

На правах рукописи



ЧАН СУАН ЧУНГ

**РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИБРИДНЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТРАНСМИССИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА
ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва – 2018

Работа выполнена на кафедре автоматизированного электропривода федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Научный руководитель: **Анучин Алексей Сергеевич**

кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Котиев Георгий Олегович**

доктор технических наук, профессор
кафедры «Многоцелевые гусеничные машины
и мобильные роботы» ФГБОУ ВО
«Московский государственный технический
университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский
университет)»

Гнездов Николай Евгеньевич

кандидат технических наук, доцент кафедры
«Электропривода и автоматизации
промышленных установок» ФГБОУ ВО
«Ивановский государственный энергетический
университет имени В.И. Ленина»

Ведущая организация:

ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский университет «Московский
институт электронной техники»

Защита диссертации состоится «27» декабря 2018 года в 16 час. 00 мин. в аудитории М-606 на заседании диссертационного совета МЭИ.002 при ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 13.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, Ученый Совет ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» и на сайте www.mpei.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 20__ года.

Ученый секретарь

диссертационного совета МЭИ.002

кандидат технических наук, доцент



Цырук С.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Сегодня много внимания уделяется гибридным электрическим и полностью электрическим автономным транспортным средствам, таким как автомобили, микроавтобусы и полноразмерные автобусы. В мире они уже активно присутствуют на рынке, и их доля увеличивается из года в год. В России уже появились импортируемые электромобили BMW i3, Tesla Model S и др., и разрабатываются свои собственные решения, такие как Волгабус, Матрёшка, EL Lada и ряд других. При этом наблюдается унификация структуры и постепенный переход от параллельных гибридов к полностью электрическим трансмиссиям, которые при необходимости могут быть модернизированы в последовательные гибридные трансмиссии (BMW i3 с модулем расширения дальности Range EXtender).

Следует отметить, что пока инфраструктура городов с точки зрения мощностей электрических сетей не готова к повсеместному переходу на полностью электрические машины, и гибридные трансмиссии становятся компромиссным решением, где первичным источником энергии является двигатель внутреннего сгорания (ДВС), но которые также могут быть заряжены от сети. Работа ДВС в оптимальном по КПД режиме, позволяет существенно сократить расход топлива, как и выбросы продуктов сгорания в атмосферу.

Вместе с тем, в настоящее время в мировой литературе очень ограничено представлены вопросы оптимизации параметров гибридных и полностью электрических трансмиссий. Мощности тяговых электроприводов или ёмкости накопителей энергии определяются скорее маркетинговыми соображениями. Принято сравнивать мощность ДВС обычной машины с мощностью тягового электродвигателя, хотя эти величины совершенно не соотносятся друг с другом. Так, электродвигатель обеспечивает разгон без перерывов на переключение передач, но, как правило, имеет несколько меньшие значения пускового момента, чем у классического автомобиля на первой передаче. Кроме того, сертификация трансмиссий проводится по стандартным циклам движения, например, NEDC (новый Европейский цикл движения), который часто критикуется за свой искусственный вид.

Данная диссертация направлена на решение вопроса оптимизации параметров электрооборудования гибридных электрических трансмиссий при сохранении цикла движения, полученного на традиционном транспортном средстве (ТС), чтобы сохранить привычную для водителя динамику движения и

оценить расход топлива для различных конфигураций тягового электропривода и накопителей энергии. В работе решаются задачи определения циклов движения для традиционного находящегося в эксплуатации ТС, обработки их траекторий и получения задающих воздействий для математической модели ТС, разработка модели для проведения оптимизации состава электрооборудования и проверка модели с различными конфигурациями гибридной электрической трансмиссии. Работа отвечает федеральному закону РФ от 23.11.2009 № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности...», в свете требований государственной программы «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года», согласно которой поставлена задача увеличения доли продаж легковых автомобилей с гибридными двигателями до 4,6% к 2020 г.

Степень разработанности темы исследования

Среди отечественных организаций большая работа по исследованию режимов работы гибридных транспортных средств была проделана в ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана (НИУ)», «НАМИ». Большой вклад в развитие технологии проектирования гибридных трансмиссий внесли А.М. Русаков, В.Н. Остриров, В.Ф. Козаченко, С.А. Пахомин, А.Б. Виноградов, М.М. Лашкевич, Д.И. Алямкин и др., однако разработанные в настоящий момент решения не являются в полной мере коммерческими продуктами и занимают нишу специальной техники, поэтому настоящая оптимизация данных решений по топливной экономичности не проводилась в угоду выполнения иных требований технических заданий. Это обстоятельство позволяет сформулировать цель диссертационной работы.

Цель диссертационной работы — развитие методов оптимизации гибридных электрических трансмиссий за счет обоснованного выбора оборудования в соответствии с реальной траекторией движения транспортного средства.

Для достижения указанной цели в диссертационной работе были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Определение требований к представлению данных о траектории движения транспортного средства в качестве задающих воздействий его модели для проведения оптимизации состава электрооборудования трансмиссии.
2. Разработка методов обработки и анализа данных глобальных навигационных систем при движении транспортного средства по

маршруту с коррекцией информации с помощью акселерометра и гироскопа для определения нормального и тангенциального ускорения и уклона дороги на всём протяжении маршрута, необходимых для обоснования мощности и энергетических режимов работы электрооборудования ТС.

3. Разработка математической модели транспортного средства с комплектом тягового электрооборудования для изучения вопросов управления энергетическим балансом и определения удельного расхода топлива и/или электроэнергии при перемещении по реальной траектории.
4. Проведение на разработанной модели гибридного электрического транспортного средства исследований, подтверждающих возможность снижения энергетических затрат для заданной траектории движения за счет рационального выбора параметров электрооборудования.

Методология и методы исследования

Для решения поставленных в работе задач использовались: теоретические основы электротехники, теория электропривода, численные методы для моделирования динамических процессов. Задачи по экспериментальному определению траекторий решались путем разработки программного обеспечения для мобильных устройств, имеющих в своем составе приемники глобальных навигационных систем, акселерометры и гироскопы.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов подтверждены результатами экспериментальных исследований на физических объектах, применением широко апробированных программных пакетов и использованием наиболее проверенных для решаемых задач математических моделей, а также сопоставлением результатов моделирования и экспериментальных исследований.

Научная новизна заключается в следующем:

Показано, что для моделирования энергетических процессов при движении транспортных средств необходимо представление траектории движения в виде нормального и тангенциального ускорения, а также угла наклона дороги в функции времени.

Разработаны математические методы анализа данных глобальных навигационных систем с учетом погрешности позиционирования и дискретности по времени, позволяющие определять координаты, скорость и ускорения транспортного средства.

Разработаны методы коррекции показаний глобальных навигационных систем с помощью акселерометра и гироскопа, позволяющие корректировать данные траектории в промежутках между измерениями глобальных навигационных систем.

Разработана математическая модель механической и электрических подсистем гибридного электрического транспортного средства для анализа расхода энергозатрат при движении по заданной траектории.

Практическая значимость

Разработан программно-аппаратный комплекс для определения траекторий движения реальных транспортных средств с последующей конвертацией данных по положению и показаний акселерометра в нормальное и тангенциальное ускорение и угол наклона дороги.

Математическая модель применена для анализа эффективности работы гибридной электрической трансмиссии в составе транспортного средства и определения топливной экономичности при различных конфигурациях оборудования трансмиссии.

Апробация работы. Основные результаты работы обсуждались на заседаниях кафедры автоматизированного электропривода НИУ «МЭИ», докладывались на 58-ой Международной научной конференции по энергетике и электротехнике в Рижском техническом университете (RTUCON2017) и на международном семинаре по электроприводу (IWED2018).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 3 печатных работы, в том числе 3 — в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (или приравненных им), 2 — в изданиях, включенных в базу Scopus.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, включающего 57 наименований. Содержание работы изложено на 137 страницах, включая 10 таблиц и 82 иллюстраций, 12 листингов разработанного программного обеспечения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель работы и задачи исследования.

В первой главе представлен обзор существующих схем гибридных трансмиссий, определены подходы к оптимизации состава

электрооборудования и сформулированы требования к модели транспортного средства для решения задач оптимизации.

В качестве базовой исследуемой схемы выбрана гибридная трансмиссия последовательного типа, так как анализ рынка показывает, что данная схема является технологически совместимой с полностью электрическими трансмиссиями электромобилей. Так, автомобиль BMW i3 выпускается в двух версиях, как чисто электрическая машина, и как гибрид с силовой установкой 20 кВт, обеспечивающей неограниченный пробег. Последовательная трансмиссия имеет ДВС, являющийся необратимым источником механической энергии, генератор, который преобразует механическую энергию в электрическую и тяговые электропривод(ы) с силовыми преобразователями различных конфигураций в зависимости от типа электродвигателя и генератора. Трансмиссия как правило содержит также промежуточный накопитель энергии, которым может быть аккумулятор, супер-конденсатор или маховиковый накопитель. Последние два обязательно подключаются к общему звену постоянного тока через силовые полупроводниковые преобразователи. Пример структуры последовательного гибридного транспортного средства (ТС) представлен на рис. 1.

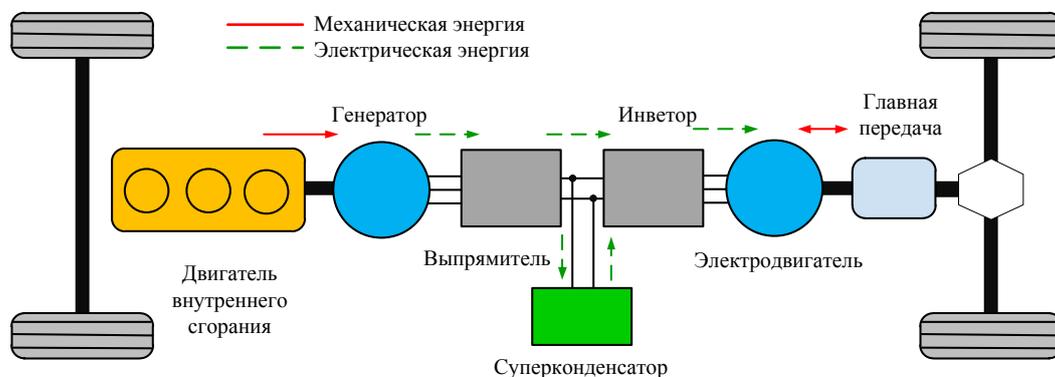


Рис. 1. Структура последовательного электрического гибридного ТС

Если в обычном ТС в любой момент времени ДВС обеспечивает требуемую мощность на колёсах машины при разных скоростях вращения в зависимости от состояния коробки передач, то в последовательной гибридной трансмиссии за счет применения промежуточного накопителя энергии он может работать в оптимальном режиме независимо от тяги на колёсах. Наличие промежуточного накопителя также позволяет использовать повторно энергию торможения ТС. Даже в отсутствии накопителя режим работы ДВС становится более эффективным, так как для каждой конкретной требуемой мощности на колесах скорость работы ДВС можно выбрать оптимальным образом.

Вместе с тем, добиться высокой топливной экономичности гибридного ТС можно только путем оптимизации структуры его трансмиссии путем оптимального выбора параметров компонент в зависимости от реальных условий эксплуатации. Так, можно изменять ёмкость аккумуляторной батареи. При её увеличении начнет расти дальность хода, но увеличится масса ТС, что потребует усиления подвески и кузова, установки более мощных тяговых приводов. В конечном счете, дальнейшее увеличение аккумулятора станет невыгодным и будет приводить только к снижению дальности хода. Установка очень маленького аккумулятора опасна тем, что он будет работать по слишком короткому циклу между зарядом и разрядом с относительно высокими токами, что приведет к быстрому снижению срока службы и эффективности использования.

Альтернативой аккумуляторам может быть супер-конденсатор. Он обладает меньшей удельной емкостью, однако может принимать и отдавать мощность очень быстро и выдерживает большое число циклов. Такое решение может быть эффективно для городских автобусов с частыми режимами разгона и торможения.

Для сертификации ТС в мире используют типовые циклы движения типа Нового европейского цикла движения (NEDC), которые критикуются за их нереалистичность. Поэтому автор предлагает решить вопрос выбора параметров гибридной электрической трансмиссии таким образом, чтобы с переходом на гибридное ТС пользователь не почувствовал снижения динамических показателей. Этого можно добиться путем оптимизации гибридной электротрансмиссии в соответствии с реальными циклами перемещения.

На движущееся ТС действуют следующие силы (см. рис. 2):

- сила сопротивления воздушному потоку F_A (air drag);
- сила трения качения колес F_R (rolling drag);
- проекция силы тяжести на продольную ось транспортного средства F_G (grade);
- сила тяги F_T (traction force).

Если сумма этих сил равна нулю, то ТС движется равномерно. Если сумма сил отличается от нуля, то ТС замедляется или ускоряется. При этом для определения силы тяги в любой точке траектории движения необходимо знать:

- нормальное ускорение a_N (определяет радиус поворота и влияет на силу трения качения);

- тангенциальное ускорение a_T ;
- уклон дороги α .

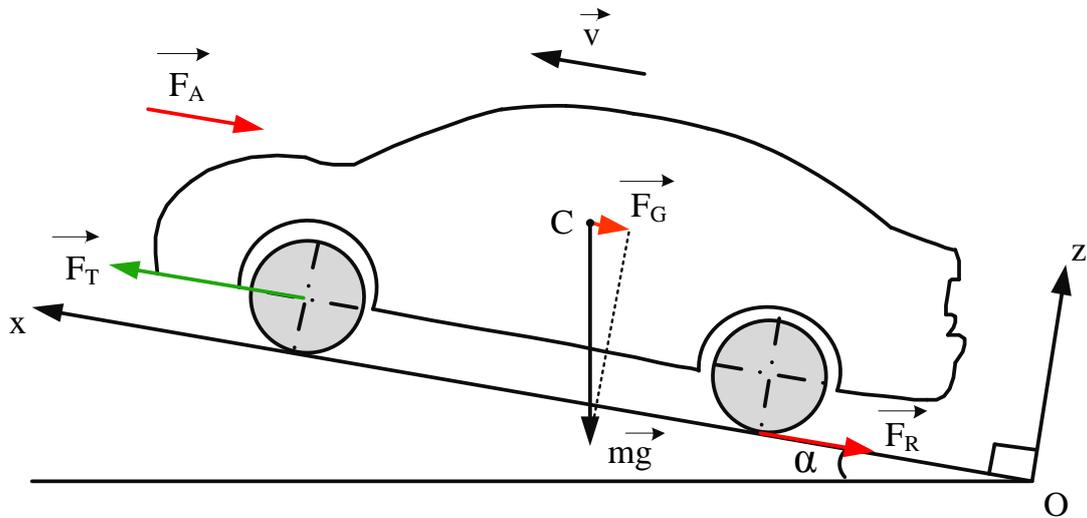


Рис. 2. Внешние воздействия на ТС

Таким образом, определены требования к представлению траектории реального ТС через два ускорения и угол уклона дороги.

Во второй главе представлены основные сведения о глобальных навигационных системах, разработана программа для записи траектории перемещения ТС и рассмотрены методы обработки данных, преобразующие последовательные точки траектории движения в ускорения и угол уклона дороги.

За последнее десятилетие технологии глобальных навигационных систем стали использоваться повсеместно. В настоящее время существует две полнофункциональные системы — это GPS (США) и ГЛОНАСС (Россия). Принцип работы систем схож. Спутники передают сигналы, точно синхронизированные по атомным часам. Приемники по задержке распространения нескольких принимаемых сигналов разных спутников вычисляют дальность до каждого из спутников, а затем пересчитывают эти расстояния в географические координаты.

Основные погрешности определения положения связаны с влиянием ионосферы, преломления в облаках, отражение от зданий и деревьев. В реальных условиях погрешность определения положения составляет от 0,5 метров (в идеальных условиях) до 20 метров (в плохую погоду в городской застройке). Следует отметить, что определение высоты производится со значительно меньшей точностью, поэтому на практике необходимо корректировать измерение высоты с помощью картографических сервисов.

Был проанализирован большой набор программного обеспечения для записи траекторий перемещения, однако среди бесплатных приложений подходящего не оказалось. Поэтому автором была написана программа для мобильного телефона под ОС Android, которая ведет запись текущих координат и времени с максимально возможной частотой в файл на SD-карту памяти.

Для дальнейшего анализа географические координаты следует преобразовать в плоские. Согласно ГОСТР 51794-2001 плоские прямоугольные координаты определяемой точки в проекции Гаусса-Крюгера обладают погрешностью не более 0,001 м и вычисляются по формулам:

$$x = 6367558,4968B - \sin 2B(16002,89 + 66,9607 \sin^2 B + 0,3515 \sin^4 B - l^2(1594561,25 + 5336,535 \sin^2 B + 26,790 \sin^4 B + 0,149 \sin^6 B + l^2(672483,4 - 811219,9 \sin^2 B + 5420 \sin^4 B - 10,6 \sin^6 B + l^2(278194 - 830174 \sin^2 B + 572434 \sin^4 B - 16010 \sin^6 B + l^2(109500 + 574700 \sin^2 B + 863700 \sin^4 B - 398600 \sin^6 B)))))); \quad (1)$$

$$y = (5 + 10n)10^5 + l \cos B(6378245 + 21346,1415 \sin^2 B + 107,1590 \sin^4 B + 0,5977 \sin^6 B + l^2(1070204,16 - 2136826,66 \sin^2 B + 17,98 \sin^4 B - 11,99 \sin^6 B + l^2(270806 - 1523417 \sin^2 B + 1327645 \sin^4 B - 21701 \sin^6 B + l^2(79690 - 866190 \sin^2 B + 1730360 \sin^4 B - 945460 \sin^6 B))))), \quad (2)$$

где x, y — абсцисса и ордината, м; B — геодезические широты, рад; l — минимальное расстояние между определяемой точкой и осевым меридианом зоны, измеряемое в радианах и вычисляется по формуле:

$$l = \{L - [3 + 6(n - 1)]\} / 57,2957; \quad (3)$$

L — геодезическая долгота определяемой точки, рад; n — номер шестиградусной зоны, вычисляемый по формуле:

$$n = E[(6 + L) / 6], \quad (4)$$

$E[...]$ - целая часть выражения, заключенного в квадратные скобки.

Получаемые с навигационного приемника данные обновляются приблизительно один раз в секунду. Для вычисления ускорений требуется применить специальные фильтры, так как обычная сплайн интерполяция во время остановок приводит к неверным результатам из-за шума приемника.

Первым делом был реализован фильтр, обеспечивающий удаление шума приемника в процессе остановки. Для этого анализируется расстояние между

двумя последовательными точками. Если оно меньше 4-х метров, то считается, что ТС неподвижно и запись в файл производится предыдущей координатой. При отклонении более чем на 4 метра записывается каждая точка.

Принимается, что ТС движется из одной точки в другую с постоянным ускорением, так как информация о поведении транспорта между точками отсутствует. Сами опорные точки не являются точным местоположением ТС, так как содержат некоторую ошибку, возникающую из-за погрешностей навигационной системы. По этой причине нет необходимости точно отслеживать эти точки. Траектория ТС описывается следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \begin{cases} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} &= \int \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} dt; \\ \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} &= \int \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} dt, \end{cases} \right\} \quad (5)$$

где a_x , a_y и a_z — ускорения в каждом направлении; v_x , v_y и v_z — скорости и x , y и z — координаты ТС.

Для любого набора координат во времени ускорение, требуемое, чтобы пройти через следующую опорную точку, можно вычислить с помощью:

$$\begin{bmatrix} a_x[n] \\ a_y[n] \\ a_z[n] \end{bmatrix} = f \frac{2}{(t[n+1]-t[n])^2} \cdot \left(\begin{bmatrix} x[n+1] \\ y[n+1] \\ z[n+1] \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x[n] \\ y[n] \\ z[n] \end{bmatrix} - (t[n+1]-t[n]) \cdot \begin{bmatrix} v_x[n] \\ v_y[n] \\ v_z[n] \end{bmatrix} \right), \quad (6)$$

где $a_i[n]$ — ускорение ТС при движении от точки n к $n+1$; $v_i[n]$ — начальная скорость в точке n в начале движения между точками n и $n+1$; $t[n]$ — время в точки n ; и f — коэффициент аппроксимации, который может варьироваться от 0 до 1.

Коэффициент аппроксимации определяет, насколько точно новая траектория, оцененная по (5), придерживается опорных точек. Если коэффициент равен 1, то траектория пройдет строго через опорные точки. Если он меньше 1, то траектория будет лежать вблизи опорных точек. Пример траекторий для четырех опорных точек и разных коэффициентов аппроксимации показан на рис. 3.

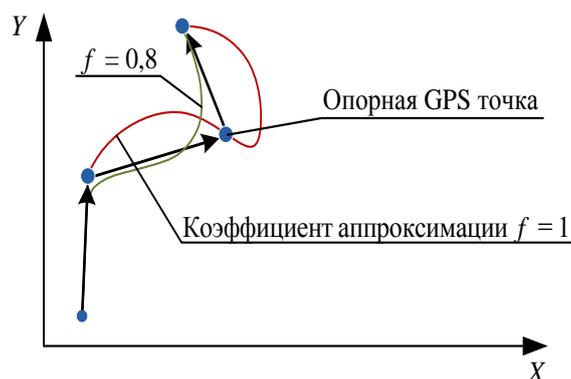


Рис. 3. Траектории для различных коэффициентов аппроксимации

Эксперимент проводился на легковом автомобиле. Координата ТС по оси X во времени для участка GPS-трека и его интерполяция с различными коэффициентами аппроксимации показаны на рис. 4. Траектория с единичным коэффициентом содержит колебания. Например, когда ТС замедляется и останавливается, его ускорение изменяется на отрицательное значение, а затем возвращается к нулю. При значении 0,6 траектория достаточно гладкая, но трек расходится с опорными точками на несколько метров, что больше, чем ошибка приемника глобальной навигационной системы. Наилучший результат получен с коэффициентом аппроксимации равным 0,8, поскольку в траектории отсутствуют колебания. Когда автомобиль останавливается, и данные GPS остаются неизменными, модель так же останавливается с ошибкой не более 2 метров от измерения глобальной навигационной системой. Маршрут движения, траектория по навигационной системе и её аппроксимация представлены на рис. 5.

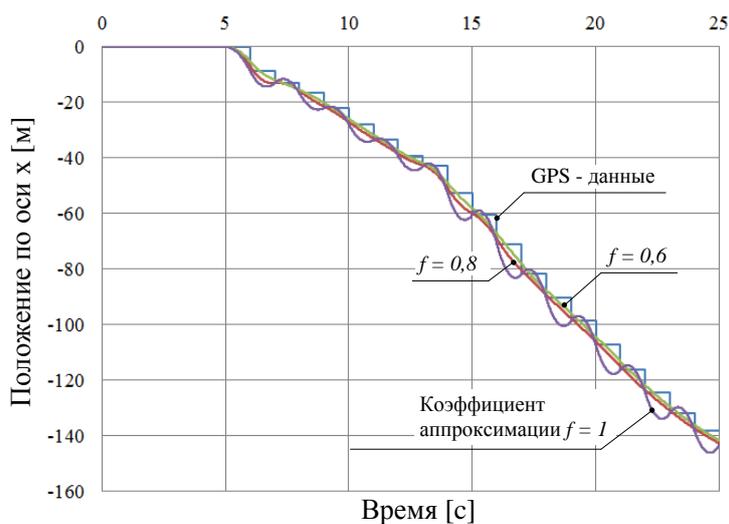


Рис. 4. Аппроксимация GPS-трека

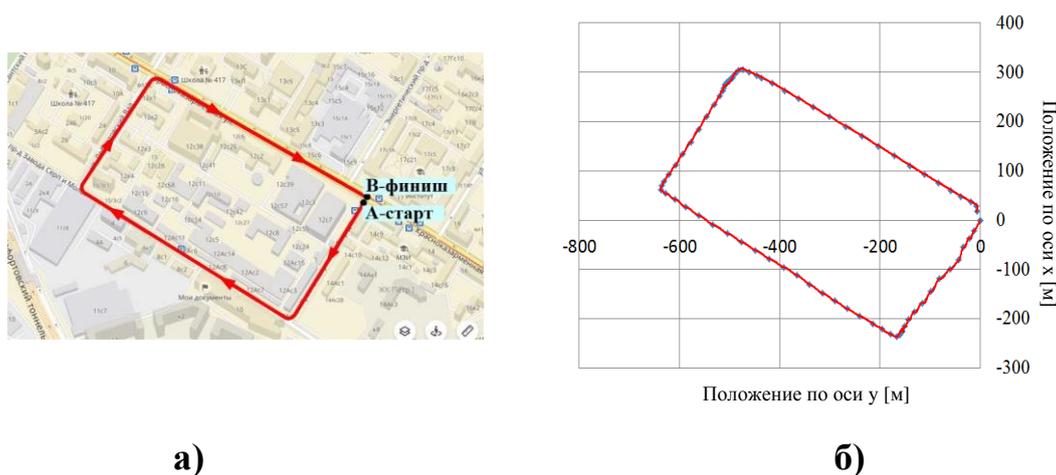


Рис. 5. Маршрут перемещения ТС (а); измеренные опорные точки и интерполированная траектория движения ТС (б)

В третьей главе рассмотрен вопрос уточнения траектории движения ТС за счет показаний специальной микросхемы со встроенными акселерометром, гироскопом и магнитометром.

Приемники глобальных навигационных систем выдают данные измерения каждую секунду. В промежутках между измерениями данные об ускорении ТС отсутствуют, поэтому для уточнения траектории в промежуточных точках была применена специальная микросхема, содержащая в себе акселерометр, гироскоп и магнетометр. Такая микросхема может быть использована как самостоятельная измерительная система для определения положения и траектории движения ТС, но, как и любое открытое интегрирование, данный способ неизбежно будет накапливать ошибку, поэтому показания данной микросхемы можно использовать только совместно с данными глобальных навигационных систем.

Микросхема MPU-9250 — многокристальный (многочиповый) модуль, состоящий из двух кристаллов, объединённых в один пакет QFN. В одном корпусе находится трёхосевой акселерометр и трёхосевой гироскоп. В другом размещён трёхосевой магнитометр AK8963. Для минимизации систематических погрешностей применен фильтр Маджвика. С его помощью получается траектория, аналогичная траектории от глобальной навигационной системы. Для получения скорректированной траектории применяется выражение:

$$\begin{bmatrix} a_{xKop} [k + 1] \\ a_{yKop} [k + 1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{xAcc} [k + 1] + K_{Kop} [x_{GPS} [k + 1] - x_{Kop} [k]] \\ a_{yAcc} [k + 1] + K_{Kop} [y_{GPS} [k + 1] - y_{Kop} [k]] \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где $a_{x_{Kop}}[k+1]$, $a_{y_{Kop}}[k+1]$ — ускорения скорректированной траектории в момент времени $(k+1)$; $a_{x_{Акс}}[k+1]$, $a_{y_{Акс}}[k+1]$ — ускорения траектории акселерометра в момент времени $(k+1)$; K_{Kop} — коэффициент коррекции; $x_{Kop}[k]$, $y_{Kop}[k]$ — координаты скорректированной траектории в момент времени k . Результирующие траектории до и после коррекции представлены на рис. 6.

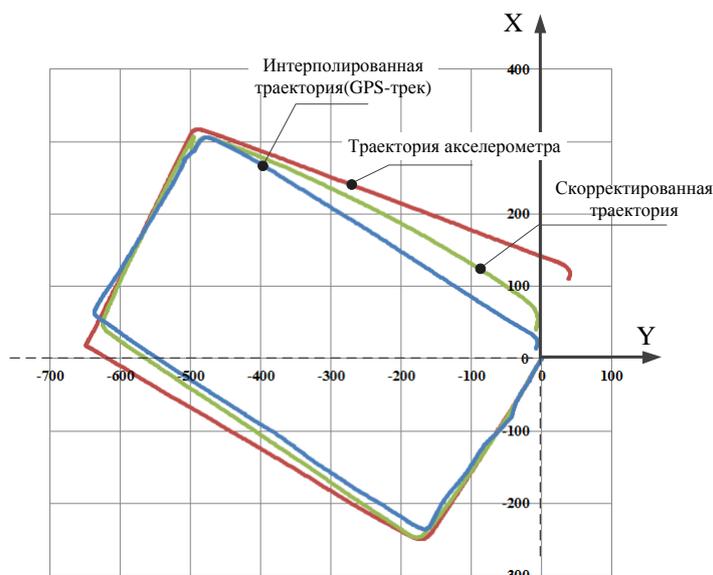


Рис. 6. Исходные и скорректированная траектория

Для расчета нормального и тангенциального ускорений необходимо вычислить направление движения:

$$\begin{bmatrix} v \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{v_{x_{Kop}}^2 + v_{y_{Kop}}^2} \\ \text{atan 2}(v_{y_{Kop}}, v_{x_{Kop}}) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где v — абсолютное значение скорости и θ — угол вектора скорости.

Тангенциальное и нормальное ускорение можно определить путем координатного преобразования, которое поворачивает ускорения в ортогональной неподвижной системе координат на угол вектора скорости транспортного средства:

$$\begin{bmatrix} a_{T_{Kop}} \\ a_{N_{Kop}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{y_{Kop}} \cos \theta + a_{x_{Kop}} \sin \theta \\ -a_{y_{Kop}} \sin \theta + a_{x_{Kop}} \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (9)$$

На рис. 7 показаны графики тангенциального ускорения и абсолютного значения скорости в зависимости от времени для траектории рис. 6.

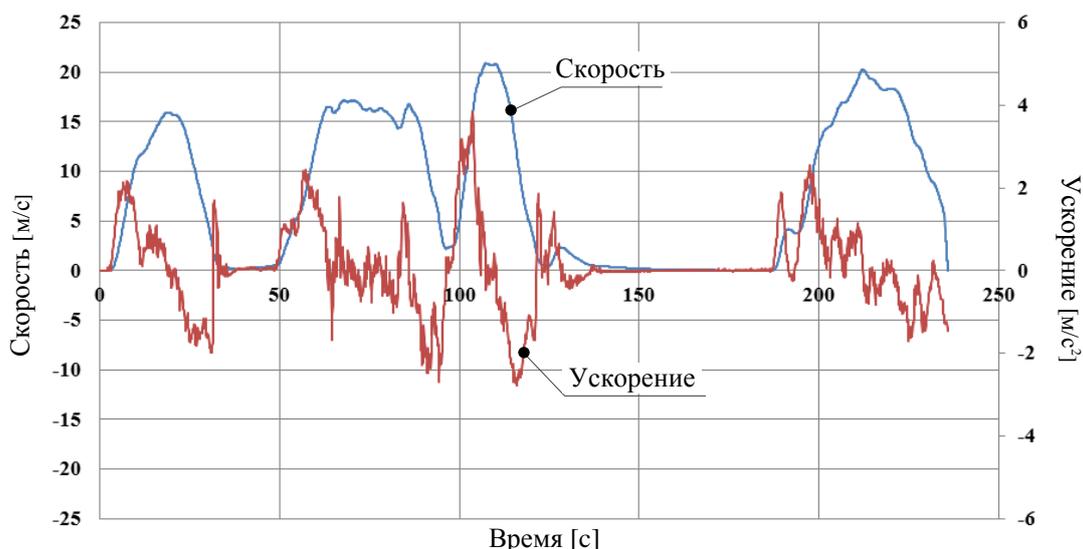


Рис. 7. Значения скорости и тангенциального ускорения

В четвертой главе рассмотрена механическая модель ТС и получены графики силы и мощности тяги для исследуемой траектории движения.

В соответствии с механической моделью ТС, представленной на рис. 2, сила тяги ТС определяется как:

$$F_T = mg \sin \alpha + F_R + F_A + m \frac{a_T}{\cos \alpha}, \quad (10)$$

где m — масса ТС, g — ускорение свободного падения. Приведены формулы для расчета или приближенной оценки всех сил.

Подставив в (10) тангенциальное ускорение и угол уклона дороги для траектории рис. 7 можно получить силу тяги, требуемую для перемещения ТС в соответствии с данной траекторией. Путем перемножения силы тяги на скорость движения вычисляется мощность тяги. Результирующие графики представлены на рис. 8.

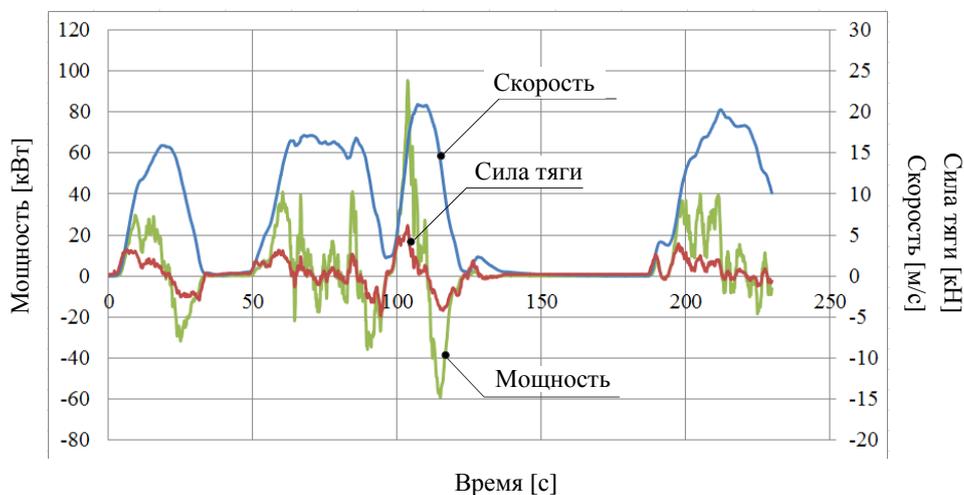


Рис. 8. График скорости, силы тяги и мощности на исследуемой траектории ТС

В пятой главе представлена структура гибридной электрической трансмиссии и разработана математическая модель для исследования режимов работы трансмиссии для заданной траектории движения. Проведены модельные эксперименты для двух конфигураций трансмиссий с супер-конденсаторным накопителем энергии и без.

Функциональная схема модели электротрансмиссии представлена на рис. 9. Она состоит из нескольких основных узлов. Первый блок (Б1), принимает на вход траекторию движения, представленный в виде ускорения и угла наклона дороги во времени. Данная информация используется, чтобы вычислить текущую скорость движения ТС и требуемую силу тяги для тягового электропривода. Скорость поступает на вход блока (Б2) для проверки тягового электропривода. По этой скорости определяется максимальное тяговое усилие в соответствии с функциональной зависимостью, определяющей предельную механическую характеристику. Если максимальное тяговое усилие, которое может создать электропривод, меньше, чем необходимое для движения по траектории, то моделирование прекращается, так как оказывается невозможным отработать заданную траекторию движения.

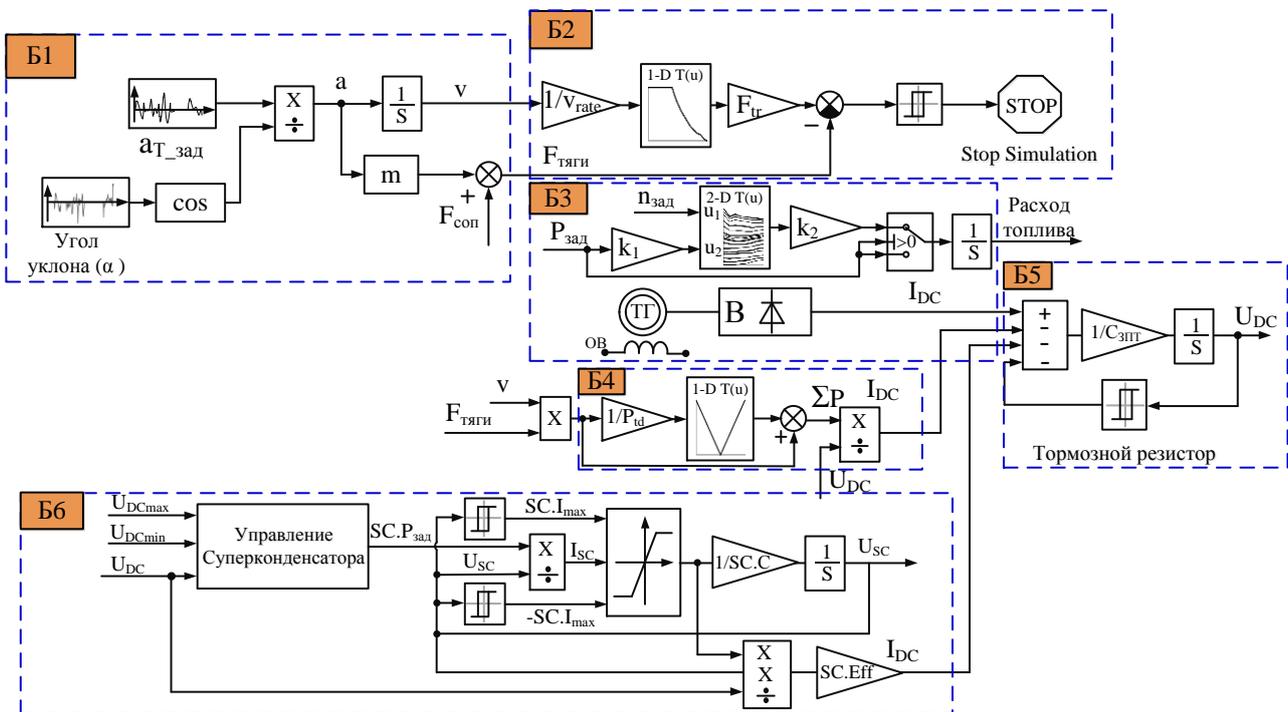


Рис. 9. Функциональная схема модели гибридного электрического ТС для задач оптимизации трансмиссии

В третьем блоке (Б3) располагается модель ДВС-генераторной установки. В зависимости от заданной мощности и скорости вращения ДВС по имеющимся экспериментально полученным характеристикам определяется

мгновенный удельный расход топлива, который интегрируется для получения количества топлива, необходимого на заданном цикле движения ТС.

В четвертом блоке (Б4) путем перемножения силы тяги и скорости движения получается мощность тягового привода, которая с учетом потерь в приводе, делится на напряжение звена постоянного тока, что позволяет вычислить ток звена постоянного тока.

В пятом блоке (Б5) располагается звено постоянного тока. Оно может получать или отдавать энергию от/к различных частей трансмиссии. Для ограничения напряжения в звене постоянного тока при избытке мощности, которую не могут принять имеющиеся на борту накопителя энергии, к звену подключается тормозной резистор.

В шестом блоке (Б6) представлена модель суперконденсаторного накопителя энергии и его силового преобразователя, который состоит из блока управления суперконденсатора и блока ограничения по току. Блок управления суперконденсатора реализует простой алгоритм баланса мощности. Когда напряжение ЗПТ растет, силовой преобразователь суперконденсатора начинает заряжать суперконденсатор постоянным током. Уставка постоянного тока может изменяться в зависимости от используемых в силовом преобразователе транзисторных модулей и тока насыщения дросселя силового преобразователя. Супер-конденсатор подключен через двунаправленный DCDC-преобразователь по схеме рис. 10.

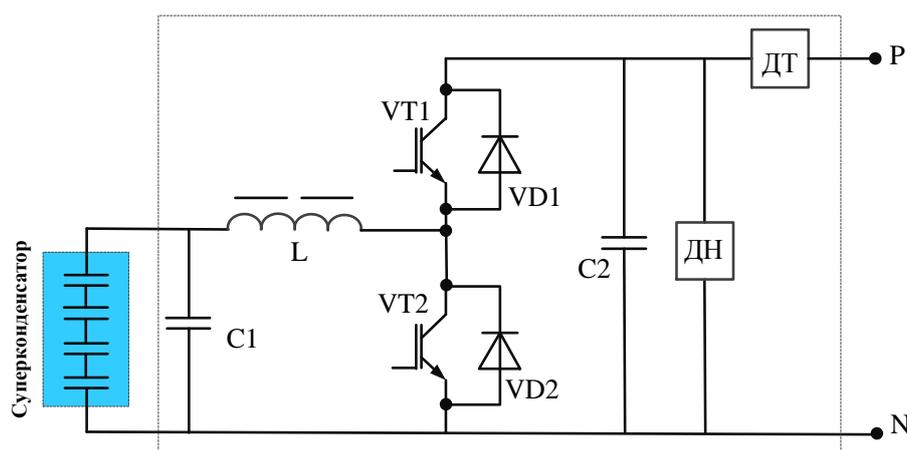


Рис. 10. Функциональная схема силового преобразователя суперконденсаторного накопителя

Система управления супер-конденсатором отслеживает напряжение звена постоянного тока и в случае выхода его за заданные границы подпитывает или разряжает звено. График работы суперконденсаторного накопителя в составе гибридной трансмиссии представлен на рис. 11.

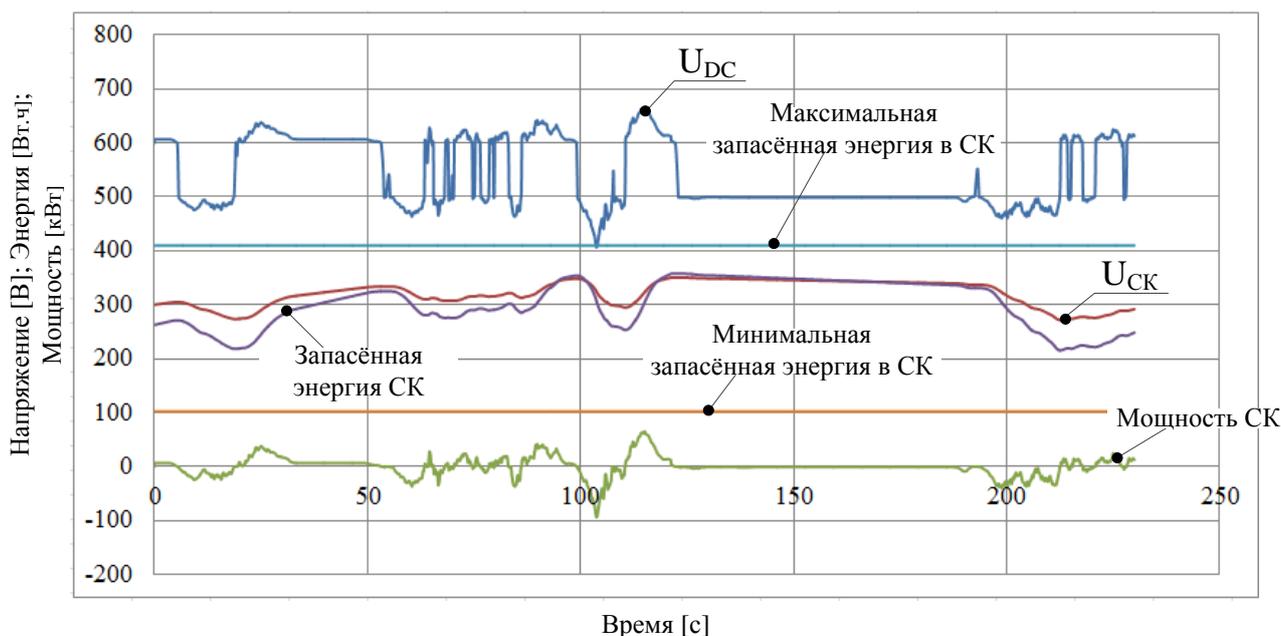


Рис. 11. Графики запасенной энергии супер-конденсатора, напряжений супер-конденсатора и звена постоянного тока, мощности супер-конденсатора

Для сравнения были промоделированы ТС содержащее супер-конденсаторный накопитель энергии из трех последовательных ёмкостей 63 Ф номинального напряжения 125 В и ТС без суперконденсатора. Результаты моделирования представлены на рис. 12. В процессе движения по маршруту ТС с супер-конденсатором обеспечивает работу ДВС в некотором оптимальном режиме. При этом ДВС обеспечивает всего 7,5 кВт мощности и может выбираться именно на эту мощность, так как расчеты показывают, что при движении по шоссе на скорости 130 км/ч (максимальная разрешенная скорость движения в России), в среднем мощность не превышает данного показателя. Для динамических режимов нехватку мощности ДВС покрывает супер-конденсатор. График интегрального расхода топлива состоит из 3-х участков, когда ДВС включен и заряжает суперконденсатор, когда выключен и ТС питается от суперконденсатора и когда ДВС снова включен, так как супер-конденсатор разрядился. При отсутствии в составе трансмиссии супер-конденсатора ДВС обеспечивает требуемую мощность на колесах в каждый момент времени.

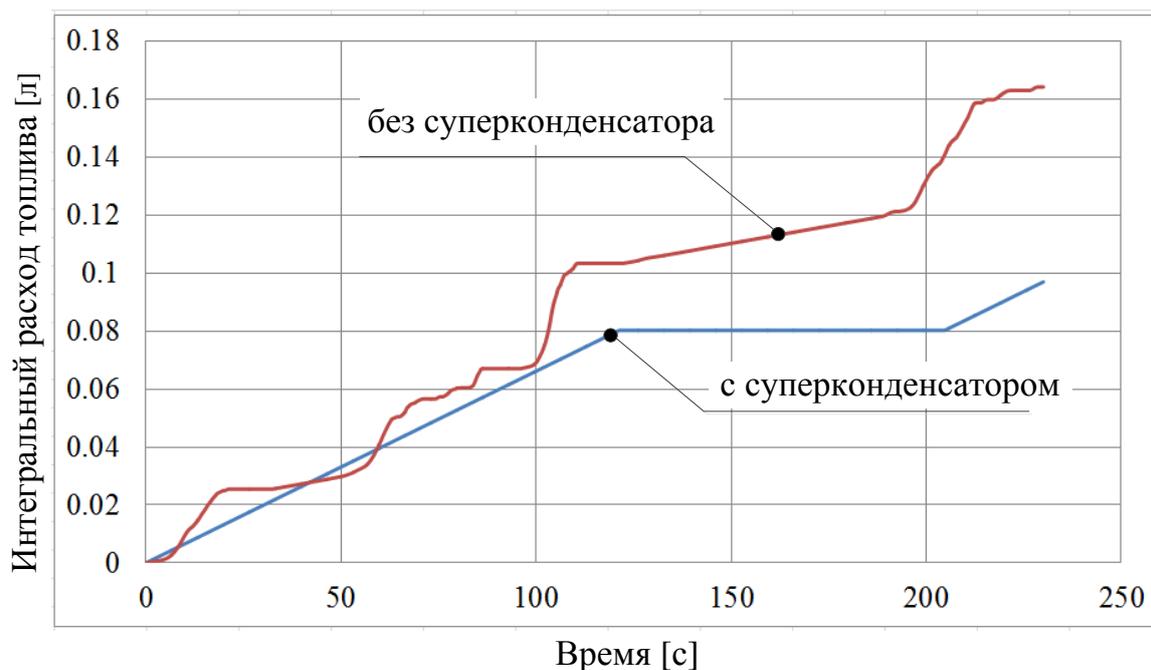


Рис. 12. Интегральный расход топлива для различных конфигураций гибридной трансмиссии

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Показано, что для определения энергетических режимов работы транспортного средства с гибридной электрической трансмиссией необходимо представление траектории в виде зависимости от времени нормального и тангенциального ускорения, а также угла наклона дороги.
2. Разработаны математические методы анализа данных глобальных навигационных систем, учитывающие погрешность позиционирования и дискретность по времени и позволяющие получать ускорения транспортного средства, с коррекцией информации с помощью акселерометра и гироскопа для получения нормального и тангенциального ускорения и уклона дороги на всём протяжении маршрута.
3. Разработан программно-аппаратный комплекс на базе мобильного телефона и контроллера с акселерометром для снятия траекторий движения реальных транспортных средств с последующей конвертацией данных по положению и показаний акселерометра в нормальное и тангенциальное ускорение и угол наклона дороги.
4. Разработана математическая модель, пригодная для оценки эффективности выбора электрооборудования гибридных электротрансмиссий автономных транспортных средств, работающая с данными траектории, полученными с реального транспортного средства.

5. Проведенные исследования на разработанной модели гибридного электрического транспортного средства, подтверждают возможность уменьшения расхода топлива для заданной траектории движения путем рационального выбора параметров электрооборудования.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Egor Kulik, Xuan Trung Tran, Alecksey Anuchin, Yuriy Vagapov. GPS-track data processing for the optimization of the powertrain for hybrid electric vehicles // 2017 IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), p.5, 2017, (DOI: 10.1109/RTUCON.2017.8124845).

2. Egor Kulik, Trung Tran, Alecksey Anuchin. Estimation of the Requirements for Hybrid Electric Powertrain Based on Analysis of Vehicle Trajectory Using GPS and Accelerometer Data // International Workshop on Electric Drives (IWED2018), p.5, 2018, (DOI: 10.1109/IWED.2018.8321394).

3. Чан Суан Чунг, Кулик Е. С., Анучин А. С. Метод оценки требований к гибридным электрическим трансмиссиям на основе анализа траекторий движения транспортного средства с использованием данных GPS и акселерометра // Вестник МЭИ. 2018. № 3. С. 73–79. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-3-73-79.