

На правах рукописи

УДК 629.33

Косицын Борис Борисович

**МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ЗАКОНА
ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОБУСА ПО ГОРОДСКОМУ МАРШРУТУ**

Специальность: 05.05.03 – Колесные и гусеничные машины

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2017

Работа выполнена на кафедре колесных машин федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель: **Котиев Георгий Олегович**,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой колесных машин МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Котляренко Владимир Иванович**,
доктор технических наук, старший научный сотрудник, начальник Отдела технической политики Департамента государственной политики в области автомобильного и городского пассажирского транспорта Министерства транспорта Российской Федерации

Рудин Виктор Геннадьевич,
кандидат технических наук, доцент, директор по НИОКР ООО «СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПРОЕКТЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ»

Ведущая организация: Государственный научный центр Российской Федерации Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ»

Защита состоится « 22 » января 2018 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.07 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 105005, Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.07.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на официальном сайте МГТУ им. Н.Э. Баумана: www.bmstu.ru.

Автореферат разослан «__» _____. _____. г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.т.н.

Е.Б. Сарак

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В современном мегаполисе значительную роль в пассажирских перевозках играет наземный автомобильный транспорт. При интенсивном росте жилой застройки и, соответственно, населения происходит расширение городских границ, увеличение транспортной сети и уплотнение графика движения маршрутного транспорта. В настоящее время широкое распространение получает городской автомобильный электротранспорт – электробус, отличающийся от автобусов отсутствием двигателя внутреннего сгорания и, соответственно, отсутствием вредных выбросов. А от троллейбусов – отсутствием постоянного подсоединения к контактной сети линий электропередач. Для такого вида электротранспорта из-за ограничений емкости бортовых источников энергии особенно актуальна задача повышения энергоэффективности движения на городском маршруте, который предполагает наличие остановок и ограничение времени движения между ними. Например, при снижении энергозатрат на движение станет возможным:

- увеличение пассажировместимости путем рационального выбора параметров источника/накопителя энергии (количества батарей) на борту, следовательно, снижения снаряженной массы;
- снижение стоимости за счет уменьшения количества батарей, требуемого для обеспечения необходимого запаса хода;
- увеличение запаса хода при той же емкости элемента питания, то есть снижение простоев электробуса для необходимой зарядки батарей.

Таким образом, разработка метода определения энергоэффективного закона движения электробуса по заданному городскому маршруту представляется актуальной задачей.

Цель и задачи. Целью диссертационной работы является повышение энергоэффективности движения электробуса на городском маршруте путем реализации оптимального закона движения между остановками. Под законом движения между остановками понимается зависимость скорости электробуса от пройденного пути при следовании по маршруту, то есть фазовая траектория в естественных координатах.

Для достижения цели в работе поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработан метод определения энергоэффективного закона движения электробуса путем решения задачи оптимизации при ограничении на время в пути и целевой функции минимизации энергозатрат;
2. Разработана математическая модель движения электробуса по маршруту, пригодная для решения задачи оптимизации;
3. Проведено экспериментальное исследование с целью анализа адекватности математической модели движения и преобразования энергии электробуса по городскому маршруту;
4. Разработан закон движения электробуса между остановками с учетом особенностей эксплуатации;

5. Проведена оценка энергоэффективности электробуса в процессе движения по маршруту М2 в г. Москва при использовании оптимального закона управления.

Научная новизна работы заключается:

1. В разработке метода определения энергоэффективного закона движения электробуса на городском маршруте с учетом особенностей эксплуатации, отличающегося использованием метода динамического программирования для решения задачи оптимизации применительно к объекту городского автомобильного электротранспорта;

2. В разработке математической модели движения электробуса как твердого тела, приведенного к криволинейной координате, отличающейся учетом повышения сопротивления движению в зависимости от кривизны траектории;

3. В разработке математической модели связи управляющего воздействия с тяговым/тормозным моментом на ведущем мосту электробуса, отличающейся единым представлением режимов работы электромашины для случая разгона, выбега и торможения электробуса.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и результатов доказана сравнением теоретических и экспериментальных результатов исследования динамики и энергопотребления электробуса и базируется на использовании апробированных методов имитационного математического моделирования и теории планирования эксперимента.

Практическая значимость заключается в разработке программного обеспечения для проведения имитационного моделирования движения электробуса и определения энергоэффективной фазовой траектории с учетом: ограничения на время движения, ограничений по скорости и ускорению в процессе движения, экстренного вмешательства водителя в процесс движения.

Реализация результатов работы. Результаты работы внедрены в ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», в ОИЦ «Группы ГАЗ», в НИИ СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана, в ООО «СПМ», а также используются в учебном процессе при подготовке инженеров на кафедре «Колёсные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы заслушивались и обсуждались:

1. На научно-технических семинарах кафедры колёсных машин МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2014-2017 гг.);

2. На IX международной научно-технической конференции «Инновационные технологии в машиностроении: от проектирования к производству конкурентоспособной продукции» (Волгоград, 2017 г.);

3. На десятой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2017 г.);

4. На международном автомобильном научном форуме «Интеллектуальные транспортные системы» (МАНФ-2017) (Москва, 2017 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 2 научные статьи в журналах из перечня, рекомендованного ВАК РФ, общим объёмом 1,7 п.л.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих результатов и выводов, списка литературы. Работа изложена на 165 листах машинного текста, содержит 50 рисунков, 8 таблиц. Список литературы содержит 91 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, заключающегося в разработке метода определения энергоэффективного закона движения электробуса по городскому маршруту. Приведено краткое содержание выполненных исследований, сформулирована цель работы и отражены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор систем помощи принятия решений водителю. Рассмотрены основные этапы, из которых состоит процесс движения электробуса между остановками:

- разгон и/или поддержание скорости в случае необходимости;
- выбег;
- рекуперативное торможение;
- торможение рабочей тормозной системой.

Проанализирована последовательность преобразования энергии при движении электробуса (Рис. 1).

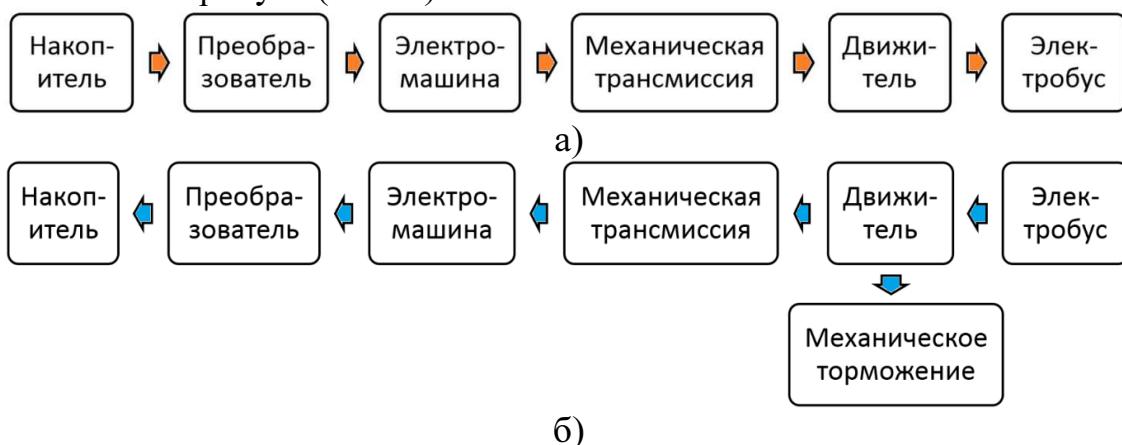


Рис. 1. Преобразование энергии при движении электробуса: а) – разрядки накопителя (разгон); б) – зарядки накопителя (для рассматриваемых случаев торможения)

Проведены обзор и анализ работ, посвященных методам поиска оптимального управления, а также анализ существующих математических моделей динамики колесных машины и основных систем электробуса, которые определяют преобразование энергии на борту.

Представленная задача поиска оптимального управления наиболее полно изучена в области железнодорожного транспорта. Особенно известны работы ученых Баранова Л.А., Головичер Я.М, Ерофеева Е.В., Максимова В.М.,

Моисеева А.А., Урдина В.И., Монахова О.И., Мугинштейна Л.А., Сидоренко В.Г., Ябко И.А., Васильевой М.А., Петрова Ю.П., Костромина А.М. и других.

Исследование динамики движения колесных машин наиболее полно отражено в работах ученых Чудакова Е. А., Певзнера Я.М., Антонова Д.А., Литвинова А. С., Фаробина Я. Е., Котиева Г. О., Дика А. Б., Смирнова Г. А., Попова С. Д., Ларина В. В., Горелова В.А., Чернышева Н.В. и других, а также в трудах научных школ: МГТУ им. Н.Э. Баумана, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, МАДИ, МАМИ, ФГУП ГНЦ «НАМИ», Академии БТВ, 21 НИИИ МО РФ и других.

Проведенный анализ показал, что для разработки метода определения энергоэффективного закона движения электробуса по городскому маршруту целесообразно использовать классический дискретный метод динамического программирования Беллмана, который позволяет получить наиболее полную «картину» вариантов попадания электробуса из рассматриваемой точки фазового пространства в конечную. С целью повышения скорости вычислений в качестве уравнения динамики электробуса принято решение использовать модель движения электробуса как твердого тела, приведенного к криволинейной координате. Для обеспечения универсальности разработанной программы в качестве модели электродвигателя целесообразно использовать связь частоты вращения вала ротора с крутящим моментом согласно механической характеристике с учетом потерь энергии на всех участках ее преобразования от батареи к электромашине в виде КПД. Для обеспечения возможности последующего выбора оптимальной энергоемкости элемента питания для электробуса, работающего на конкретном маршруте, целесообразно полагать при расчетах емкость батареи бесконечной и не проводить моделирование ее зарядно/разрядной характеристики. Оценивать энергию, затрачиваемую на движение электробуса, предлагается как механическую на валу ротора с учетом КПД преобразования механической и электрической энергии и потерь в преобразователе. Принято обоснованное решение, что полученный при помощи разработанного метода закон движения электробуса необходимо проанализировать при помощи модели плоского движения, разработанной и верифицированной на кафедре СМ10 «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана, с учетом взаимодействия колеса с опорным основанием. Эта модель наиболее полно описывает динамику движения электробуса и позволит проанализировать полученный результат.

Выполненные в первой главе исследования позволили сформулировать задачи работы, решению которых посвящены остальные главы диссертации.

Во второй главе представлены две имитационные математические модели движения электробуса:

- модель движения электробуса как твердого тела, приведенного к криволинейной координате (используется как уравнение состояния электробуса для нахождения функции Беллмана в каждой точке фазовой траектории);

- модель плоского движения электробуса по твердой опорной поверхности (используется для анализа результатов использования оптимального энергоэффективного закона управления).

При описании движения электробуса как твердого тела, приведенного к криволинейной координате, были приняты основные допущения:

- электробус движется по твердой недеформируемой опорной поверхности без скольжения шин в пятне контакта (радиус качения колеса $r_k \approx$ радиусу качения колеса без скольжения $r_{k0} \approx$ динамическому радиусу колеса r_d);

- контакт колеса с опорной поверхностью является точечным;
- углы увода малы ($\cos(\delta) \approx 1$; $\sin(\delta) \approx \delta$; $\tan(\delta) \approx \delta$);
- углы наклона опорной поверхности малы ($\cos(\alpha) \approx 1$; $\sin(\alpha) \approx \alpha$).

Расчетная схема движения электробуса как твердого тела, приведенного к криволинейной координате, представлена на Рис. 2.

Движение электробуса рассматривается как движение твердого тела, с уводом, но без скольжения колес по опорному основанию с учетом повышения сопротивления движению в зависимости от кривизны траектории.

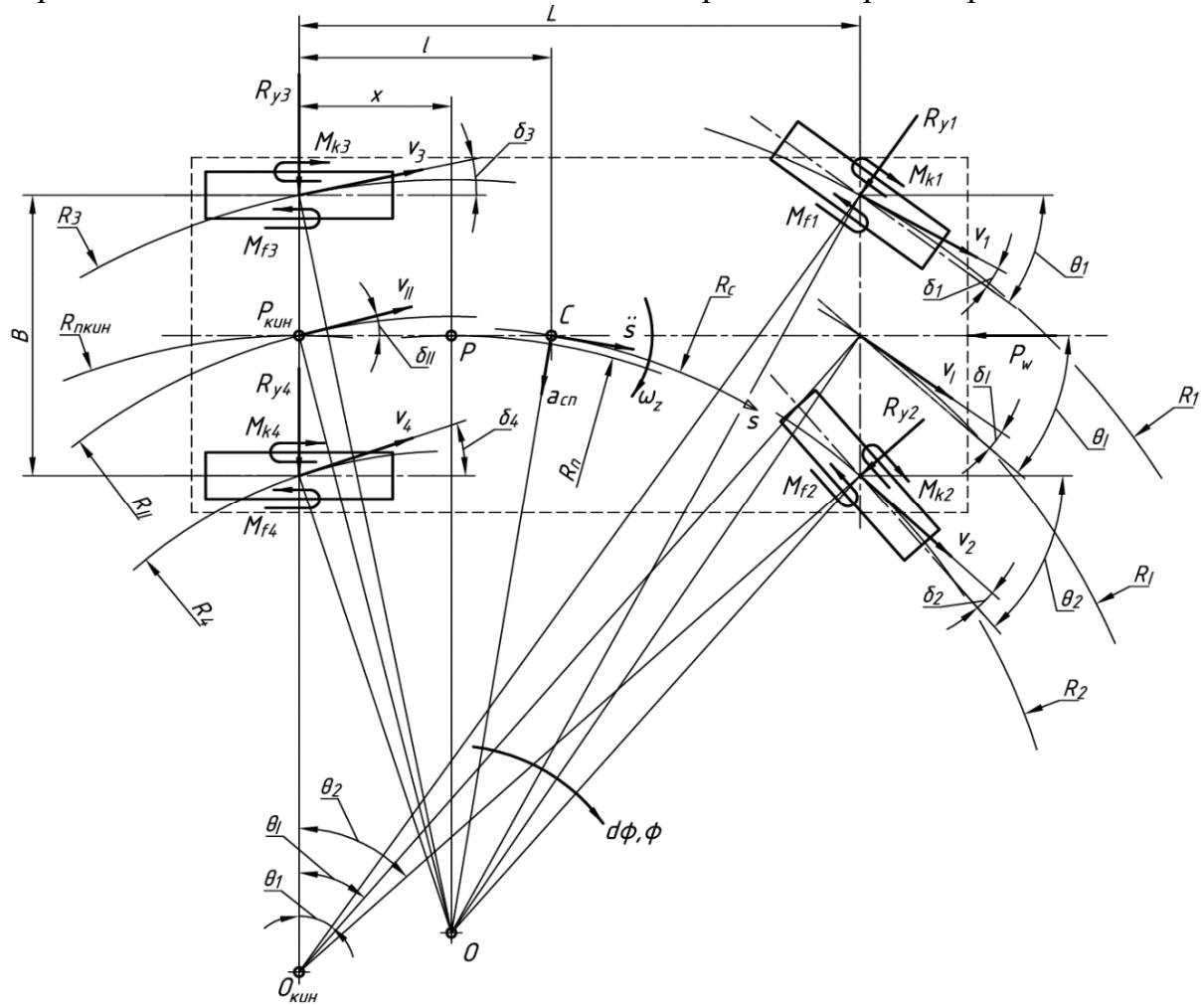


Рис. 2. Расчетная схема движения электробуса

Уравнение динамики электробуса получено в следующем виде:

$$(m\delta_3 + J_z k^2(s))\ddot{s} + J_z \frac{dk(s)}{ds} \dot{s}^2 \cdot k(s) = \\ = \frac{M_T - M_{TM}}{r_{k0}} - mg(f + \alpha) - \frac{m^2 \dot{s}^4 k^2(s)}{K_y} - c_x F_{lob} \rho \frac{\dot{s}^2}{2},$$

где

$$\delta_3 = 1 + \frac{2J_{k_{12}} + 2J_{k_{34}} + u_{trp}^2 J_d}{mr_{k0}^2},$$

где

δ_3 – коэффициент учета вращающихся масс;

m – масса электробуса;

$k(s)$ – кривизна траектории движения центра масс электробуса;

s – координата движения центра масс электробуса, отсчитываемая вдоль траектории движения от неподвижной точки плоскости движения;

$J_{k_{12}}$ – момент инерции колеса передней оси электробуса;

$J_{k_{34}}$ – момент инерции колеса задней оси электробуса;

u_{trp} – передаточное число трансмиссии электробуса;

J_d – момент инерции двигателя электробуса;

J_z – момент инерции корпуса электробуса относительно вертикальной оси, проходящей через его центр масс;

\dot{s} – скорость центра масс электробуса;

\ddot{s} – тангенциальное ускорение центра масс электробуса;

M_T – тяговый/тормозной момент трансмиссии после главной передачи;

$M_{TM} = \sum_{i=1}^4 M_{TM_i}$ – суммарный тормозной момент, развивающийся тормозными механизмами электробуса;

f – приведенный коэффициент сопротивления качению электробуса;

α – угол наклона опорной поверхности;

c_x – коэффициент аэродинамического сопротивления;

F_{lob} – площадь лобовой проекции электробуса;

ρ – плотность воздуха;

K_y – приведенный коэффициент сопротивления боковому уводу электробуса.

Модель плоского движения электробуса разработана на кафедре СМ10 «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Данная модель подробно описана и верифицирована в работах: Горелова В.А. «Прогнозирование характеристик криволинейного движения полноприводного автомобиля с формулой рулевого управления 1-0-3 при различных законах управления колесами задней оси»; Чернышева Н.В. «Комплексная система управления поворотом боевой колесной машины 8х8» и других.

Глава содержит анализ приведенных моделей динамики, а также сравнительные расчеты для характерных режимов движения электробуса, по результатам которых сделан вывод, что при малых центростремительных

ускорениях ($1 \text{ м/с}^2 - 1,5 \text{ м/с}^2$) результаты моделирования отличаются незначительно (до 4,5 %), при этом машинное время, затраченное на моделирование, при использовании модели движения электробуса как твердого тела, приведенного к криволинейной координате, уменьшается почти в 50 раз.

В главе предложена математическая модель системы управления электробуса, связывающая управляющее воздействие с тяговым/тормозным моментом электродвигателя и тормозным моментом, создаваемым рабочей тормозной системой.

$$M_k = M_T - M_{TM} =$$

$$= \begin{cases} \begin{cases} M_{\text{дв}} u_{\text{тр}} \eta_{\text{тр}} (h/h_{\text{дв}}), & \text{если } \frac{v \cdot u_{\text{тр}}}{r_k} < \frac{N_{\text{дв}}}{M_{\text{дв}}} \text{ и } v > 0 \\ \frac{N_{\text{дв}} (h/h_{\text{дв}})}{v/r_k} \eta_{\text{тр}}, & \text{если } \frac{v \cdot u_{\text{тр}}}{r_k} > \frac{N_{\text{дв}}}{M_{\text{дв}}} \text{ и } v < v_{\text{дв}}, \text{ если } 0 < h < h_{\text{дв}} \\ 0, & \text{если } v > v_{\text{дв}} \end{cases} \\ \begin{cases} \frac{M_{\text{пек}} u_{\text{тр}} (h/h_{\text{пек}})}{\eta_{\text{тр}}}, & \text{если } \frac{v \cdot u_{\text{тр}}}{r_k} < \frac{N_{\text{пек}}}{M_{\text{пек}}} \text{ и } v > 0 \\ \frac{N_{\text{пек}} (h/h_{\text{пек}})}{\eta_{\text{тр}} \cdot v/r_k}, & \text{если } \frac{v \cdot u_{\text{тр}}}{r_k} > \frac{N_{\text{пек}}}{M_{\text{пек}}} \text{ и } v < v_{\text{пек}}, \text{ если } -h_{\text{пек}} < h < 0 \\ 0, & \text{если } v > v_{\text{пек}} \end{cases} \\ \begin{cases} -\frac{M_{\text{пек}} u_{\text{тр}}}{\eta_{\text{тр}}} + M_T \left(\frac{h + h_{\text{пек}}}{h_T - h_{\text{пек}}} \right), & \text{если } \frac{v \cdot u_{\text{тр}}}{r_k} < \frac{N_{\text{пек}}}{M_{\text{пек}}} \text{ и } v > 0 \\ -\frac{N_{\text{пек}}}{\eta_{\text{тр}} \cdot v/r_k} + M_T \left(\frac{h + h_{\text{пек}}}{h_T - h_{\text{пек}}} \right), & \text{если } \frac{v \cdot u_{\text{тр}}}{r_k} > \frac{N_{\text{пек}}}{M_{\text{пек}}} \text{ и } v < v_{\text{пек}}, \text{ если } h < -h_{\text{пек}} \\ M_T \left(\frac{h + h_{\text{пек}}}{h_T - h_{\text{пек}}} \right), & \text{если } v > v_{\text{пек}} \end{cases} \end{cases},$$

где

$M_{\text{дв}}$ – максимальный тяговый момент, создаваемый электромашиной в тяговом режиме;

$M_{\text{пек}}$ – максимальный тормозной момент, создаваемый электромашиной в режиме рекуперации энергии;

M_T – максимальный тормозной момент, создаваемый рабочей тормозной системой;

$N_{\text{дв}}$ – максимальная тяговая мощность, развиваемая электромашиной в тяговом режиме;

$N_{\text{пек}}$ – максимальная мощность, развиваемая электромашиной в режиме рекуперации энергии;

$v_{\text{дв}}$ – предельная скорость движения электробуса, до которой может работать электромашин в тяговом режиме;

$v_{\text{рек}}$ – предельная скорость движения электробуса, до которой может работать электромашина в режиме рекуперации энергии;

$h_{\text{дв}}$ – величина управления, при которой электромашина работает в режиме максимальной тяговой мощности;

$h_{\text{рек}}$ – величина управления, при которой электромашина работает в режиме максимальной мощности рекуперации;

$h_{\text{т}}$ – величина управления, при которой электромашина работает в режиме максимальной мощности рекуперации и используется максимальный тормозной момент рабочей тормозной системы;

$\eta_{\text{тр}}$ – КПД трансмиссии.

В третьей главе рассматривается модель преобразования энергии при движении электробуса. Представлена разработка алгоритмов поиска законов энергоэффективного управления с учетом ограничения на время движения, а также ограничений по скорости и ускорению в процессе движения.

При работе алгоритма с ограничением только на время движения проведены варианты расчетов с различным временем прохождения мерного участка с учетом и без учета зависимости КПД электромашины от нагрузки. Результат одного из расчетов с зависимостью КПД от нагрузки представлен на Рис. 3, без учета на Рис. 4 (длина мерного участка 100 м, время прохождения 20 с).

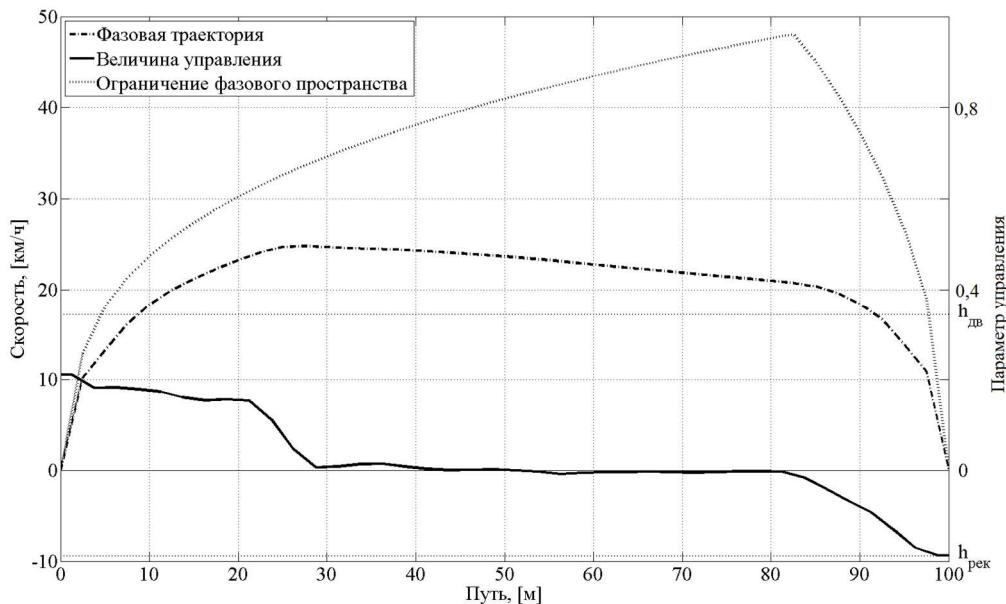


Рис. 3. Энергоэффективный закон движения электробуса с учетом зависимости КПД электромашины от нагрузки, $t=20$ с

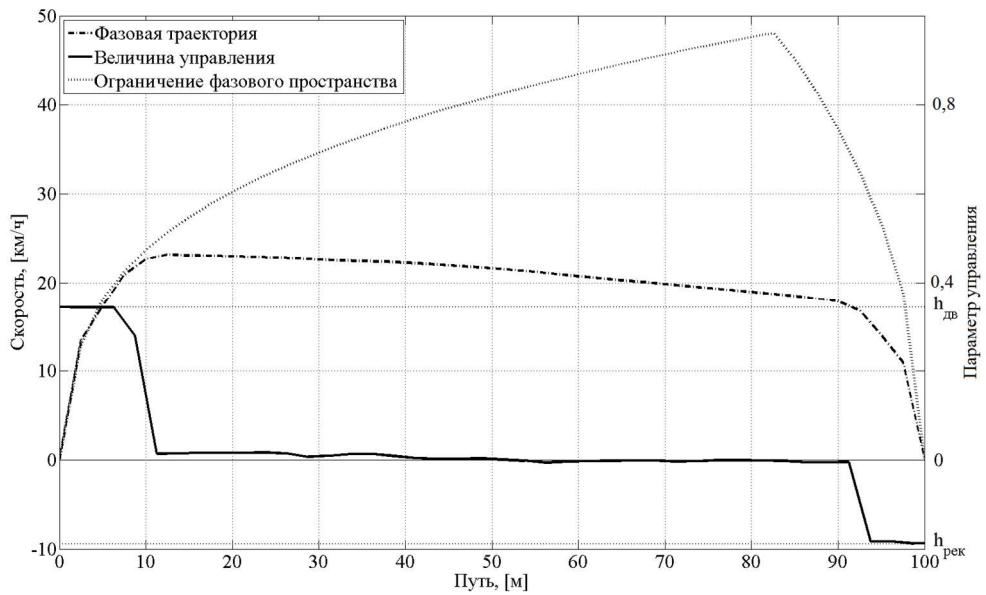


Рис. 4. Энергоэффективный закон движения электробуса без учета зависимости КПД электромашины от нагрузки, $t=20$ с

После анализа полученных результатов сделан вывод, что энергоэффективный закон управления без учета зависимости КПД электромашины от нагрузки дает зависимость с экстремальными режимами управления, то есть такими, при которых параметр управления принимает значения $h_{\text{дв}}$ (движение с максимальным тяговым моментом электромашины), 0 (движение в режиме выбега), $-h_{\text{рек}}$ (замедление с максимальным тормозным моментом рекуперативного тормоза) или $-h_{\text{т}}$ (замедление с максимальным тормозным моментом рекуперативного тормоза и рабочей тормозной системы).

Для сравнения результатов расчета с различным ограничением по времени закон движения с временем прохождения маршрута равным 13 с и учетом зависимости КПД электромашины от нагрузки представлен на Рис. 5.

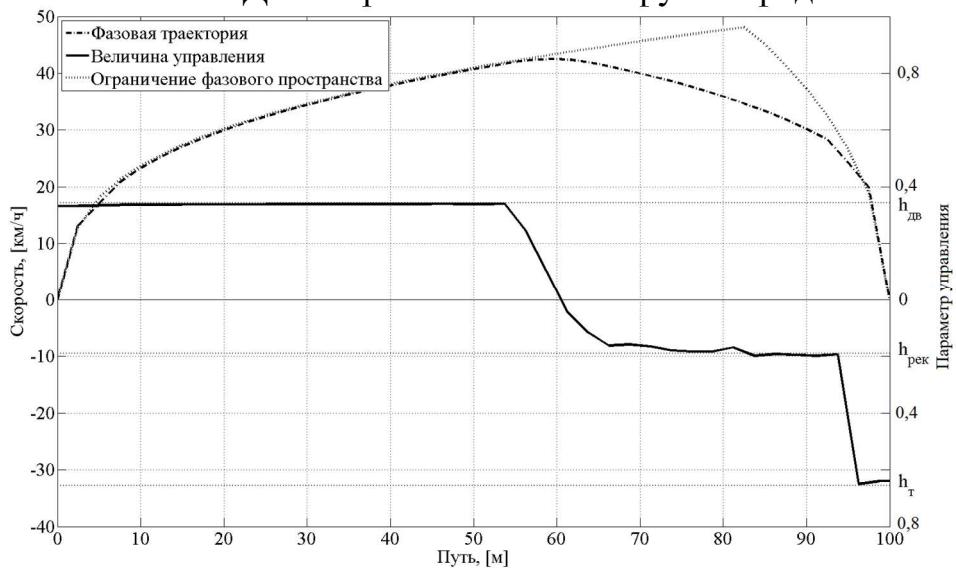


Рис. 5. Энергоэффективный закон движения электробуса с учетом зависимости КПД электромашины от нагрузки, $t=13$ с

Таким образом, можно сделать вывод, что с ростом динамичности невозвратные потери возрастают.

Все дальнейшие расчеты проведены с учетом зависимости КПД электромашины от нагрузки.

В четвертой главе содержится описание объекта исследования – электробуса ЛиАЗ на базе планера 5292.30. Приводится описание тестовых заездов, которые проводились на участке ровной горизонтальной дороги. Сбор и запись параметров движения из CAN-шины осуществлялись посредством PCAN-USB адаптера компании «PEAK system» и программного комплекса MATLAB Simulink в режиме реального времени с частотой дискретизации записи равной 0,01 с. Планирование экспериментов проводилось с использованием методов математической статистики.

В главе приводится методика эксперимента, посвященного определению коэффициента сопротивления качению электробуса, измеренное значение которого составило $f = 0,01219 \pm 0,00185$. Кроме того, была замерена снаряженная масса электробуса $m = 13265$ кг, вычислено расстояние от центра масс электробуса до его задней оси $l = 2100$ мм, а также определена площадь пятна контакта колеса электробуса $F_k = 0,054$ м².

В главе рассмотрен анализ проведенного эксперимента, позволяющего верифицировать математическую модель движения, приведенного к криволинейной координате, и преобразования энергии электробуса. В ходе рассматриваемого эксперимента водитель-испытатель управлял электробусом согласно заранее рассчитанному энергоэффективному закону управления движением на участке длиной 100 м с времени прохождения 20 с. Расчетная величина энергии, затраченной на движение по мерному участку, составила 240 кДж. Результаты замеров приведены на Рис. 6.

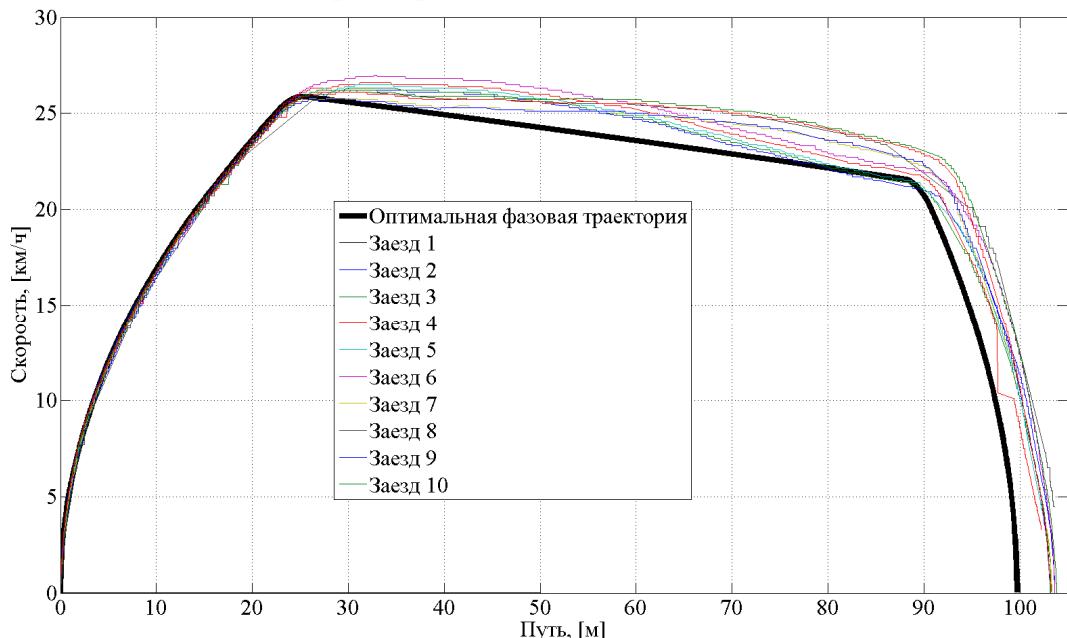


Рис. 6. Результаты заездов по верификации модели движения и преобразования энергии электробуса

Закон движения для этого испытания был рассчитан без учета зависимости КПД электромашины от нагрузки, так как в этом случае он получается экстремальным, что дает возможность воспроизвести его при натурных испытаниях. Для полного соблюдения расчетного закона вдоль маршрута были нанесены метки, указывающие водителю-испытателю, в какой точке пути необходимо изменить режим управления.

После обработки результатов эксперимента было получено, что энергия, затраченная на движение, составила $246,48 \pm 18,57$ кДж. Отклонение расчетной величины затраченной энергии от полученной составило 2,4%.

В главе приводится анализ сравнительных испытаний найденного оптимального закона энергоэффективного управления электробуса с вождением водителя-испытателя. В ходе эксперимента водителю предлагалось преодолеть мерный участок длиной 100 м за 20 с так, чтобы было затрачено минимальное количество энергии на движение. После обработки эксперимента было проведено сравнение расчетной величины энергии, затраченной на движение, с энергией, затраченной при управлении водителем-испытателем. Результаты сравнения представлены на Рис. 7.

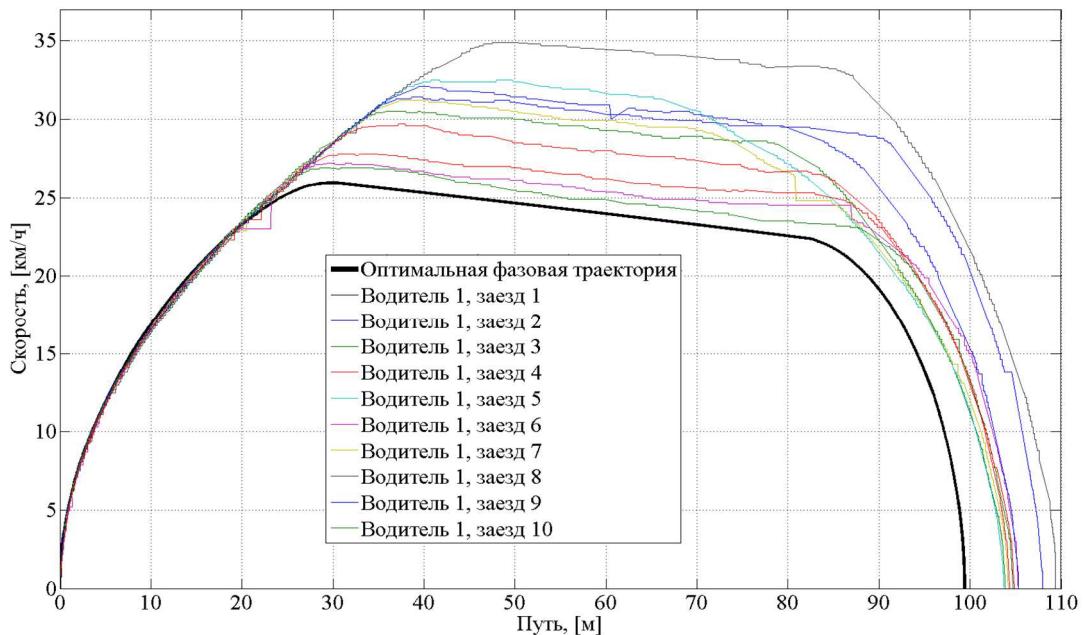


Рис. 7. Результаты заездов водителя-испытателя

Обработка результатов эксперимента показала, что энергия, затраченная водителем-испытателем, составила $296,63 \pm 32,71$ кДж. Таким образом, результаты эксперимента доказали, что стратегия управления, рассчитанная предложенным методом, дает возможность сохранить до 19,7% энергии при движении по мерному участку.

В пятой главе представлена разработка алгоритмов поиска законов энергоэффективного управления на типовых участках маршрута, а также с учетом различных вариантов загруженности электробуса и экстренного вмешательства водителя.

При работе алгоритма было проведено несколько вариантов расчетов с различными типами мерных участков. Результаты одного из расчетов и иллюстрация маршрута приведены на Рис. 8. (длина мерного участка 100 м, время прохождения 25 с).

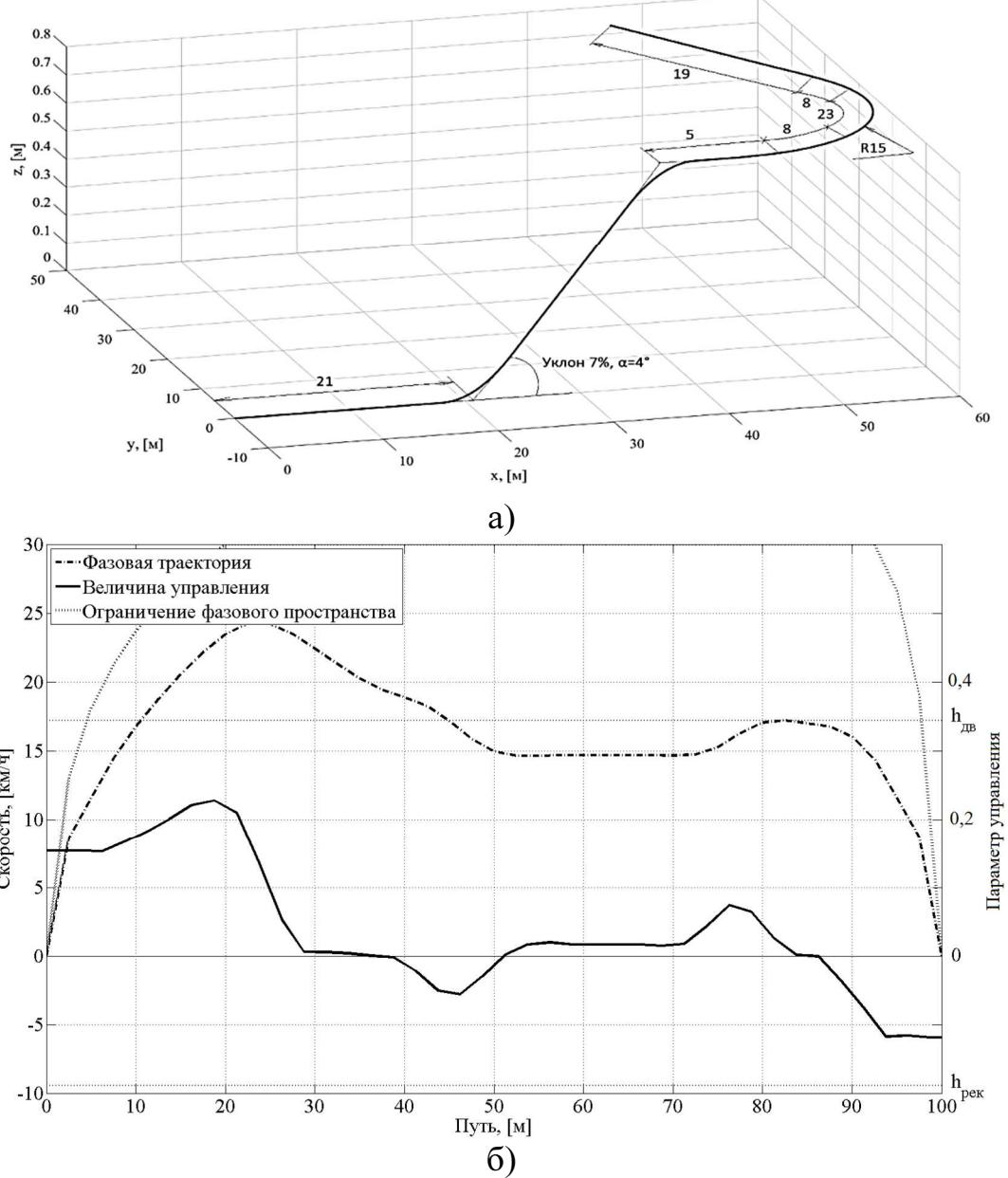


Рис. 8. Энергоэффективный закон движения электробуса на типовом участке маршрута, $t=25$ с: а) – иллюстрация маршрута; б) – результат расчета

Анализ полученного результата доказывает, что оптимальный закон управления даже на простейших маршрутах достаточно сложен, и водитель, выдерживая среднюю скорость движения, не сможет его реализовать практически. В связи с этим необходима система управления скоростью электробуса, реализующая оптимальные законы управления по мере движения по маршруту, водитель же должен лишь определять «желание» двигаться. При

этом среднюю скорость движения на маршруте должен задавать диспетчер, исходя из текущей дорожной ситуации, местоположения и скорости движения электробуса.

Для учета влияния различных вариантов загруженности электробуса было проведено несколько расчетов с различными вариантами масс электробуса при движении по участку маршрута, представленному на Рис. 8 а. Результаты расчета приведены на Рис. 9. (длина мерного участка 100 м, время прохождения 25 с).

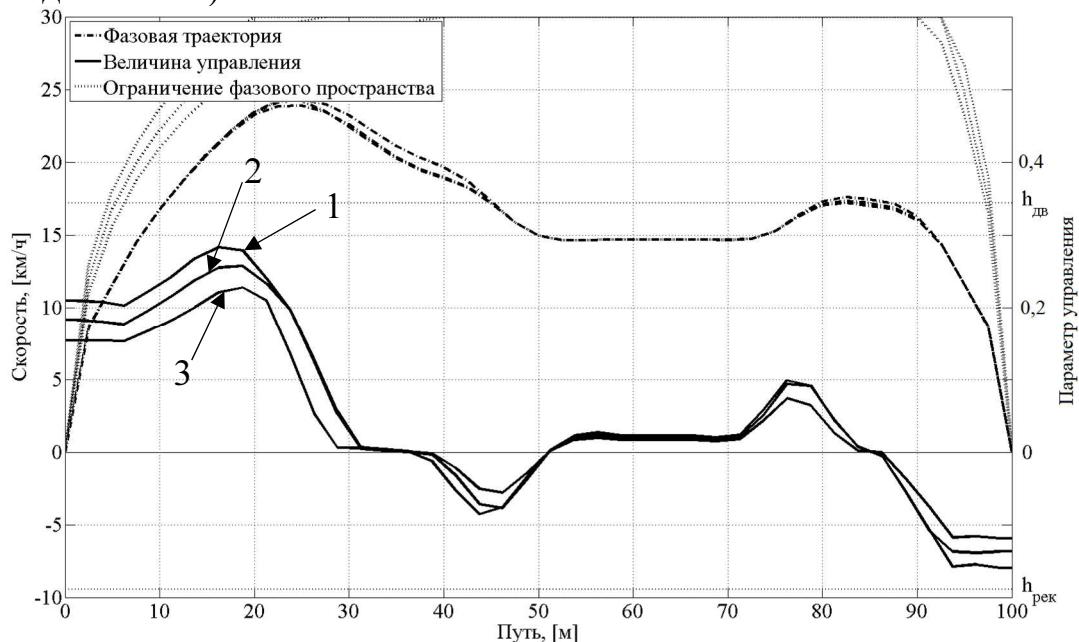


Рис. 9. Энергоэффективный закон движения электробуса для различных вариантов загруженности, $t=25$ с: 1 – 18000 кг, 2 – 15630 кг, 3 – 13265 кг

После анализа полученного результата можно сделать вывод, что с увеличением массы электробуса характер энергоэффективной фазовой траектории не изменяется, изменится лишь управляющее воздействие, требуемое для поддержания расчетного закона движения.

Учет экстренного вмешательства водителя реализован при помощи математической модели плоского движения, дополненной блоком, позволяющим определить ближайшее, рассчитанное заранее, состояние электробуса относительно пройденного им пути и текущей скорости движения. Кроме того, модель плоского движения была дополнена блоком, который относительно найденного состояния электробуса реализует поиск оптимального управления к конечной точке, с использованием заранее рассчитанных значений функции Беллмана. Результаты расчета представлены на Рис. 10. В качестве участка пути и массива рассчитанных значений функции Беллмана были использованы результаты расчета, представленные на Рис. 8.

В данном расчете водитель замедлял электробус с управлением $-0,35h_t$ с 37,5 м по 42,5 м маршрута. При этом время движения электробуса по маршруту увеличилось незначительно и составило 25,7 с. Анализ полученного результата дает возможность сделать вывод, что после экстренного

вмешательства водителя системе управления необходимо ускорить электробус и вернуть на расчетную оптимальную траекторию.

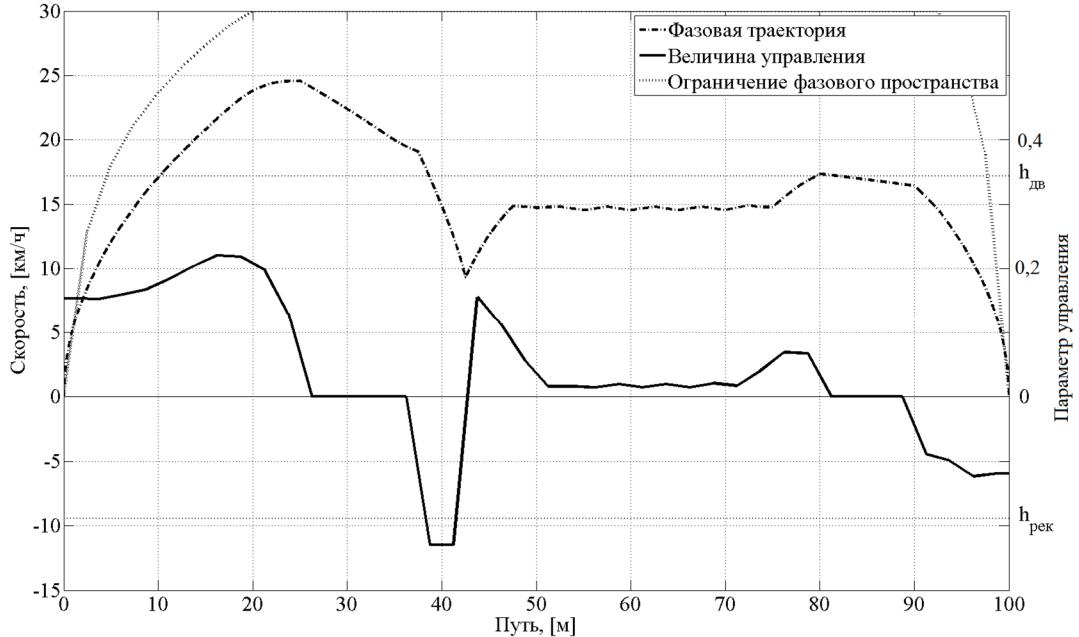


Рис. 10. Энергоэффективный закон движения электробуса с учетом вмешательства водителя

В главе приведена оценка энергоэффективности электробуса в процессе движения по маршруту М2 в г. Москва при использовании оптимального закона управления. Расчетное значение энергии составило 50640 кДж. Величина энергии, полученная при помощи режимометрирования экспериментального образца, составила в среднем 66600 кДж. Таким образом, было получено, что электробус, двигаясь согласно оптимальному закону управления, может сохранить до 23,9 % энергии за один полный цикл маршрута. Иллюстрация полученного закона движения приведена на Рис. 11.

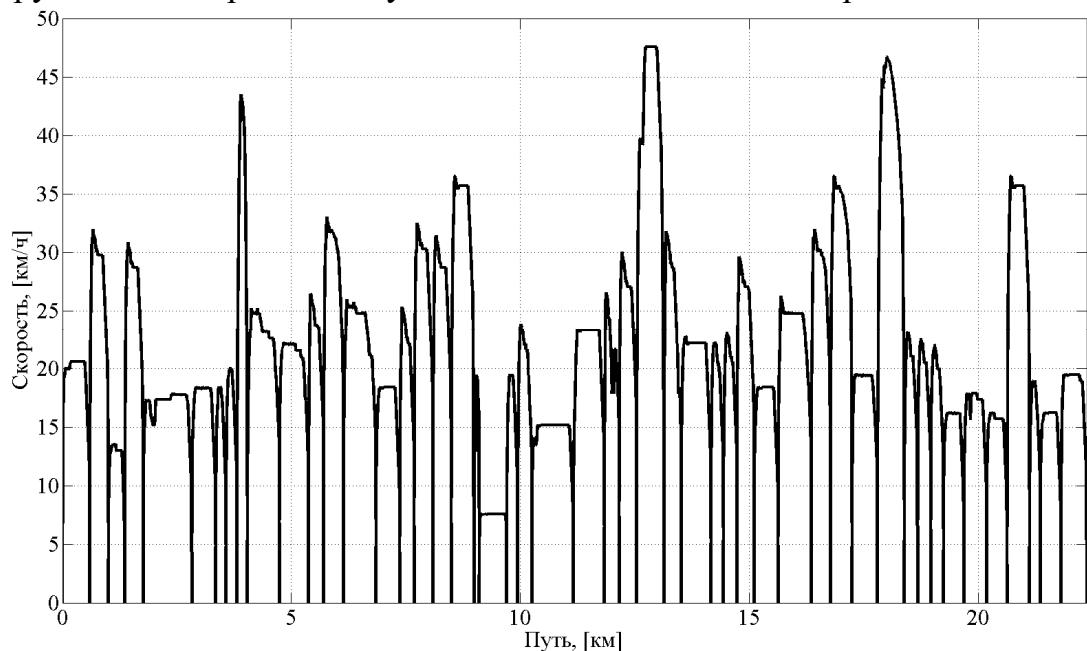


Рис. 11. Энергоэффективный закон движения электробуса на маршруте М2

В главе приведен анализ энергозатрат электробуса при движении в прямом и обратном направлениях по маршруту. По результатам исследования доказано, что при наличии на маршруте уклонов по направлению движения, превышающих 2 %, при расчете энергии, затрачиваемой при движении в прямом и обратном направлениях, их необходимо учитывать (погрешность расчета превысит 6 %).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Метод динамического программирования Беллмана впервые использован для объекта городского автомобильного электротранспорта. Разработан метод определения энергоэффективного закона движения электробуса по маршруту. Результаты проведенных расчетов доказали влияние зависимости КПД электромашины от нагрузки на оптимальную фазовую траекторию. Установлено, что в случае отсутствия зависимости КПД электромашины от нагрузки, энергоэффективный закон управления получается экстремальным (реализуется управление типа «включено» - «выключено»);

2. Разработана новая математическая модель движения электробуса как твердого тела, приведенного к криволинейной координате, с целью учета повышения сопротивления движению в зависимости от кривизны траектории. Результаты сравнения разработанной модели с моделью плоского движения, разработанной и верифицированной на кафедре СМ10 «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана, доказали несущественное отклонение результатов моделирования (не более 4,5 %) при движении с ускорениями, не превышающими $1 \text{ м/с}^2 - 1,5 \text{ м/с}^2$. При этом машинное время, затраченное на моделирование при использовании модели движения электробуса как твердого тела, приведенного к криволинейной координате, снижается почти в 50 раз;

3. Разработана математическая модель связи управляющего воздействия с тяговым/тормозным моментом на ведущем мосту электробуса. Новая модель отличается единым представлением режимов работы электромашины для случая разгона, выбега и торможения электробуса и удобна для применения в методе динамического программирования Беллмана;

4. Проведены экспериментальные исследования, в результате которых была доказана адекватность математической модели движения и преобразования энергии электробуса, приведенного к криволинейной координате, по городскому маршруту (максимальное отклонение расчетной и экспериментальной фазовой траектории не превышает 5 %). Отклонение расчетного значения затраченной энергии от полученного экспериментально не превышает 2,4 %. Проведенные экспериментальные исследования доказали, что разработанный метод дает возможность сохранить до 19,7 % энергии при движении по мерному участку за счет оптимального выбора

моментов переключения режимов движения и обеспечения однозначной повторяемости реализации закона движения в отличие от действий водителя. Таким образом, доказана необходимость разработки системы управления скоростью электробуса, реализующей оптимальные законы управления по мере движения по маршруту;

5. Разработан закон движения электробуса между остановками с учетом особенностей эксплуатации. В результате проведенных расчетов установлено:

- с увеличением динамичности движения электробуса по маршруту возрастают безвозвратные потери в связи с увеличением энергозатрат на преодоление сил инерции и возможным использованием рабочей тормозной системы;
- с увеличением массы электробуса оптимальная фазовая траектория остается неизменна, изменится лишь величина требуемого параметра управления, который система управления должна реализовать для поддержания средней скорости движения;
- даже на простых участках пути закон управления получается достаточно сложным, и водитель, поддерживая требуемую среднюю скорость движения на маршруте, не сможет реализовать его практически самостоятельно;
- при помощи разработанного метода реализована возможность учесть вмешательство водителя и перестроить оптимальную фазовую траекторию в процессе движения, не пересчитывая значения функции Беллмана относительно текущего состояния электробуса;

6. Проведена оценка энергоэффективности электробуса в процессе движения по маршруту М2 в г. Москва при использовании оптимального закона управления. На основе проведенных расчетов доказана возможность сохранить в среднем до 23,9 % энергии за один цикл маршрута. Анализ расчетов доказал необходимость учитывать уклон опорной поверхности по направлению движения при расчете энергии, затраченной на преодоление маршрута в прямом и обратном направлениях, если уклон превышает 2 %, так как погрешность расчета при этом превысит 6%.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Бутарович Д.О., Косицын Б.Б., Котиев Г.О. Метод разработки энергоэффективного закона управления электробусом при движении по городскому маршруту // Труды НАМИ. 2017. № 2 (269). С. 16–27. (1,2 п.л. / 0,5 п.л.)

2. Косицын Б.Б. Экспериментальное исследование энергоэффективного закона управления движением электробуса на городском маршруте // Журнал автомобильных инженеров. 2017. №5. С. 15–23. (1,2 п.л.)