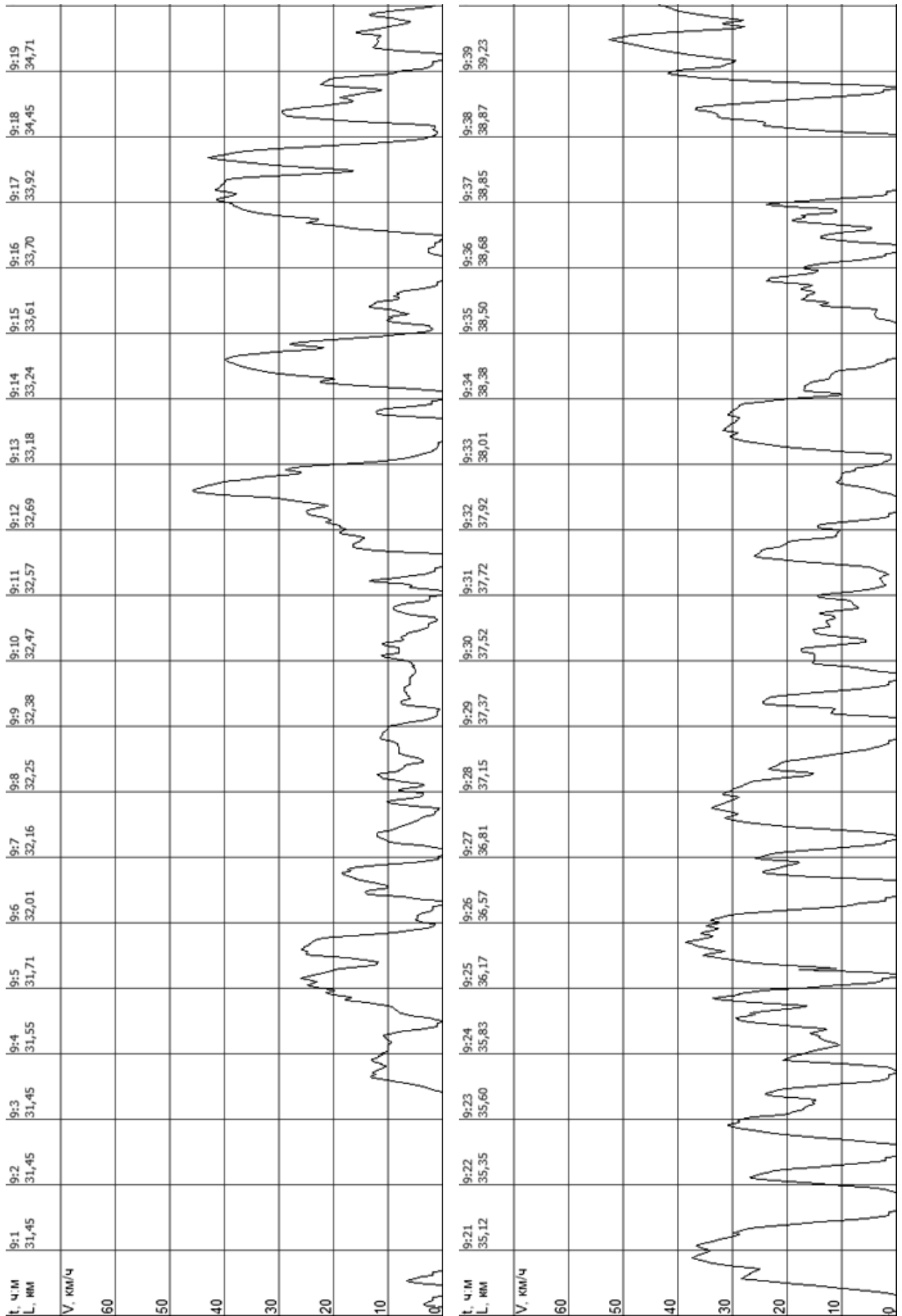


Рисунок Б.4 – Пример зарегистрированной зависимости $V(t)$

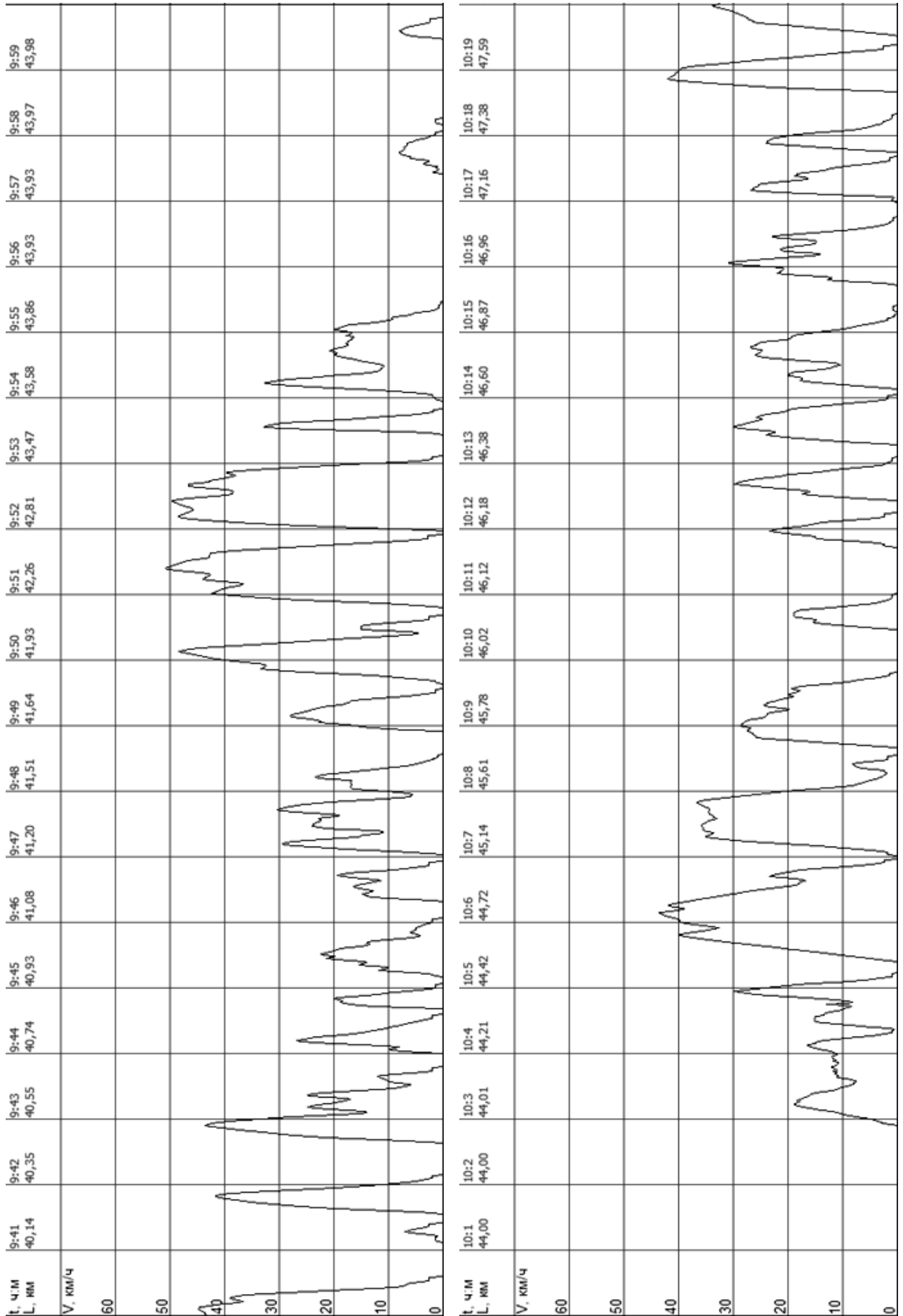


Рисунок Б.5 – Пример зарегистрированной зависимости $V(t)$

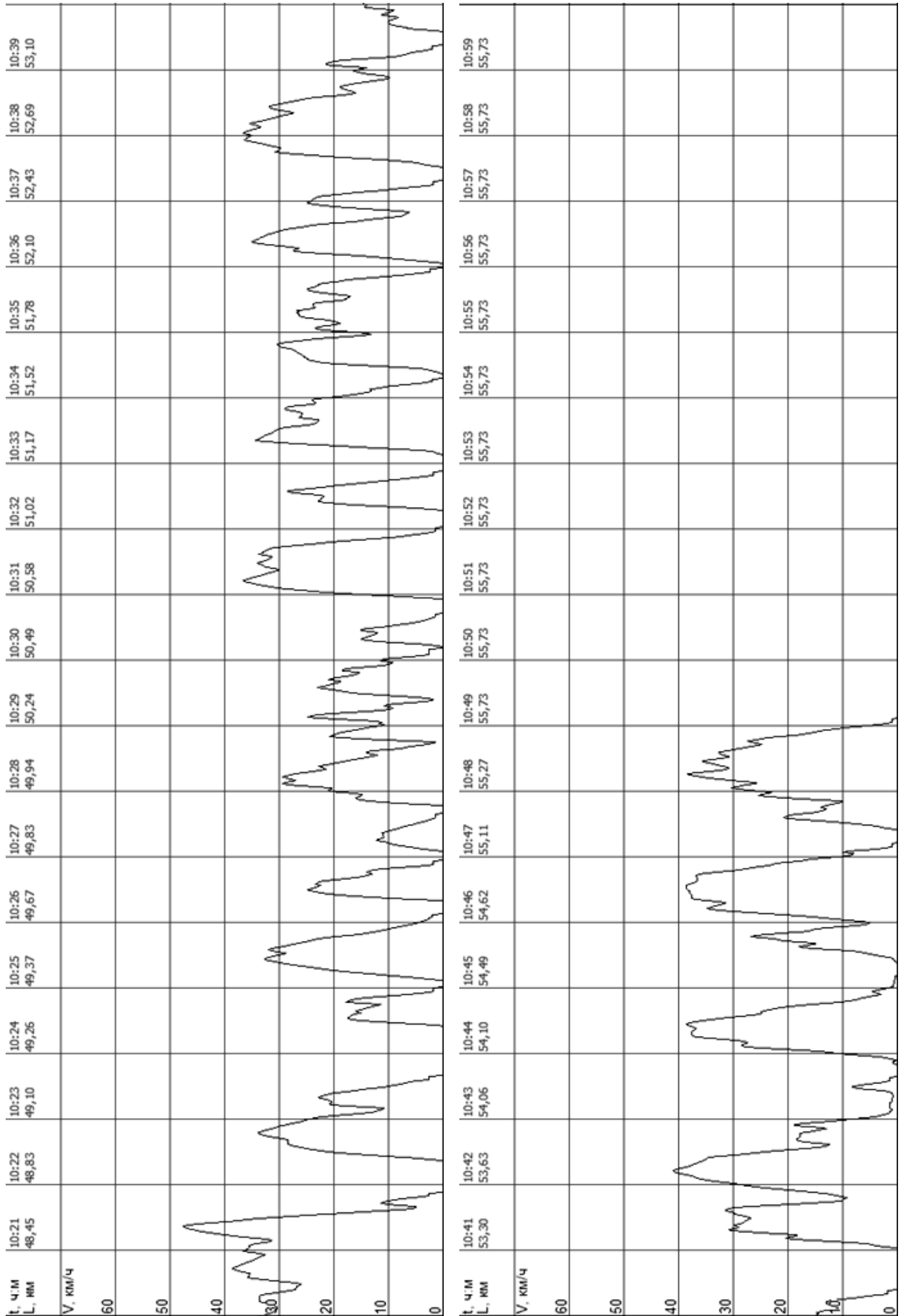


Рисунок Б.6 – Пример зарегистрированной зависимости $V(t)$

ПРИЛОЖЕНИЕ В

**Результаты тягово-энергетического расчета движения автобуса
с комбинированной энергетической установкой
по записанным экспериментально кривым движения**

Результаты тягово-энергетических расчетов для гибридного автобуса, выполненных на основании экспериментальных кривых движения, приведены в таблице В.1. В таблице приняты следующие обозначения:

V_C – скорость сообщения;

t_P – длительность рейса;

L – пройденный транспортным средством путь;

E_G – выработанная генератором энергия (без учета выработки на собственные нужды ТС);

P_C – средняя мощность генератора за рейс;

E_y – удельный расход энергии;

E_B –возвращенная при торможении энергия;

α_B – доля возвращенной энергии по отношению к выработанной генератором.

Таблица В.1 – Результаты тягово-энергетического расчета

Рейс		V_C , км/ч	t_P , с	L , м	E_G , кДж	P_C , кВт	E_y		E_B , кДж	α_B
№ п/п	Дата						кДж/км	кВт·ч/км		
1	15.02.2013, №01	19,30	2414,5	12941	64400	26,67	4976,2	1,382	12151	0,189
2	15.02.2013, №02	16,50	2646,5	12132	60725	22,95	5005,2	1,390	12321	0,203
3	15.02.2013, №03	14,25	3353,5	13277	61600	18,37	4639,7	1,289	11359	0,184
4	15.02.2013, №04	9,74	4377,5	11842	57050	13,03	4817,4	1,338	11578	0,203
5	15.02.2013, №05	12,56	3699	12908	57050	15,42	4419,7	1,228	9210	0,161
6	15.02.2013, №06	13,36	3447	12791	58100	16,86	4542,4	1,262	10495	0,181
7	15.02.2013, №07	11,50	3864,5	12343	61075	15,80	4948,2	1,374	14395	0,236

Продолжение таблицы В.1

№	Дата	V_C , км/ч	t_p , с	L , м	$E_{Г}$, кДж	P_C , кВт	E_y , кДж/км	E_y , кВт·ч/км	E_B , кДж	α_B
8	15.02.2013, №08	10,85	4436	13375	64350	14,51	4811,4	1,336	14150	0,220
9	15.02.2013, №09	9,87	4289	11763	51450	12,00	4374,0	1,215	7360	0,143
10	15.02.2013, №10	12,12	3616,5	12173	59675	16,50	4902,4	1,362	14274	0,239
11	15.02.2013, №11	8,11	5746,5	12953	56700	9,87	4377,3	1,216	9747	0,172
12	15.02.2013, №12	11,25	3806	11891	58450	15,36	4915,3	1,365	14551	0,249
13	16.02.2013, №01	18,13	2743,5	13816	66850	24,37	4838,5	1,344	12690	0,190
14	16.02.2013, №02	17,31	2531,5	12169	60900	24,06	5004,5	1,390	13122	0,215
15	16.02.2013, №03	16,88	2763	12956	63175	22,86	4876,2	1,354	11674	0,185
16	16.02.2013, №04	18,54	2358,5	12147	63875	27,08	5258,3	1,461	15162	0,237
17	16.02.2013, №05	16,54	2819,5	12952	65250	23,14	5037,7	1,399	14606	0,224
18	16.02.2013, №06	15,01	3295	13742	69300	21,03	5042,9	1,401	16089	0,232
19	16.02.2013, №07	14,74	3160,5	12940	64225	20,32	4963,1	1,379	13970	0,218
20	16.02.2013, №08	15,07	3056	12789	62825	20,56	4912,3	1,365	14554	0,232
21	16.02.2013, №09	16,82	3040,5	14205	75950	24,98	5346,9	1,485	21978	0,289
22	16.02.2013, №10	14,20	2782,5	10977	57925	20,82	5277,0	1,466	15740	0,272
23	16.02.2013, №11	14,09	3242	12689	61950	19,11	4882,3	1,356	13547	0,219
24	16.02.2013, №12	13,11	3255	11853	65625	20,16	5536,4	1,538	18775	0,286
25	16.02.2013, №13	14,88	3129,5	12937	63350	20,24	4896,8	1,360	14910	0,235
26	16.02.2013, №14	14,77	2965	12165	60300	20,34	4956,7	1,377	13180	0,219
27	16.02.2013, №15	14,98	3113	12957	61950	19,90	4781,2	1,328	12509	0,202
28	16.02.2013, №16	14,92	3195	13245	68700	21,50	5186,7	1,441	18029	0,262
29	17.02.2013, №01	20,46	2275,5	12930	62650	27,53	4845,4	1,346	11144	0,178
30	17.02.2013, №02	17,65	2478	12147	60375	24,36	4970,2	1,381	12378	0,205
31	17.02.2013, №03	18,66	2494,5	12930	63350	25,40	4899,5	1,361	11995	0,189

Продолжение таблицы В.1

№	Дата	V_C , км/ч	t_p , с	L , м	$E_{Г}$, кДж	P_C , кВт	E_y , кДж/км	E_y , кВт·ч/км	E_B , кДж	α_B
32	17.02.2013, №04	17,96	2441	12179	63350	25,95	5201,4	1,445	15387	0,243
33	17.02.2013, №05	16,41	2913	13282	66150	22,71	4980,3	1,383	13064	0,197
34	17.02.2013, №06	16,39	2956	13455	68775	23,27	5111,6	1,420	15977	0,232
35	17.02.2013, №07	16,36	2854	12969	61650	21,60	4753,5	1,320	12221	0,198
36	17.02.2013, №08	16,67	2631	12185	64575	24,54	5299,4	1,472	16798	0,260
37	17.02.2013, №09	16,39	2838	12921	63300	22,30	4898,9	1,361	14367	0,227
38	17.02.2013, №10	14,71	2372,5	9696	44750	18,86	4615,3	1,282	8745	0,195
39	17.02.2013, №11	16,91	3279,5	15400	85575	26,09	5556,7	1,544	25512	0,298
40	17.02.2013, №12	15,56	2832,5	12242	67725	23,91	5532,0	1,537	21872	0,323
41	17.02.2013, №13	16,37	2844	12935	73200	25,74	5658,9	1,572	21702	0,296
42	17.02.2013, №14	17,06	2878,5	13644	68600	23,83	5028,0	1,397	17750	0,259
43	17.02.2013, №15	14,81	3145,5	12941	61950	19,69	4787,2	1,330	14579	0,235
44	17.02.2013, №16	14,87	3360,5	13885	68950	20,52	4965,7	1,379	18053	0,262
45	17.02.2013, №17	17,68	2653	13029	67725	25,53	5198,1	1,444	19839	0,293
46	17.02.2013, №18	16,86	2601,5	12181	66500	25,56	5459,2	1,516	18893	0,284
47	17.02.2013, №19	20,41	2280,5	12931	69300	30,39	5359,0	1,489	18677	0,270
48	17.02.2013, №20	17,93	2680	13347	69475	25,92	5205,3	1,446	19392	0,279
49	18.02.2013, №01	19,26	2416,5	12931	64575	26,72	4993,9	1,387	13109	0,203
50	18.02.2013, №02	16,66	2617	12113	64400	24,61	5316,5	1,477	15264	0,237
51	18.02.2013, №03	14,34	3263	12997	60375	18,50	4645,2	1,290	12187	0,202
52	18.02.2013, №04	10,45	4210	12217	61600	14,63	5042,0	1,401	15130	0,246
53	18.02.2013, №05	13,68	3405,5	12944	60025	17,63	4637,1	1,288	12152	0,202
54	18.02.2013, №06	13,55	3227	12150	60725	18,82	4997,9	1,388	14946	0,246
55	18.02.2013, №07	13,09	3565	12967	62475	17,52	4818,0	1,338	13623	0,218

Продолжение таблицы В.1

№	Дата	V_C , км/ч	t_p , с	L , м	$E_{Г}$, кДж	P_C , кВт	E_y , кДж/км	E_y , кВт·ч/км	E_B , кДж	α_B
56	18.02.2013, №08	10,95	4531,5	13782	66375	14,65	4815,9	1,338	15188	0,229
57	18.02.2013, №09	9,54	4873,5	12919	59850	12,28	4632,6	1,287	13564	0,227
58	18.02.2013, №10	11,81	3699,5	12139	53900	14,57	4440,2	1,233	10574	0,196
59	18.02.2013, №11	7,93	5892	12975	61600	10,45	4747,5	1,319	15488	0,251
60	18.02.2013, №12	13,01	3355	12125	54800	16,33	4519,7	1,255	10744	0,196
61	18.02.2013, №13	14,32	3254,5	12943	58975	18,12	4556,6	1,266	10836	0,184
62	18.02.2013, №14	15,41	2826	12100	56000	19,82	4628,2	1,286	11077	0,198
63	18.02.2013, №15	16,16	2961,5	13290	60375	20,39	4543,0	1,262	10984	0,182
64	18.02.2013, №16	19,31	2395,5	12850	61425	25,64	4780,1	1,328	12259	0,200
65	27.02.2013, №01	12,86	3474	12407	58975	16,98	4753,4	1,320	12045	0,204
66	27.02.2013, №02	13,68	3094	11753	59500	19,23	5062,5	1,406	14844	0,249
67	28.02.2013, №01	19,18	2353	12533	65625	27,89	5236,2	1,454	15515	0,236
68	28.02.2013, №02	16,86	2507	11739	60025	23,94	5113,4	1,420	13508	0,225
69	28.02.2013, №03	15,44	2927	12552	62650	21,40	4991,1	1,386	15126	0,241
70	28.02.2013, №04	12,08	2783,5	9338	51100	18,36	5472,3	1,520	15484	0,303
71	28.02.2013, №11	12,82	3532	12578	64225	18,18	5106,0	1,418	16729	0,260
72	28.02.2013, №12	10,49	4033	11750	55950	13,87	4761,7	1,323	11941	0,213
73	28.02.2013, №13	9,96	4951	13700	69825	14,10	5096,7	1,416	17214	0,247
74	28.02.2013, №14	11,99	3521	11729	59325	16,85	5057,9	1,405	15186	0,256
75	28.02.2013, №15	10,30	3989,5	11419	50700	12,71	4439,9	1,233	9182	0,181
76	28.02.2013, №16	10,15	3300	9308	44100	13,36	4737,9	1,316	9182	0,208
77	28.02.2013, №17	9,54	3902	10337	46725	11,97	4520,1	1,256	8607	0,184
78	28.02.2013, №18	14,21	2909,5	11483	55875	19,20	4865,7	1,352	11635	0,208

Продолжение таблицы В.1

№	Дата	V_C , км/ч	t_p , с	L , м	$E_{Г}$, кДж	P_C , кВт	E_y , кДж/км	E_y , кВт·ч/км	E_B , кДж	α_B
79	01.03.2013, №01	12,19	3710	12563	62125	16,75	4945,1	1,374	15597	0,251
80	01.03.2013, №02	12,57	3368,5	11762	58800	17,46	4999,2	1,389	15634	0,266
81	01.03.2013, №03	10,48	4297,5	12510	65275	15,19	5218,0	1,449	19170	0,294
82	01.03.2013, №04	12,56	3379	11785	59250	17,53	5027,8	1,397	15379	0,260
83	01.03.2013, №05	14,71	3059,5	12502	59325	19,39	4745,2	1,318	13117	0,221
84	01.03.2013, №06	15,60	2720	11786	53100	19,52	4505,2	1,251	10122	0,191
85	01.03.2013, №07	15,71	2865,5	12506	61075	21,31	4883,5	1,357	12757	0,209
86	01.03.2013, №08	19,38	2388,5	12859	68075	28,50	5294,1	1,471	19235	0,283
87	02.03.2013, №01	10,59	4252,5	12511	61075	14,36	4881,6	1,356	16468	0,270
88	02.03.2013, №02	15,70	2691,5	11736	59675	22,17	5084,9	1,412	15521	0,260
89	02.03.2013, №03	17,25	2604,5	12481	68100	26,15	5456,5	1,516	20188	0,296
90	02.03.2013, №04	15,79	2675,5	11739	58275	21,78	4964,4	1,379	15036	0,258
91	02.03.2013, №05	17,77	2530	12485	64225	25,39	5144,1	1,429	16514	0,257
92	02.03.2013, №06	16,42	2595	11833	64400	24,82	5442,2	1,512	18445	0,286
93	02.03.2013, №07	15,40	2992,5	12801	61950	20,70	4839,5	1,344	14097	0,228
94	02.03.2013, №08	16,22	2538,5	11439	61250	24,13	5354,5	1,487	18341	0,299
95	02.03.2013, №09	18,90	2381,5	12502	65400	27,46	5231,0	1,453	17567	0,269
96	02.03.2013, №10	17,89	2583	12837	68075	26,36	5303,2	1,473	17528	0,257
97	03.03.2013, №01	16,41	2753,5	12549	66325	24,09	5285,2	1,468	17697	0,267
98	03.03.2013, №02	16,37	2585	11757	58100	22,48	4941,7	1,373	14978	0,258
99	03.03.2013, №03	16,86	2668	12492	66675	24,99	5337,6	1,483	19032	0,285
100	03.03.2013, №04	15,73	2701	11799	58800	21,77	4983,5	1,384	15399	0,262
101	03.03.2013, №05	16,77	2698,5	12572	72800	26,98	5790,9	1,609	21654	0,297
102	03.03.2013, №06	14,37	3333	13302	64050	19,22	4814,9	1,337	14727	0,230

Продолжение таблицы В.1

№	Дата	V_C , км/ч	t_p , с	L , м	$E_{Г}$, кДж	P_C , кВт	E_y , кДж/км	E_y , кВт·ч/км	E_B , кДж	α_B
103	03.03.2013, №07	16,29	2781	12580	64050	23,03	5091,3	1,414	16265	0,254
104	03.03.2013, №08	17,85	2370	11751	60200	25,40	5123,0	1,423	16201	0,269
105	03.03.2013, №09	19,24	2122	11340	57400	27,05	5061,6	1,406	13240	0,231
106	03.03.2013, №10	19,32	2385	12797	66900	28,05	5227,8	1,452	17371	0,260
107	04.03.2013, №01	16,03	2804	12486	59675	21,28	4779,5	1,328	12524	0,210
108	04.03.2013, №02	11,91	3558	11769	57050	16,03	4847,3	1,346	13430	0,235
109	04.03.2013, №03	14,38	3122,5	12476	64925	20,79	5204,1	1,446	17325	0,267
110	04.03.2013, №04	15,24	2771,5	11733	56350	20,33	4802,7	1,334	12102	0,215
111	04.03.2013, №05	14,86	3025	12487	64400	21,29	5157,5	1,433	18320	0,284
112	04.03.2013, №06	14,27	2951	11696	63000	21,35	5386,3	1,496	18366	0,292
113	04.03.2013, №07	13,87	3263,5	12572	69150	21,19	5500,5	1,528	21566	0,312
114	04.03.2013, №08	14,35	2950	11755	64750	21,95	5508,2	1,530	21124	0,326
115	04.03.2013, №09	11,61	3993	12883	63525	15,91	4930,9	1,370	16239	0,256
116	04.03.2013, №10	12,29	3356,5	11454	59675	17,78	5209,8	1,447	16850	0,282
117	04.03.2013, №11	9,38	4813,5	12544	57925	12,03	4617,7	1,283	13513	0,233
118	04.03.2013, №12	12,45	3397,5	11747	58275	17,15	4960,6	1,378	15611	0,268
119	04.03.2013, №13	16,16	2784,5	12501	62475	22,44	4997,5	1,388	16333	0,261
120	04.03.2013, №14	16,74	2513,5	11686	59675	23,74	5106,7	1,419	15981	0,268
121	04.03.2013, №15	19,51	2306	12496	67375	29,22	5391,5	1,498	19166	0,284
122	04.03.2013, №16	18,69	2293,5	11907	64050	27,93	5379,0	1,494	15898	0,248
123	19.06.2013, №01	12,43	3713,5	12818	64200	17,29	5008,7	1,391	15309	0,238
124	19.06.2013, №02	12,90	3184,5	11413	59675	18,74	5228,6	1,452	15629	0,262
125	19.06.2013, №03	13,95	3229	12511	70875	21,95	5665,2	1,574	21835	0,308
126	19.06.2013, №04	12,30	3439	11746	58275	16,95	4961,1	1,378	14708	0,252

Продолжение таблицы В.1

№	Дата	V_C , км/ч	t_p , с	L , м	$E_{Г}$, кДж	P_C , кВт	E_y , кДж/км	E_y , кВт·ч/км	E_B , кДж	α_B
127	19.06.2013, №05	12,76	3519	12475	61425	17,46	4923,7	1,368	13648	0,222
128	19.06.2013, №06	16,72	2527	11738	64750	25,62	5516,3	1,532	17422	0,269
129	19.06.2013, №07	17,94	2511,5	12513	69300	27,59	5538,1	1,538	17943	0,259
130	19.06.2013, №08	18,55	2481,5	12789	75300	30,34	5888,0	1,636	22868	0,304
131	20.06.2013, №01	18,32	2463,5	12535	61950	25,15	4942,3	1,373	11522	0,186
132	20.06.2013, №02	16,33	2582,5	11714	65450	25,34	5587,1	1,552	17612	0,269
133	20.06.2013, №03	16,76	2695,5	12546	63875	23,70	5091,2	1,414	15521	0,243
134	20.06.2013, №04	12,34	3427,5	11753	58950	17,20	5015,7	1,393	14363	0,244
135	20.06.2013, №05	14,58	3076,5	12458	61600	20,02	4944,6	1,374	14190	0,230
136	20.06.2013, №06	12,81	3286	11694	53200	16,19	4549,2	1,264	10392	0,195
137	20.06.2013, №07	13,72	3287	12524	58625	17,84	4680,9	1,300	11344	0,193
138	20.06.2013, №08	11,55	3649	11708	57050	15,63	4872,7	1,354	12447	0,218
139	20.06.2013, №09	12,46	3610,5	12497	58800	16,29	4705,0	1,307	11380	0,194
140	20.06.2013, №10	12,66	3337	11738	58100	17,41	4949,7	1,375	14135	0,243
141	20.06.2013, №11	13,09	3443	12521	56700	16,47	4528,5	1,258	9794	0,173
142	20.06.2013, №12	11,02	4021	12310	55200	13,73	4484,3	1,246	11027	0,200
143	20.06.2013, №13	14,45	2962,5	11894	63000	21,27	5297,0	1,471	17531	0,278
144	20.06.2013, №14	14,87	3099,5	12803	68425	22,08	5344,4	1,485	18234	0,266
145	21.06.2013, №01	21,35	1915	11356	61200	31,96	5389,0	1,497	13389	0,219
146	21.06.2013, №02	16,19	2590	11646	53900	20,81	4628,2	1,286	8389	0,156
147	21.06.2013, №03	15,76	2859,5	12517	57750	20,20	4613,7	1,282	9141	0,158
148	21.06.2013, №04	11,58	3646	11733	53850	14,77	4589,7	1,275	9740	0,181
149	21.06.2013, №05	15,14	2978,5	12526	59850	20,09	4778,1	1,327	11592	0,194
150	21.06.2013, №06	12,86	3262	11652	55825	17,11	4791,1	1,331	11298	0,202

Продолжение таблицы В.1

№	Дата	V_C , км/ч	t_p , с	L , м	$E_{Г}$, кДж	P_C , кВт	E_y , кДж/км	E_y , кВт·ч/км	E_B , кДж	α_B
151	21.06.2013, №07	13,62	3272	12380	56175	17,17	4537,5	1,260	9482	0,169
152	21.06.2013, №08	11,84	3880,5	12758	57150	14,73	4479,4	1,244	9660	0,169
153	21.06.2013, №09	13,23	3395	12480	64400	18,97	5160,1	1,433	16643	0,258
154	21.06.2013, №10	10,92	3892	11801	57050	14,66	4834,5	1,343	12519	0,219
155	21.06.2013, №11	5,09	8886,5	12555	61800	6,95	4922,2	1,367	15246	0,247
156	21.06.2013, №12	14,12	3154,5	12376	73850	23,41	5967,1	1,658	22628	0,306
157	21.06.2013, №13	11,92	3205	10613	53550	16,71	5045,7	1,402	12574	0,235
158	21.06.2013, №14	13,28	3536	13048	71050	20,09	5445,4	1,513	19319	0,272
159	21.06.2013, №15	16,98	2724	12849	75150	27,59	5848,6	1,625	21057	0,280
160	21.06.2013, №16	20,09	1993	11123	74375	37,32	6686,8	1,857	24357	0,327
161	22.06.2013, №01	19,30	2337	12532	72625	31,08	5795,2	1,610	21023	0,289
162	22.06.2013, №02	17,29	2447	11751	76800	31,39	6535,7	1,815	25585	0,333
163	22.06.2013, №03	18,79	2399,5	12523	76475	31,87	6106,9	1,696	24181	0,316
164	22.06.2013, №04	17,22	2451,5	11725	66675	27,20	5686,4	1,580	20388	0,306
165	22.06.2013, №05	18,30	2464	12527	79275	32,17	6328,5	1,758	26695	0,337
166	22.06.2013, №06	16,15	2612	11720	71050	27,20	6062,1	1,684	23575	0,332
167	22.06.2013, №07	13,02	3522,5	12736	60375	17,14	4740,7	1,317	12099	0,200
168	22.06.2013, №08	16,28	2665,5	12057	71750	26,92	5950,7	1,653	19586	0,273
169	22.06.2013, №09	17,04	2521	11931	58450	23,19	4899,0	1,361	11053	0,189
170	22.06.2013, №10	16,64	2529,5	11690	56875	22,48	4865,1	1,351	10454	0,184
171	22.06.2013, №11	15,81	2911,5	12785	61600	21,16	4818,3	1,338	11405	0,185
172	22.06.2013, №12	17,42	3040	14709	71050	23,37	4830,5	1,342	11866	0,167
173	22.06.2013, №13	18,20	3047	15401	86100	28,26	5590,4	1,553	21034	0,244
174	22.06.2013, №14	18,09	2539,5	12761	72800	28,67	5704,7	1,585	20044	0,275

Продолжение таблицы В.1

№	Дата	V_C , км/ч	t_p , с	L , м	$E_{Г}$, кДж	P_C , кВт	E_y , кДж/км	E_y , кВт·ч/км	E_B , кДж	α_B
175	23.06.2013, №01	15,15	3179,5	13385	72275	22,73	5399,8	1,500	19805	0,274
176	23.06.2013, №02	15,97	2638	11699	55300	20,96	4726,8	1,313	9995	0,181
177	23.06.2013, №03	15,78	2855,5	12515	59325	20,78	4740,2	1,317	11433	0,193
178	23.06.2013, №04	15,97	2648	11743	58450	22,07	4977,3	1,383	12943	0,221
179	23.06.2013, №05	16,82	2672,5	12484	62650	23,44	5018,5	1,394	14326	0,229
180	23.06.2013, №06	15,18	3167	13350	64575	20,39	4837,0	1,344	13087	0,203
181	23.06.2013, №07	16,19	2974,5	13377	65975	22,18	4932,0	1,370	13274	0,201
182	23.06.2013, №08	16,87	2544,5	11921	64225	25,24	5387,7	1,497	15416	0,240
183	23.06.2013, №09	17,27	2574	12346	59500	23,12	4819,5	1,339	11381	0,191
184	23.06.2013, №10	16,85	2733,5	12797	63875	23,37	4991,2	1,386	13845	0,217
185	24.06.2013, №01	19,31	2492,5	13368	73500	29,49	5498,3	1,527	16825	0,229
186	24.06.2013, №02	16,00	2632,5	11702	64800	24,62	5537,6	1,538	16616	0,256
187	24.06.2013, №03	16,78	2686,5	12522	61250	22,80	4891,2	1,359	12849	0,210
188	24.06.2013, №04	11,03	3835	11751	56525	14,74	4810,1	1,336	12655	0,224
189	24.06.2013, №05	13,94	3233,5	12519	57450	17,77	4588,9	1,275	10456	0,182
190	24.06.2013, №06	13,34	3161,5	11717	56875	17,99	4854,0	1,348	12655	0,223
191	24.06.2013, №07	12,84	3597	12830	63375	17,62	4939,5	1,372	14214	0,224
192	24.06.2013, №08	12,36	3331	11434	57575	17,28	5035,3	1,399	13841	0,240
193	24.06.2013, №09	15,50	2910	12527	66750	22,94	5328,6	1,480	18736	0,281
194	24.06.2013, №10	12,02	3516,5	11737	56875	16,17	4845,8	1,346	13621	0,239
195	24.06.2013, №11	13,38	3376,5	12549	57575	17,05	4588,1	1,274	11348	0,197
196	24.06.2013, №12	13,13	3214	11725	53900	16,77	4596,9	1,277	10168	0,189
197	24.06.2013, №13	11,15	4050,5	12549	57925	14,30	4615,9	1,282	12334	0,213
198	24.06.2013, №14	13,20	3485	12778	58800	16,87	4601,7	1,278	11381	0,194

Окончание таблицы В.1

№	Дата	V_C , км/ч	t_p , с	L , м	$E_{Г}$, кДж	P_C , кВт	E_y , кДж/км	E_y , кВт·ч/км	E_B , кДж	α_B
199	25.06.2013, №01	18,70	2573	13367	65100	25,30	4870,1	1,353	12361	0,190
200	25.06.2013, №02	16,66	2540	11754	63525	25,01	5404,4	1,501	15646	0,246
201	25.06.2013, №03	15,27	2953	12526	57750	19,56	4610,4	1,281	9352	0,162
202	25.06.2013, №04	10,88	3887,5	11749	56175	14,45	4781,2	1,328	11740	0,209
203	25.06.2013, №05	13,56	3325	12521	58500	17,59	4672,3	1,298	11146	0,191
204	25.06.2013, №06	11,84	3564	11722	51900	14,56	4427,6	1,230	8551	0,165
205	25.06.2013, №07	14,35	3135,5	12501	60025	19,14	4801,7	1,334	11614	0,193
206	25.06.2013, №08	10,70	3941,5	11718	53200	13,50	4539,9	1,261	9827	0,185
207	25.06.2013, №09	13,92	3250,5	12565	61250	18,84	4874,7	1,354	12561	0,205
208	25.06.2013, №10	11,83	3569	11725	55825	15,64	4761,0	1,323	12535	0,225
209	25.06.2013, №11	13,20	3497,5	12826	63000	18,01	4911,8	1,364	13865	0,220
210	25.06.2013, №12	14,59	3079,5	12478	59850	19,43	4796,4	1,332	12205	0,204
Наименьшее значение		5,086	1915	9307,9	44100	6,95	4374,0	1,215	7360	0,143
Наибольшее значение		21,349	8886,5	15401,5	86100	37,32	6686,8	1,857	26695	0,337
Среднее значение		14,820	3127,2	12379,7	62327,5	20,87	5034,8	1,399	14785	0,235
Среднекв. отклонение		2,783	735,0	787,0	6239,5	4,93	392,6	0,109	3760	0,0413
Дисперсия		7,745	540180,5	619338,2	38930744	24,26	154111,4	0,01189	14134534	0,001702

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Акт внедрения результатов диссертационной работы

УТВЕРЖДАЮ
Первый проректор НГТУ
д.т.н. профессор



Расторгуев Г. И.

2016 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Ярославцева Михаила Викторовича

Комиссия в составе:

Председатель – Штанг А. А., к.т.н., декан ФМА

Члены комиссии – Горева Л. П., к.т.н., доц., председатель методической
комиссии ФМА;

– Спиридонов Е. А., к.т.н., доц., зам. зав. каф. ЭТК,

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Энергоэффективный тяговый привод городского безрельсового транспорта», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в учебном процессе факультета мехатроники и автоматизации Новосибирского государственного технического университета при подготовке бакалавров и магистрантов направлений 13.03.02, 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» при проведении лабораторных работ по дисциплинам «Моделирование электротранспортных систем», «Автоматизированный тяговый электропривод», «Накопители энергии в электротранспортном комплексе».

Использование предложенных Ярославцевым М. В. моделей тягового электропривода позволит глубже изучить процессы преобразования энергии тяговыми электроприводами, повысить качество подготовки студентов.

Председатель:

Члены комиссии:

к.т.н. Штанг А. А.

к.т.н., доц. Горева Л. П.

к.т.н., доц. Спиридонов Е. А.