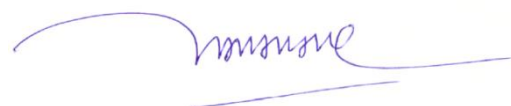


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

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»

**ДИССЕРТАЦИЯ**

**на соискание ученой степени кандидата технических наук**

Научный руководитель:

к.т.н., доцент Анучин А.С.

Москва – 2018

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                                      |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Введение .....                                                                                                                       | 6         |
| <b>ГЛАВА 1. ТРЕБОВАНИЯ К ГИБРИДНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ<br/>ТРАНСМИССИЯМ И ПОДХОДЫ К ОПТИМИЗАЦИИ .....</b>                                  | <b>13</b> |
| 1.1. Классификация гибридных электрических и полностью электрических<br>трансмиссий.....                                             | 13        |
| 1.1.1. Последовательная гибридная электрическая трансмиссия .....                                                                    | 14        |
| 1.1.2. Параллельная гибридная электрическая трансмиссия.....                                                                         | 17        |
| 1.1.3. Последовательно-параллельная гибридная электрическая<br>трансмиссия.....                                                      | 20        |
| 1.1.4. Полностью электрические ТС.....                                                                                               | 21        |
| 1.2. Способы оптимизации гибридных электрических и полностью<br>электрических трансмиссий .....                                      | 23        |
| 1.2.1. Варианты исполнения тяговых электроприводов.....                                                                              | 24        |
| 1.2.2. Оптимизация в области накопителей энергии .....                                                                               | 27        |
| 1.2.3. Зарядка гибридного транспорта и автономные транспортные<br>средства .....                                                     | 28        |
| 1.3. Требования к модели механической части транспортного средства для<br>оптимизации трансмиссии .....                              | 29        |
| 1.4. Выводы по главе 1 .....                                                                                                         | 31        |
| <b>ГЛАВА 2. ПОЛУЧЕНИЕ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ ГИБРИДНЫХ<br/>ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С ПОМОЩЬЮ ГЛОБАЛЬНЫХ<br/>НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ .....</b> | <b>33</b> |
| 2.1. Принципы работы навигационных систем GPS и ГЛОНАС.<br>Точностные показатели .....                                               | 33        |
| 2.1.1. Принцип работы навигационных систем GPS/ГЛОНАС.....                                                                           | 40        |
| 2.1.2. Источники ошибок .....                                                                                                        | 43        |
| 2.1.3. Точность системы GPS/ ГЛОНАСС.....                                                                                            | 46        |
| 2.2. Определение координат средствами мобильных навигационных систем<br>.....                                                        | 48        |
| 2.3. Разработка программного обеспечения записи GPS-трека движения<br>транспортного средства .....                                   | 50        |
| 2.4. Использование картографических сервисов для учета высоты.....                                                                   | 61        |
| 2.5. Преобразование координат для определения положения транспортного<br>средства в метрической системе координат .....              | 64        |
| 2.6. Метод интерполяции траектории движения по данным глобальных<br>навигационных систем.....                                        | 66        |
| 2.6.1. Фильтрация нехарактерных точек траектории .....                                                                               | 66        |

|                                                                                                                                       |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.6.2. Алгоритм аппроксимации ускорений.....                                                                                          | 67        |
| 2.7. Выводы по главе 2 .....                                                                                                          | 71        |
| <b>ГЛАВА 3. КОРРЕКЦИЯ ДАННЫХ ТРАЕКТОРИИ СРЕДСТВАМИ<br/>АКСЕЛЕРОМЕТРА, ГИРОСКОПА И КОМПАСА.....</b>                                    | <b>73</b> |
| 3.1. Вспомогательные инструменты для уточнения данных о перемещении<br>ТС: акселерометр, компас, гироскоп .....                       | 73        |
| 3.1.1. Трёхосевой Акселерометр .....                                                                                                  | 75        |
| 3.1.2. Трёхосевой гироскоп .....                                                                                                      | 76        |
| 3.1.3. Трёхосевой магнитометр .....                                                                                                   | 77        |
| 3.2. Разработка программного обеспечения поддержки вспомогательных<br>инструментов измерения для мобильной навигационной системы..... | 78        |
| 3.2.1. Контроллер МК19.2 для разработки и отладки программного<br>обеспечения и интегрированная среда Code Composer Studio .....      | 78        |
| 3.2.2. Двухпроводный последовательный интерфейс I2C .....                                                                             | 80        |
| 3.2.3. Последовательность записи .....                                                                                                | 82        |
| 3.2.4. Последовательность чтения.....                                                                                                 | 82        |
| 3.2.5. Калибровка и инициализация микросхемы MPU-9250 .....                                                                           | 84        |
| 3.3. Анализ точности определения координат в инерциальной<br>навигационной системе.....                                               | 85        |
| 3.3.1. Фильтр Маджвика .....                                                                                                          | 86        |
| 3.4. Коррекция данных GPS-трека данными инерциальной навигационной<br>системы.....                                                    | 88        |
| 3.4.1. Коррекция данных GPS-трека данными инерциальной<br>навигационной системы .....                                                 | 89        |
| 3.4.2. Расчет нормальных и тангенциальных ускорений .....                                                                             | 95        |
| 3.5. Выводы по главе 3 .....                                                                                                          | 96        |
| <b>ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ<br/>МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ГИБРИДНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО<br/>ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА.....</b>     | <b>98</b> |
| 4.1. Базовая модель транспортного средства.....                                                                                       | 98        |
| 4.2. Учет сил сопротивления, действующих на ТС .....                                                                                  | 99        |
| 4.2.1. Сила тяжести транспортного средства.....                                                                                       | 99        |
| 4.2.2. Сила трения качения .....                                                                                                      | 100       |
| 4.2.3. Аэродинамическое сопротивление .....                                                                                           | 103       |
| 4.2.4. Тяговое усилие.....                                                                                                            | 104       |
| 4.3. Пересчет траектории движения к координатам, связанным с<br>положением транспортного средства в пространстве .....                | 105       |
| 4.4. Механическая модель ТС .....                                                                                                     | 107       |

|                                                                                                                                                             |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>4.5. Выводы по главе 4 .....</b>                                                                                                                         | <b>109</b> |
| <b>ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ<br/>ГИБРИДНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ НА МАРШРУТЕ<br/>ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА .....</b>      | <b>111</b> |
| <b>5.1. Составляющие гибридной трансмиссии .....</b>                                                                                                        | <b>111</b> |
| <b>5.1.1. Система выработки электроэнергии .....</b>                                                                                                        | <b>111</b> |
| <b>5.1.2. Электродвигатели в гибридных ТС .....</b>                                                                                                         | <b>113</b> |
| <b>5.1.3. Устройства хранения энергии в гибридных ТС .....</b>                                                                                              | <b>115</b> |
| <b>5.2. Моделирование маршрута перемещения гибридного ТС из условия<br/>полного использования энергии торможения в системе накопления энергии<br/>.....</b> | <b>119</b> |
| <b>5.2.1. Функциональная схема модели гибридного электрического<br/>транспортного средства .....</b>                                                        | <b>119</b> |
| <b>5.2.1.1. Механическая часть .....</b>                                                                                                                    | <b>120</b> |
| <b>5.2.1.2. Суперконденсаторный накопитель энергии .....</b>                                                                                                | <b>121</b> |
| <b>5.2.1.3. Звено постоянного тока .....</b>                                                                                                                | <b>125</b> |
| <b>5.2.2. Расход топлива автомобиля в условии полного использования<br/>энергии торможения в системе накопления энергии .....</b>                           | <b>125</b> |
| <b>5.3. Моделирование маршрута перемещения автомобиля из условия<br/>отсутствия накопителя энергии .....</b>                                                | <b>127</b> |
| <b>5.3.1. Структурная схема последовательного электрического<br/>гибридного ТС без накопителя энергии .....</b>                                             | <b>127</b> |
| <b>5.3.2. Расход топлива в условии отсутствия суперконденсатора .....</b>                                                                                   | <b>127</b> |
| <b>5.4. Экономическое сопоставление результатов моделирования .....</b>                                                                                     | <b>128</b> |
| <b>5.5. Выводы по главе 5 .....</b>                                                                                                                         | <b>129</b> |
| <b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>                                                                                                                              | <b>131</b> |

**Список используемых сокращений**

ТС – Транспортное средство

ДВС – Двигатель внутреннего сгорания

ЗПТ – Звено постоянного тока

ГЛОНАСС – Глобальная навигационная спутниковая система

GPS – Global Positioning System (система глобального позиционирования)

АЦП – Аналого-цифровой преобразователь

NEDC – New European Driving Cycle (новый европейский цикл движения)

UDC – Urban Driving Cycle (городской цикл движения)

C/A – Clear Access/Coarse Acquisition

JDK – Java Development Kit

SDK – Software Development Kit

ADT – Android Development Tools

IERS96 – International Earth Rotation Service 1996

GRS80 – Geodetic Reference System 1980

ПЗ-90 – Параметры Земли 1990

WGS84 – World Geodetic System 1984

## **ВВЕДЕНИЕ**

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 [2]. 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) [43].

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 [50].

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 [51], [52].

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)» [53], «НАМИ» [54], ФГБОУ ВО «ИГЭУ» [55]. 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. Алянкин и др., однако разработанные в настоящий момент решения не являются в полной мере коммерческими продуктами и занимают нишу уникальной техники, например, такой как карьерные самосвалы, поэтому настоящая оптимизация данных решений по топливной экономичности не проводилась в угоду выполнения специфических

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 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 ФГБОУ ВО «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 изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук или приравненных к ним, включая две работы в изданиях, включенных в базу Scopus.

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

**В первой главе** подробно рассмотрены все основные виды гибридных электрических транспортных средств (ТС) и полностью электрических ТС, и их преимущества и недостатки. При сопоставлении видов ТС показано, что наиболее перспективными являются гибридные электрические ТС последовательного типа.

Определены способы улучшения показателей гибридных электрических ТС за счет оптимизации в области тяговых электроприводов и генератора, объема суперконденсаторных накопителей и аккумуляторов, и сформулированы требования к модели транспортного средства для решения задачи оптимизации.

Рассмотрен стандартный цикл NEDC (новый европейский стандартный цикл движения) для испытаний трансмиссий и показана необходимость рассмотрения реальных циклов движения ТС для решения задач оптимизации.

**Во второй главе** рассмотрены принципы функционирования американской глобальной навигационной спутниковой системы (GPS) и российской системы (ГЛОНАСС). Указаны факторы, влияющие на точность системы GPS/ГЛОНАСС.

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 в файл текущих координат и времени с максимально возможной частотой.

Выбрана проекция Гаусса-Крюгера для преобразования полученных координат точек от приложения GPS, определяющихся геодезическими широтами, долготами, и высотами в координаты в метрической системе координат, находящейся в плоскости для определения положения транспортного средства.

Разработан метод обработки данных GPS-трека транспортного средства путем использования алгоритма, фильтрующего ошибки дискретизации системы GPS и повышающего точность представления траектории.

**В третьей главе** рассмотрен вопрос уточнения траектории движения, полученной от глобальной навигационной системы, путем учета данных акселерометра, компаса и гироскопа.

Приводится описание аппаратной части комплекса, включающего в себя плату контроллера и микросхему акселерометра/компаса/гироскопа. Описывается разработка программного обеспечения на языке C/C++ для получения информации с целью уточнения траектории движения, полученной от глобальной навигационной системы. Анализируется систематическая ошибка, к которой склонны данные акселерометра и гироскопа из-за явления

гироскопического дрейфа и шумов. Применен фильтр Маджвика для решения указанной проблемы.

Проводился эксперимент на автомобиле при движении по улицам города Москвы в районе Лефортово. Предложенный алгоритм используется для получения скорректированной траектории для получения тангенциального и нормального ускорения, угла наклона профиля дороги на всем протяжении маршрута.

**В четвертой главе** разработана механическая модель гибридного ТС. По полученной ранее траектории движения проводится моделирование и определение мощности, которую развивало ТС во время движения.

**В пятой главе** разработана электромеханическая модель гибридного ТС, включающая в себя модели основных узлов, таких как дизель-генераторная установка, тяговые электроприводы, накопители энергии, алгоритмы работы составляющих гибридной трансмиссии.

Для полученной траектории движения гибридного ТС проведены модельные эксперименты с различными конфигурациями гибридной трансмиссии, показывающие различное энергопотребление на одном и том же цикле движения.

**В заключении** сформулированы основные результаты работы.

**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.

## **ГЛАВА 1. ТРЕБОВАНИЯ К ГИБРИДНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТРАНСМИССИЯМ И ПОДХОДЫ К ОПТИМИЗАЦИИ**

### **1.1. Классификация гибридных электрических и полностью электрических трансмиссий**

Гибридные электрические транспортные средства (ТС) имеют два типа источников энергии: необратимые и обратимые. Под необратимым источником энергии понимается ископаемое топливо (бензин, дизельное топливо, газ и др.), биотопливо или источник энергии для топливных элементов, такой как водород. Обратимые источники энергии — это аккумуляторы или суперконденсаторы, которые являются хранилищами электрической энергии, способными как забирать, так и отдавать её. Необратимый источник энергии как правило состоит из ёмкости с топливом, двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и генератора. Основным недостатком является небольшой КПД ДВС, который обычно варьируется от 20 до 50%. КПД ДВС зависит от многих факторов, и для каждого двигателя имеется кривая оптимальной нагрузки в функции его скорости вращения. При движении по шоссе автомобиль работает только в одной точке на этой кривой, и это необязательно точка максимального КПД ДВС, так как имеются ограничения на количество передаточных чисел и диапазон коробки передач. Кроме того, следует учитывать, что для достижения требуемой динамики движения ДВС получается существенно переразмеренным. Так, в среднем для движения на скорости 110 км/ч современному дорожному автомобилю достаточно мощности около 20 кВт, в то время как большинство ДВС выпускается на мощность 110 л.с. или 81 кВт. Соответственно, двигатель в обычном режиме работы недогружен в 4 и более раз, что не позволяет достигать паспортного КПД.

С целью увеличения эффективности силовой установки необходимо уменьшить расход топлива за счет вывода ДВС в оптимальный режим работы и повторного использования кинетической энергии, генерируемой тяговым электродвигателем при торможении. В обычном ТС при торможении

используется трение, т.е. кинетическая энергия уходит на нагрев механических тормозов. Гибридные ТС могут преобразовать часть кинетической энергии в электрическую энергию, заряжая аккумуляторные батареи или суперконденсаторы, для повторного её использования.

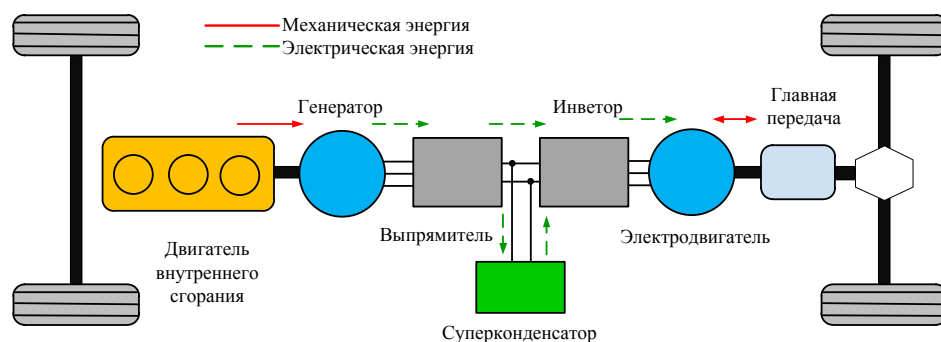
Накопитель, как источник энергии, дополняет ДВС и увеличивает мощность энергетической подсистемы. Это позволяет использовать ДВС меньшей мощности в более эффективном режиме с нагрузкой близкой к номинальной, сохраняя прежнюю динамику ТС, как и с ДВС большего объема.

Гибридные ТС состоят из множества компонентов, отвечающих за передачу мощности на ведущие колеса автомобиля. В состав гибридной трансмиссии включены: ДВС, генератор, тяговый электродвигатель, накопитель энергии и электрические преобразователи (генератора, суперконденсатора/аккумулятора, тягового электродвигателя). В зависимости от структуры привода можно разделить их на три основных конфигурации: последовательная, параллельная и последовательно-параллельная.

### **1.1.1. Последовательная гибридная электрическая трансмиссия**

Последовательная гибридная трансмиссия является конфигурацией, в которой ДВС приводит в действие электрический генератор для питания тягового электродвигателя (рис. 1.1). Единственным устройством передачи мощности на колеса является тяговый электродвигатель, который соединен с ведущими колесами через главную передачу. Здесь и далее для сокращения объема будет принято, что тяговый электродвигатель и генератор по умолчанию имеют необходимые электрические преобразователи, которые обеспечивают требуемый режим работы, и отдельно от них рассматриваться не будут. Аккумулятор или суперконденсатор может входить в состав трансмиссии и заряжается как от генератора, так и при рекуперативном торможении. Так как электроэнергия может поступать к тяговому электродвигателю и от аккумулятора, и от генератора, то это позволяет использовать ДВС малой

мощности, так как он должен обеспечивать лишь среднюю мощность, требуемую для движения. Оставшуюся пиковую мощность восполняет аккумулятор. Подобная схема применена в гибридной трансмиссии автомобиля BMW i3, который по сути является полностью электрическим автомобилем. Кроме батареи в качестве источника энергии он может комплектоваться системой REX — Range EXtender (увеличитель дальности), содержащей ДВС и генератор мощностью всего 20 кВт. При сильном разряде аккумуляторной батареи ДВС включается и производит питание гибридной электротрансмиссии. Часть тратится на заряд аккумулятора, часть на движение. При этом ДВС и генератор работают в точке максимального КПД в отсутствии каких-либо динамических режимов. Вместе с системой увеличения дальности полностью электрический автомобиль становится последовательным гибридом, пробег которого ограничен лишь объемом топливного бака (вместе с зарядом аккумулятора).



**Рис.1.1. Структура последовательного электрического гибридного ТС**

В обычном ТС ДВС вынужден работать неэффективно. Последовательная компоновка решает эту проблему. Так как ДВС не соединен с колесами, ему нет необходимости работать в широком диапазоне мощностей, которые характерны при езде по городу, он постоянно работает в диапазоне максимального КПД. Недостатком системы являются потери энергии при преобразовании энергии из механической в электрическую и обратно. Система наиболее эффективна при движении в режимах частых остановок, ускорениях и торможениях, т.е. в городских условиях. Такая схема применяется в городском транспорте.

Кроме аккумулятора в последовательной схеме гибридного ТС может быть установлен суперконденсатор (или маховик), что повысить эффективность за счет возможности быстрого накопления энергии при торможении или использования её при разгоне. При меньшей удельной плотности энергии такие накопители обеспечивают существенно большую мощность. Обычно, система управления трансмиссией следит, чтобы суперконденсатор был заряженным на низкой скорости и полностью разряжался при достижении максимальной скорости. Такой режим работы позволяет максимально полно использовать его ёмкость, принимая энергию торможения и используя её повторно при разгоне в тех гибридных трансмиссиях, где размер аккумулятора либо мал, либо аккумулятор совсем отсутствует.

#### **Недостатки последовательных гибридных ТС:**

- Суммарная мощность и, соответственно, масса ДВС, генератора, накопителей энергии и электродвигателя больше, чем у обычного негибридного ТС;
- Мощность ДВС преобразуется сначала в электрическую энергию, запасается при необходимости, затем преобразуется снова в механическую. Из-за потерь в процессе каждого преобразования в некоторых режимах работы КПД последовательного гибридного ТС может быть ниже, чем у других трансмиссий;
  - Для эффективной работы требует установки накопителя энергии, способного принимать пики мощности при разгоне и торможении.

#### **Преимущества последовательных гибридных ТС:**

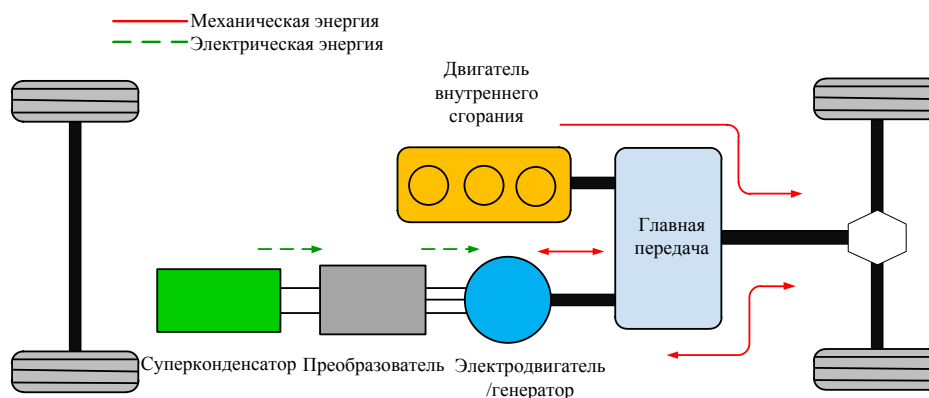
- Отсутствует механическая связь между ДВС и колесами. Установка «ДВС–генератор» может быть расположена в любом месте ТС;
- ДВС может работать в узком диапазоне оборотов и нагрузки в режиме максимального КПД;



- Последовательная схема являются эффективной при движении по городу в условиях постоянных разгонов и торможений с повторным использованием кинетической энергии.

### **1.1.2. Параллельная гибридная электрическая трансмиссия**

При параллельной компоновке и ДВС, и электродвигатель одновременно приводят в движение ведущие колеса, используя устройство механического сложения мощностей или специальный редуктор (рис. 1.2). С помощью компьютерного управления и передачи они работают согласованно. При разгоне ТС электродвигатель работает, помогая ДВС, а в установившихся режимах или торможении работает как генератор, забирая от ДВС избыток мощности, оставляя его в наиболее эффективном режиме работы. Если батарея полностью зарядилась, то ДВС может быть заглушен и остановлен механическим тормозом, тогда движение будет осуществляться только с помощью электродвигателя. Как правило в таком гибридном ТС используется аккумуляторная батарея меньшей емкости, чем в последовательном гибриде. Кроме того, устройство механического сложения мощностей от ДВС и электродвигателя вносит ограничения на отдельную работу от ДВС или электродвигателя при различных скоростях движения ТС. Однако по сравнению с последовательными гибридными ТС передача энергии на колеса от ДВС производится без промежуточного преобразования в электроэнергию, что в таких режимах работы, как движение по шоссе на высокой скорости, даёт выигрыш в КПД. Система эффективна на автострадах, но менее эффективна в городе (езда с частыми остановками). Применяется в легковых автомобилях, таких как Toyota Prius.

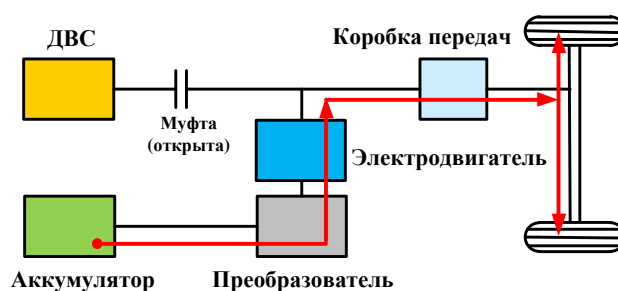


**Рис. 1.2. Структура параллельного гибридного электромобиля**

В большинстве конструкций параллельной схемы объединяются электрический генератор и электродвигатель в одном блоке, заменяющем как обычный стартер, так и генератор переменного тока. Аккумуляторную батарею можно заряжать во время рекуперативного режима и во время равномерного движения (когда мощность ДВС выше требуемой мощности для движения).

Параллельная конфигурация имеет различные режимы работы:

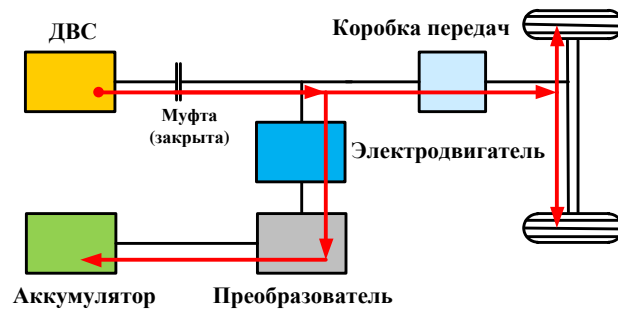
а) Только электрическая мощность (рис. 1.3): до скоростей обычно 40 км/ч электродвигатель питается с накопителя энергии. В этом случае аккумуляторная батарея не подзаряжается от ДВС. Это обычный способ для движения по городу, а также задним ходом, поскольку во время заднего хода скорость ограничена.



**Рис.1.3. Электрический режим**

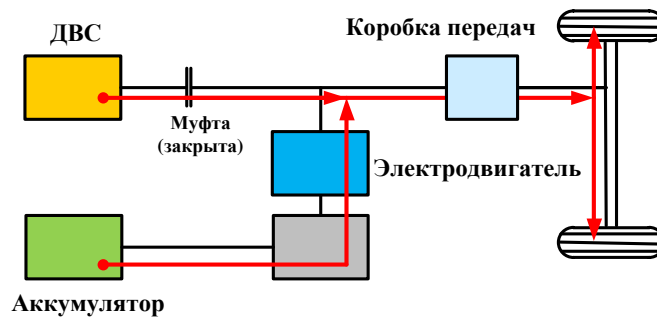
б) Только ДВС + Зарядка аккумулятора: при скоростях выше 40 км/ч основным источником мощности становится ДВС. Такой режим эффективен на автострадах. Электродвигатели в этом режиме обеспечивают подгрузку ДВС и

стабилизацию его скорости вращения для достижения максимального КПД, попутно заряжая батарею (рис. 1.4).



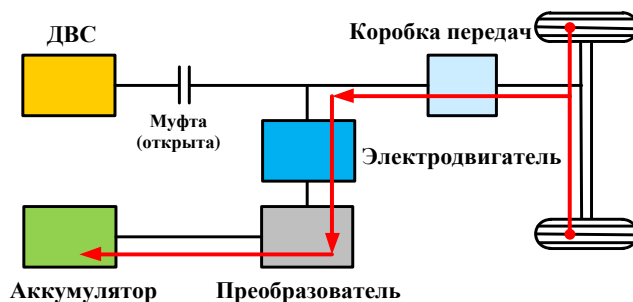
**Рис.1.4. Зарядка аккумулятора**

в) ДВС и электроэнергия: если требует больше энергии (во время ускорения или на высокой скорости), электродвигатель начинает работать параллельно с ДВС, достигая большей мощности (рис. 1.5).



**Рис. 1.5. Гибридный/Электрический режим**

г) Рекуперативный режим (рис. 1.6): при торможении или замедлении электродвигатель работает как генератор и преобразует кинетическую энергию от движущегося ТС в электрическую энергию, заряжая аккумуляторную батарею.



**Рис.1.6. Рекуперативный режим**

### **Недостатки параллельных гибридных ТС:**

- Сложная система, в которой элементы должны работать строго согласовано, что снижает надёжность при отказе одного из них, а резервирование слишком сложно;
- ДВС не работает в узком или постоянном диапазоне оборотов, поэтому эффективность зависит от скорости и других условий движения.

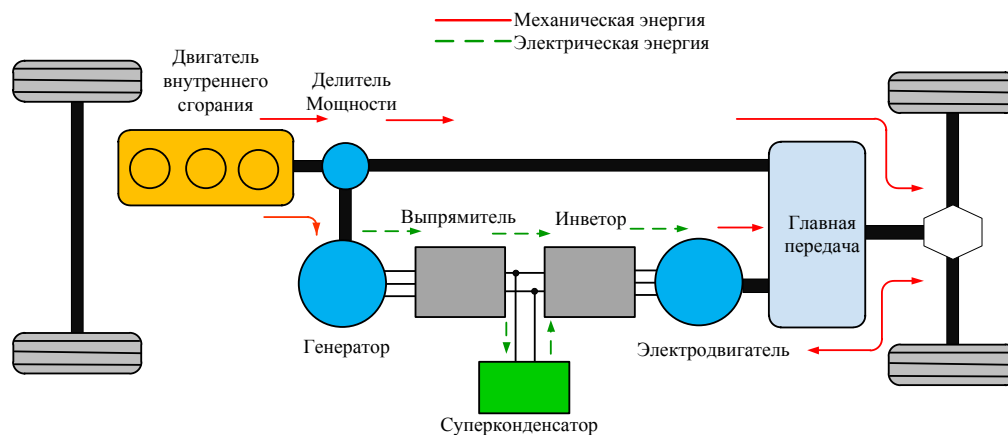
### **Преимущества параллельных гибридных автомобилей:**

- Система параллельных гибридных автомобилей эффективна на автострадах;
- Большая гибкость при переключении между электрической мощностью и мощностью ДВС;
- По сравнению с последовательным гибридом электродвигатель может быть сконструирован менее мощным, чем ДВС, поскольку он обеспечивает вспомогательную тягу. Требуется только один электрический двигатель/генератор.

### **1.1.3. Последовательно-параллельная гибридная электрическая трансмиссия**

Комбинированные гибридные системы включили в себя лучшее из описанных выше трансмиссий. Они имеют особенности как последовательных, так и параллельных гибридов (рис. 1.7). В параллельную компоновку добавляются два узла – генератор и делитель мощности (планетарный механизм), который расположен между ДВС и электродвигателем. С помощью делителя мощности поток энергии от ДВС расщепляется. Часть энергии передается на колёса, суммируясь с энергией тягового электродвигателя, а часть поступает на генератор, заряжая аккумуляторную батарею. Эта запасенная в батарее энергия позже используется тяговым электродвигателем, который способен не только передавать энергию на колёса, но и заряжать аккумуляторную батарею при торможениях. По принципу работы трансмиссия

похожа на параллельную, но имеет более гибкую конфигурацию, обеспечивающую различные режимы работы.



**Рис.1.7. Структура последовательно-параллельного гибридного электромобиля**

#### **Недостатки последовательно-параллельных гибридных ТС:**

- Сложная система, высокая стоимость из-за большего числа элементов.
- Более низкая надёжность из-за большего числа элементов в системе.
- Как и в параллельной схеме режимы работы частично зависят от текущей скорости транспортного средства.

#### **Преимущества последовательно-параллельных гибридных ТС:**

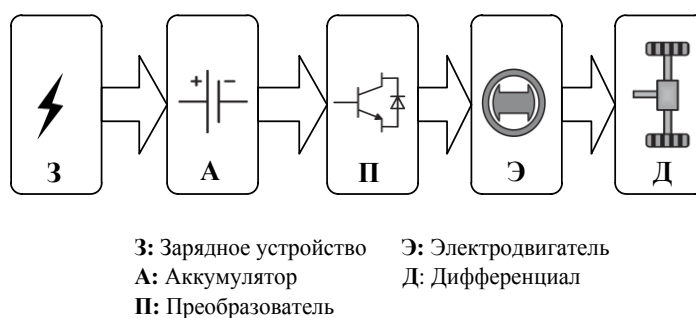
- Большая гибкость для переключения между электрической мощностью и мощностью ДВС.
- Используются лучшие особенности как последовательных, так и параллельных гибридов.

#### **1.1.4. Полностью электрические ТС**

В качестве источника механической энергии в электрических ТС используют только электродвигатель, питаемый от аккумуляторной батареи. Электрические ТС обладают многими преимуществами по сравнению с обычным автомобилем с двигателем внутреннего сгорания, такими как необслуживаемость, бесшумная работа. Вместе с тем, подвеска всё равно

требует обслуживания, срок службы аккумуляторной батареи ограничен, а низкий уровень шума потенциально более опасен с точки зрения безопасности, например, пешеходов, которые могут не услышать приближающееся транспортное средство. Так уже появлялись предложения по установке на электромобили электродинамических громкоговорителей для имитации шума обычного автомобиля.

Обычно электрические ТС имеют только редуктор с фиксированным передаточным числом вместо коробки передач. Схема похожа на последовательный гибрид (рис. 1.8), однако в ней нет необратимого источника энергии.



**Рис.1.8. Схема полностью электрического ТС**

Благодаря преимуществам, таким как простота и надёжность конструкции, в настоящее время электрические ТС получают широкое распространение в развитых странах. В Нидерландах эксплуатируется более 120 000 электромобилей при около 40 000 зарядных станций. В России автомобилей приблизительно в 500 раз меньше.

Основным недостатком электрических ТС является короткий пробег. Это является существенным ограничением для коммерческого транспорта и личного транспорта в больших странах, таких как Россия. Современные модели проезжают в среднем 100-400 км на одном заряде, а подзарядка такого транспорта в отсутствие специальной инфраструктуры длится до 10 часов (и более). Также сложно организовать зарядную инфраструктуру для такого городского транспорта. К примеру, автобус требует мощность зарядной станции

от 100 до 200 кВт, чтобы произвести зарядку во время обеда. Эта мощность не всегда имеется в условиях современных мегаполисов.

Не готовы принять полностью электрические автомобили и сами пользователи. Так, BMW i3 в Нидерландах — это один из самых дешевых для аренды автомобилей, не самый популярный, так как его боятся арендовать. Водитель чувствует себя некомфортно, когда запас хода снижается ниже 100 км в незнакомой стране при необходимости искать зарядную станцию и планировать маршрут с учётом особенностей автомобиля. Например, маршрут из Москвы в Санкт-Петербург на скорости 130 км/ч потребует 6 остановок на быстрых зарядных станциях на 30 минут каждая. На скорости 80 км/ч — 3 или 4 остановки на то же время. Но и зарядных станций постоянного тока на этом маршруте пока нет.

Вместе с тем, полностью электрический автомобиль может быть легко преобразован в последовательный гибрид, путем добавления ДВС-генераторной установки. По такому пути пошли, например, в компании BMW с автомобилем i3, который является полностью электрическим автомобилем с запасом хода до 220 км и может оснащаться системой увеличения дальности REX — Range EXtender, позволяющей снять ограничения по пробегу. Данное решение является очень удобным для потребителя, пока еще не решены проблемы с развертыванием и не развернуты сети зарядных станций. Именно вопросы оптимизации трансмиссий последовательного типа будут объектом исследования в данной работе, хотя результаты могут быть перенесены на другие типы гибридных трансмиссий.

## **1.2. Способы оптимизации гибридных электрических и полностью электрических трансмиссий**

Оптимизация трансмиссии может производиться исходя из различных критериев, как цена, расход топлива, запас хода, динамические параметры и др.

Оптимизацию трансмиссии можно производить, изменяя параметры следующих подсистем трансмиссии:

- количество ведущих колес и тяговых приводов;
- мощность тяговых электроприводов;
- мощность ДВС-генераторной установки;
- объем и тип аккумулирующих элементов [1].

При этом надо понимать, что изменение параметров каждой из этих подсистем влияет сразу на все характеристики ТС. Например, при увеличении емкости аккумуляторных батарей увеличивается масса ТС и может потребоваться проводить работы по модификации подвески и силовых структур корпуса машины.

Кроме того, переход с обычного ТС на гибридный не должен сопровождаться сильным изменением динамических параметров, так как один из параметров комфорта пользователя автомобиля — это возможность уверенно держаться в потоке, производить обгоны и т.д. То есть с переходом на гибридную ТС динамические параметры желательно оставить неизменными. Для маршрутных (коммерческих) ТС динамические параметры напрямую определяют производительность пассажироперевозок и, соответственно, экономическую целесообразность их работы. Поэтому в данной работе акцент сделан именно на *сохранение динамических параметров при попутной возможности оптимизации расхода топлива.*

### **1.2.1. Варианты исполнения тяговых электроприводов**

Гибридные трансмиссии последовательного типа можно условно разделить на трансмиссии с групповым приводом и с индивидуальным. В первом случае имеется один электромотор, а его вал соединен с дифференциалом и колёсами. Во втором случае трансмиссия имеет индивидуальный привод на каждое ведущее колесо.



Оба варианта трансмиссий обладают хорошими возможностями по управляемости в городских условиях и возможности приёма энергии торможения в бортовой накопитель энергии. Оба варианта позволяют не использовать механическую тормозную систему в нормальных условиях эксплуатации, чем значительно сокращают расходы на обслуживание и увеличивают необходимый межсервисный интервал.

Однако реализация противобуксовочной и антиблокировочной систем для группового привода требует использования механических тормозов, что не является существенной проблемой в условиях городской эксплуатации. Вместе с тем, групповой привод имеет меньшую надёжность по сравнению с индивидуальным, и в случае отказа тягового инвертора или одного из моторов трансмиссия с индивидуальным приводом может продолжать движение до места ремонта своим ходом [49].

В качестве тяговых электродвигателей применяют различные типы электрических машин. Так Toyota, BMW, Nissan и др. используют в качестве тяговых синхронные машины с возбуждением от постоянных магнитов. Renault работает над тяговым приводом с синхронным электродвигателем регулируемого возбуждения, а Tesla выпускает машины с асинхронным тяговым электроприводом.

Каждый из этих электроприводов имеет достоинства, так и недостатки. Например, асинхронный тяговый привод имеет проблему с выделением потерь в роторной цепи, которые требуется удалять системой охлаждения. Это особенно заметно, когда машины Tesla при езде по гоночным трассам «перегреваются» и обеспечивают около 90 кВт в продолжительном режиме вместо паспортных 300 кВт и более. Кроме того, асинхронный двигатель теряет в максимальном моменте на высоких скоростях из-за ограничения тока его индуктивностями рассеяния, не позволяющими работать в режиме постоянства полной мощности.

Синхронные машины с регулируемым возбуждением имеют большой вес за счет необходимости возбуждать ротор и также требуют отвода тепла от него. И хотя регулировочные характеристики превосходят асинхронный двигатель, КПД синхронной машины и асинхронной уступает электродвигателям с возбуждения от постоянных магнитов.

Синхронные машины с постоянными магнитами (СДПМ) обеспечивают хорошие тяговые характеристики, имеют высокий КПД, но обладают и весомыми недостатками. При вращении такого двигателя магниты неизбежно создают ЭДС вращения. Так, присутствуют потери холостого хода, что требует рабочего охлаждения (жидкостного) даже при буксировке ТС. При неисправностях тягового привода в инверторе или двигателе имеются ограничения на буксировку. Эта проблема явно проявляется в автомобилях Toyota Prius, в которых буксировка строго ограничена, как по скорости движения, так и по времени. И хотя токи КЗ в машине не превышают номинала, возможны локальные перегревы и возникновение пожара на борту ТС при буксировке. Кроме того, цена постоянных магнитов увеличивается год от года из-за постоянного роста их потребления. Поэтому тяговый электропривод на базе СДПМ получается в разы дороже асинхронного или синхронного с регулируемым возбуждением. Если для дорожных машин и автобусов это приемлемо, так как увеличение стоимости «растворяется» в общей стоимости ТС, то в случае техники, такой как карьерные самосвалы, СДПМ не применяется из-за широкого требуемого диапазона постоянства мощности.

Мощность тяговых электроприводов не должна быть равна мощности ДВС в обычном ТС. На разгоне тяговый электропривод может работать с кратковременной перегрузкой, так как это относительно небольшое время по отношению к общей длине цикла. Кроме того, следует учитывать, что обычное ТС разгоняется с переключением передач, тратя некоторое время на переключение. Очень редко водитель выводит ДВС в режим номинальной мощности, предпочитая эксплуатировать его с нагрузкой не более 70%. Поэтому

ТС с электроприводом достаточно иметь около 60% от номинальной мощности ДВС при той же динамике за счет неразрывного подвода мощности на колёса.

Однако, с другой стороны, оптимизируя объем тягового электродвигателя, разработчики задаются слишком высокой номинальной скоростью, после которой начинается режим постоянства мощности. Например, в BMW i3 режим постоянства мощности начинается на 60 км в час, что соответствует примерно 2-ой передаче для автомобиля с механической коробкой передач и ДВС. Это приводит к тому, что для обеспечения динамики на низких скоростях двигатель всё такие немного переразмеривают.

### **1.2.2. Оптимизация в области накопителей энергии**

Наибольший простор для оптимизации представляют накопители энергии. Их можно разделить на суперконденсаторы и аккумуляторы, которые различаются, прежде всего, емкостью, рабочими токами заряда/разряда и числом циклов.

Суперконденсаторы имеют относительно низкую удельную емкость и большой допустимы ток заряда/разряда, а также число циклов заряда/разряда без заметной деградации емкости составляет более миллиона. Суперконденсаторы следует применять, если аккумуляторные батареи, которые предполагается устанавливать на ТС не обеспечивают тока, необходимого для разгона или торможения, без существенного снижения характеристик аккумулятора. Кроме того, существуют ТС, где использование тяговых аккумуляторов нежелательно исходя из условий эксплуатации. Например, метрополитен, где в случае неисправности тягового аккумулятора, такого как внутреннее короткое замыкание, возникший пожар приведет к выделению в атмосферу ядовитых газов, что в условиях замкнутого пространства, такого как тоннель, может привести к отравлениям и смерти большого числа пассажиров.

Минимальный объем суперконденсатора следует выбирать исходя из максимального возможного запаса кинетической энергии ТС, которую может

потребуется запастись при торможении. Дальнейшее увеличение объема накопителя должно производиться исходя из цикла использования ТС, однако может оказаться, что масса ТС увеличивается настолько, что это приводит к снижению энергоэффективности перевозки [2].

Аккумуляторные батареи имеют существенно большую ёмкость при том же объеме и позволяют проехать до 500 км и более на одном заряде (автомобиль Tesla). Иногда с целью снижения нагрузки на аккумулятор применяют гибридное решение, когда пики потребляемой мощности покрываются суперконденсатором, а в среднем основную мощность обеспечивает аккумуляторная батарея. Такое решение позволяет увеличить срок службы и эффективность использования аккумулятора.

Определенный прорыв в области аккумуляторов для ТС наметился с изобретением литий-титанатных аккумуляторов. Они сохраняют не менее 80% ёмкости при температуре  $-30^{\circ}\text{C}$  и могут заряжаться до 90% за 10 минут, однако пока они дороги и имеют плотность энергии всего 48 Вт·ч/кг против  $150 \div 180$  Вт·ч/кг у литий-ионных аккумуляторов [2].

### **1.2.3. Зарядка гибридного транспорта и автономные транспортные средства**

Развитие технологий аккумуляторов и суперконденсаторов приводит к изменению роли ДВС в гибридном транспорте. При увеличении ёмкости накопителя он из основного источника энергии может превращаться в аварийный/запасной источник. Так, BMW i3 проходит до 200 км от аккумуляторов и переключается на ДВС. Для автобусов применение суперконденсаторов позволяет обеспечить пробег до 1 км с учетом городского рельефа, стартстопного режима в пробках и среднего расстояния между остановками около 700 метров. Для такого автобуса заряд накопителей можно осуществлять на остановках в процессе высадки и посадки пассажиров. ДВС может пригодиться лишь тогда, когда накопитель по каким-либо причинам

разрядился до прибытия на остановку, например, зимой при простое в пробке с включенной системой отопления.

Для заряда накопителей можно применить один из двух способов: контактную и бесконтактную зарядку. Контактная зарядка имеет недостатки, связанные с необходимостью достаточно точного позиционирования ТС на остановке. Кроме того, проблемы могут быть вызваны неблагоприятными погодными условиями (обледенение, снег) [2].

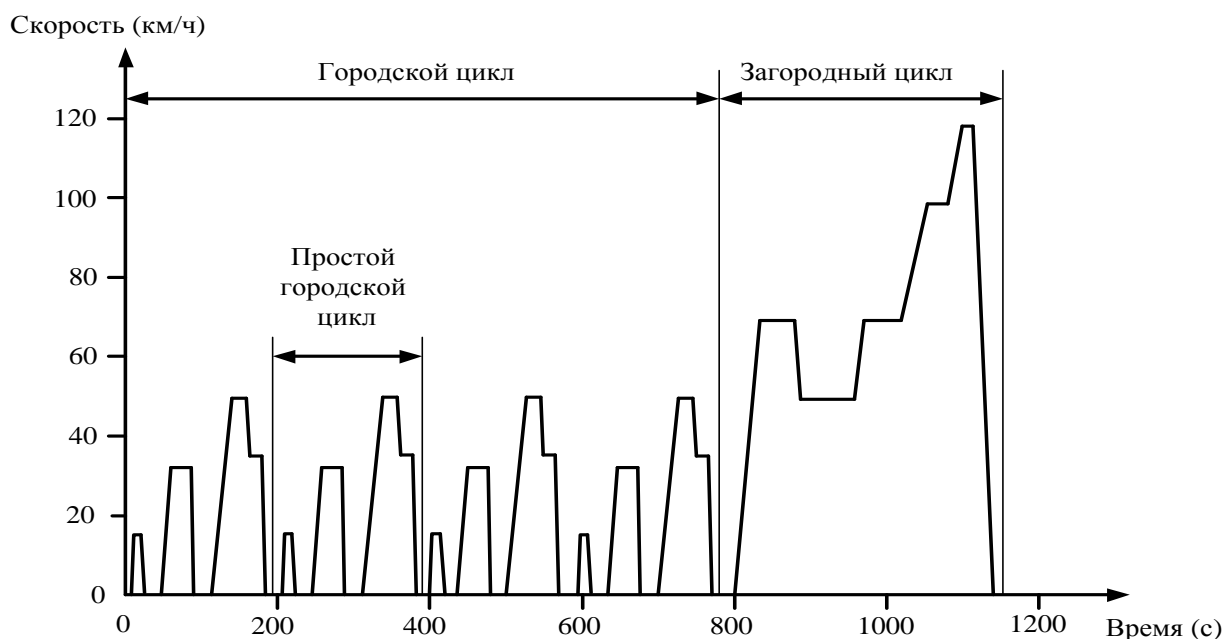
Бесконтактная зарядка имеет преимущества с точки зрения удобства. Принцип работы заключается в том, что под поверхностью дороги размещается индуктор, создающий высокочастотное электромагнитное поле. Электромагнитный приемник расположен под кузовом транспортного средства. Энергия передается по магнитной индукции по воздуху. Таким образом, отсутствует механический контакт между излучателем (кабель под линией) и приемником.

Недостатком этого способа является меньшее значение КПД. Сейчас такие зарядные станции и приемники энергии на стороне ТС активно разрабатываются европейскими компаниями. И хотя излучения, производимые данными устройствами, вписываются в стандарты и «безопасны» для человека, необходимо проводить дальнейшие исследования по влиянию беспроводного способа передачи энергии на здоровье людей не только сейчас, но и в далекой перспективе, на несколько поколений вперед [2].

### **1.3. Требования к модели механической части транспортного средства для оптимизации трансмиссии**

Для определения расхода топлива/электроэнергии ТС используются различные методики, одна из которых является испытание автомобиля по стандартному циклу для испытаний трансмиссий, включающий в себя набор информации для описания движения транспортного средства в реальных условиях.

Сегодня в Европе используется стандартный цикл NEDC (New European Driving Cycle), изображенный на рис. 1.9. Видно, что цикл разбит на две части. Первая часть начинается от 0 до 780 секунд, является городским циклом UDC (Urban Driving Cycle). В нём присутствует четыре простых городских цикла со средней скоростью 18,7 км/ч, и максимальной скоростью 50 км/ч, а затем следует вторая часть, называющаяся загородным циклом со средней скоростью 62,6 км/ч и максимальной скоростью 120 км/ч.



**Рис.1.9. Стандартный цикл NEDC (New European Driving Cycle)**

NEDC используется для сертификации ТС в мире, однако он критикуется за нереалистичность. Так разгон и торможение ТС осуществляется равноускорено, что приближенно соответствует ускорению без переключения передач. Режимы постоянства мощности в цикле нет.

Если же в качестве первичного критерия оптимизации выбрать сохранение привычного цикла движения ТС, то необходимо знать требуемое тяговое усилие в каждый момент его движения. Для определения тягового усилия необходимо определить механическую модель ТС.

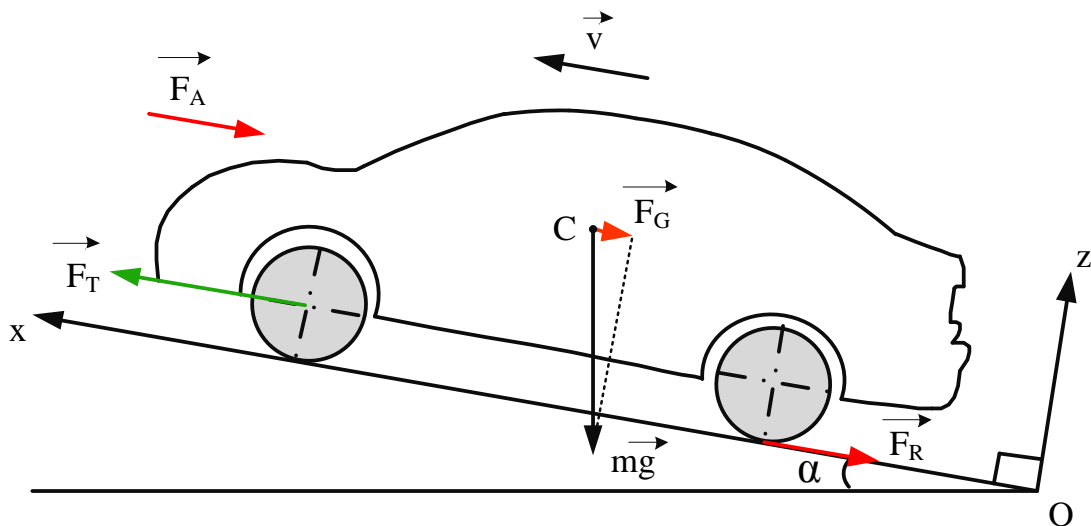
На движущееся ТС действуют следующие силы (рис. 1.10):

- 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  $\alpha$ .



**Рис. 1.10. Внешние воздействия на ТС**

Таким образом, для определения мощности и силы тяги в любой момент времени необходимо знание ускорений и угла уклона дороги. Получение данных величин для реальных траекторий движения будет рассмотрено далее.

#### 1.4. Выводы по главе 1

В главе рассмотрены все виды гибридных электрических ТС и полностью электрических ТС, их преимущества и недостатки. При сопоставлении видов ТС показано, что наиболее перспективными являются гибридные электрические ТС последовательного типа.

Показано, что в целях оптимизации показателей трансмиссии можно изменять характеристики тягового электропривода, генерирующих и накопительных элементов.

Произведен анализ стандартного цикла движения и предложено производить оптимизацию, где первичным критерием будет обеспечение привычного цикла движения традиционного транспортного средства. Вторичным параметром должна стать топливная или энергетическая эффективность.

Для предложенного способа оптимизации сформулированы требования к механической модели транспортного средства и представлен вариант такой модели. Показано, что для исследования работы гибридного ТС необходимо знать тангенциальное и нормальное ускорения и угол наклона дороги в любой момент времени при движении по некоторой траектории для определения мгновенной мощности и моментов на валу тягового электропривода.

Процесс определения реальных траекторий движения ТС будет рассмотрен в следующей главе.



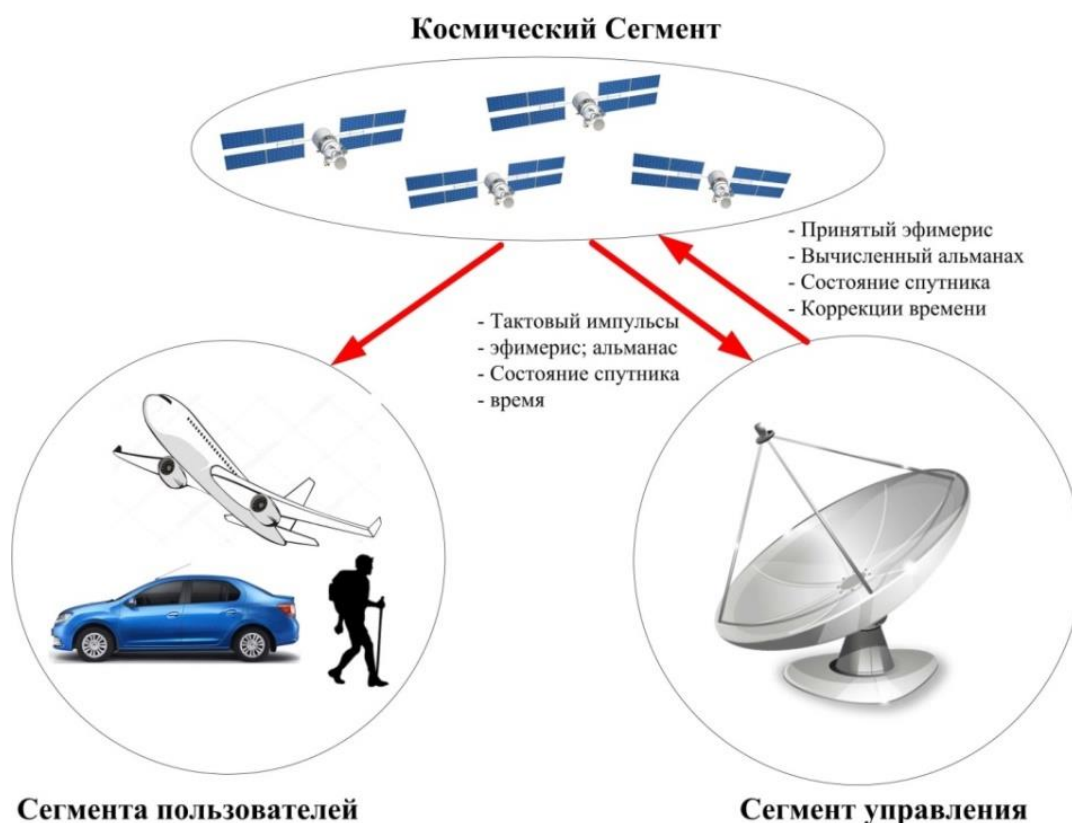
## **ГЛАВА 2. ПОЛУЧЕНИЕ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ ГИБРИДНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С ПОМОЩЬЮ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

### **2.1. Принципы работы навигационных систем GPS и ГЛОНАС. Точностные показатели**

За последние 10-20 лет в мире появляется огромное количество современных технологий и технических новшеств, которые получили широкое распространение и применяются повсеместно. Одной из них является глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС), к которым относятся американская GPS (Global Positioning System) и российская ГЛОНАСС. ГНСС обеспечивается определять географические координаты любого объекта, находящегося над поверхностью Земли в любое время и с высокой точностью путем измерения GPS приёмника расстояний от самого GPS приёмника до четырех спутников GPS в космосе.

Система GPS была запущена Министерством обороны США в начале 1970-ых и использовалась только для военного применения. Через некоторое время она стала доступна для гражданских применений и быстро завоевывает важную роль в жизни в различных областях: от научно-технической до хозяйственной деятельности. Для приема радиосигнала от спутника GPS требуется приемная аппаратура GPS, которая в настоящее время выпускается большим числом компаний. Сегодня GPS-приемниками оборудованы как легковые автомобили, так мобильные телефоны, а общее количество пользователей систем навигации достигает миллиарда[3].

Глобальная навигационная спутниковая система является чрезвычайно сложной технической системой. Полная структура, в состав которой включены три различных сегмента — космический сегмент, сегмент управления и сегмент пользователей — показана на рис. 2.1.



**Рис. 2.1. Структура ГНСС GPS/ГЛОНАСС**

### 1. Космический сегмент

Космический сегмент GPS (рис. 2.2.а) состоит из 24 действующих спутников, облетающих Землю по шести орбитам на высоте приблизительно 20200 км над Земной поверхностью с наклоном в  $55^\circ$  к экватору. В каждой плоскости орбиты находится всегда от четырех до восьми спутников.

Каждый спутник совершает один оборот по своей орбите за 11 час. 58 мин, т.е. ровно половину звездных суток. Из-за вращения Земли каждые 23 часа 58 минут наблюдатель, находящийся в состоянии покоя на поверхности Земли, будет видеть один и тот же спутник в одной точке, пролетающий по небу по одной и той же орбите.

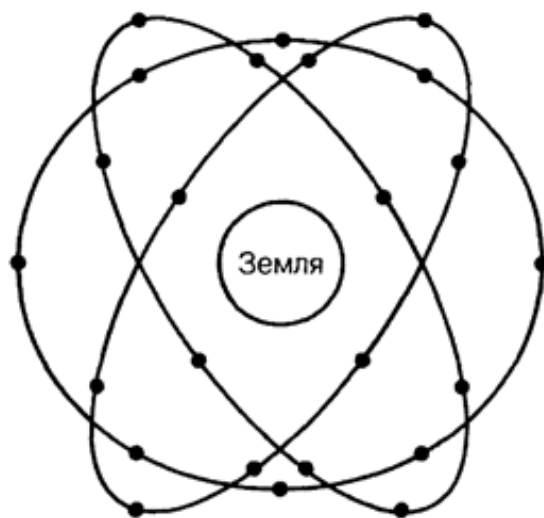
В России (ранее СССР) была разработана своя система ГНСС, называемая глобальной навигационной спутниковой системой (ГЛОНАСС), которая состоит из 24 спутников (рис. 2.2.б). В сравнение с системой GPS эти спутники, распределенные только в трех орбитальных плоскостях с наклоном

$i=64,8^\circ$ . Орбитальные плоскости, находящиеся на высоте приблизительно 19100 км над поверхностью Земли и различаются номинально на  $120^\circ$  по абсолютной долготе восходящего узла. Номинальный период обращения спутника  $T = 11ч.15м. 44с$  [3, 4, 6].

Принцип работы системы ГЛОНАСС аналогичен американской системе навигации GPS. Основное отличие от системы GPS заключается в том, что орбитальная группировка космических аппаратов в системе ГЛОНАСС отличается большей стабильностью, чем в системе GPS из-за отсутствия необходимости синхронизации с вращением Земли. Благодаря этому, она не требует дополнительных корректировок во время эксплуатации на орбите. Кроме того, она обеспечивает большую точность определения координат в полярных районах, где GPS имеет существенно большую погрешность.



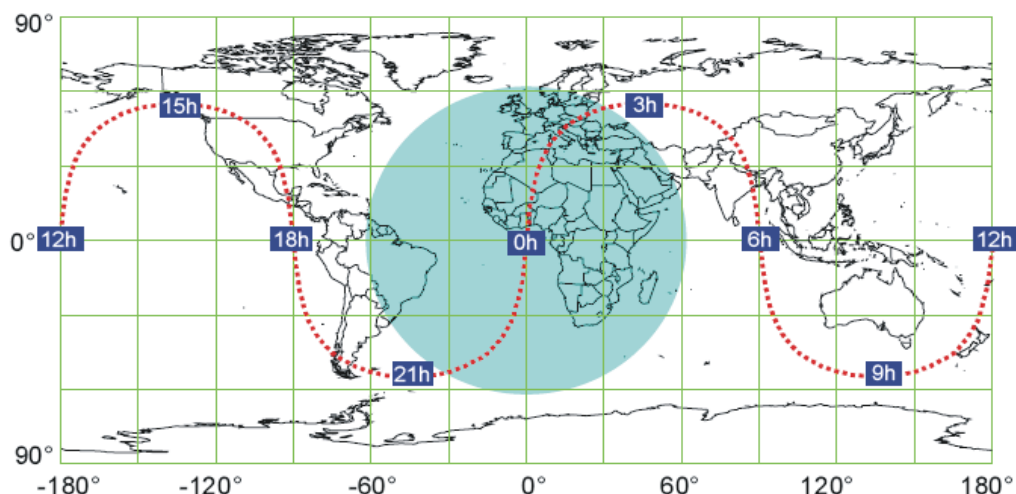
а) Орбитальная структура GPS



б) Орбитальная структура ГЛОНАСС

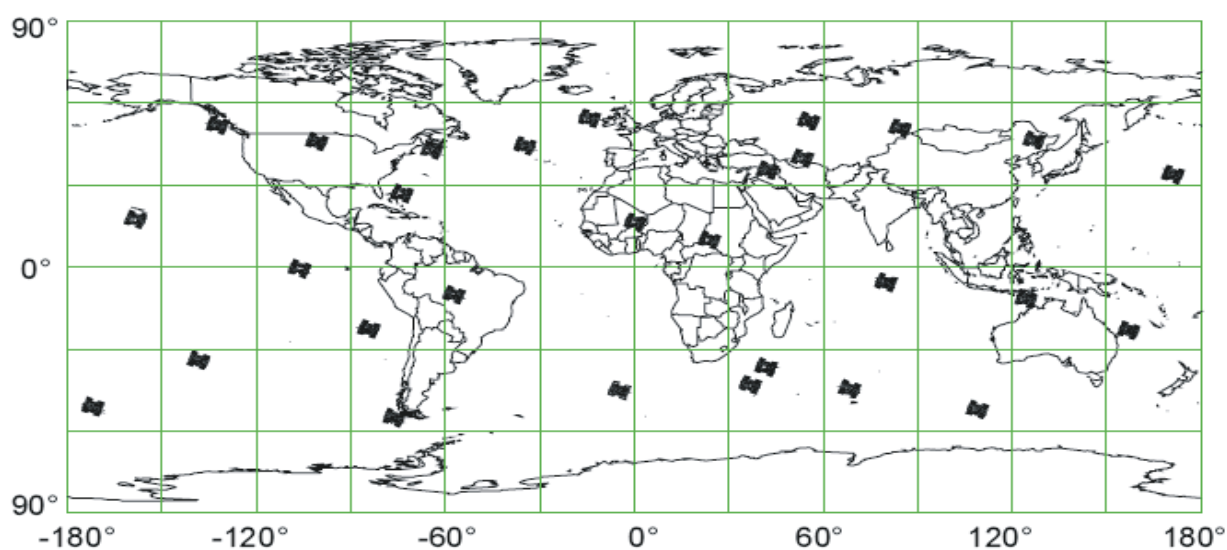
### Рис.2.2. Орбитальная структура ГНСС GPS/ГЛОНАСС

Каждый спутник имеет собственную эффективную зону, в пределах которой спутниковые радиосигналы могут быть услышаны приемниками. На рис. 2.3 изображена эффективная зона спутника (затененный круг).



**Рис. 2.3. Эффективная зона спутника доступна приемникам**

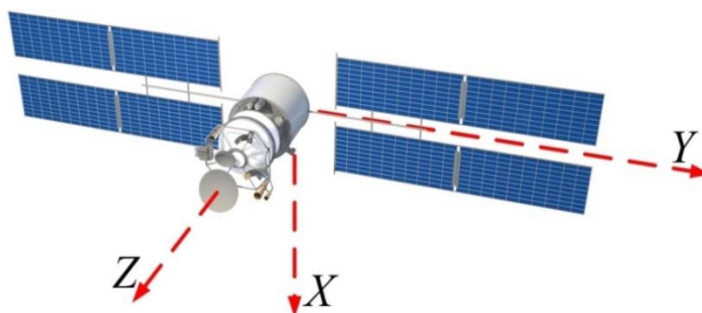
На рис. 2.4. показан пример распределения спутников в космосе, по которому выполняется условие видимости четырех спутников, достаточных для определения координат наблюдателем, находящимся на поверхности Земли, в любой момент времени.



**Рис. 2.4. Пример распределения спутников**

Первый искусственный спутник GPS был выведен на орбиту Земли 22 февраля 1978 г. С тех пор последовательно развивалось несколько новых поколений со сроком службы от 7 до 10 лет, включающих в себя более современные и надежные аппараты. На рис. 2.5 показан общий вид

искусственного спутника GPS. Он содержит панели солнечных батарей, систему антенн, а также систему терморегулирования и другое необходимое оборудование. Панели солнечных батарей играют важную роль в обеспечении питания спутника. Они всегда обращены к Солнцу, и поворачиваются вокруг оси Y. Система антенн направлена оси Z для передачи радиосигнала[3].



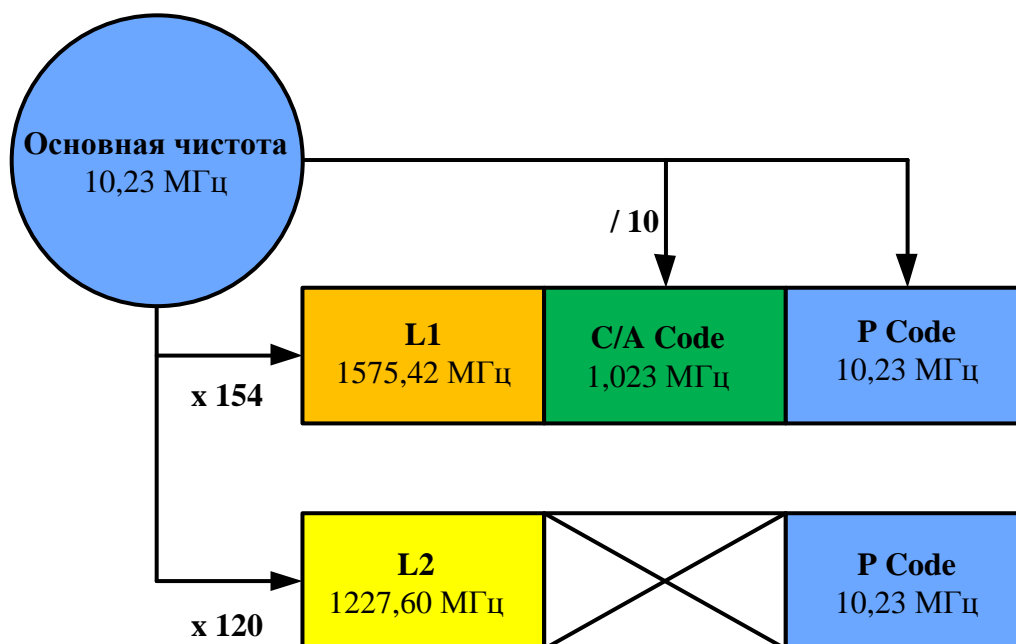
**Рис.2.5. Общий вид искусственного спутника GPS**

Спутниковые сигналы всех спутников системы GPS распространяются к Земле со скоростью света на двух несущих частотах, находящихся в L-полосе. Путем умножения основной частоты можно получать две несущие частоты L1 и L2 частотами 1575,42 МГц и 1227,60 МГц соответственно.

Из таб. 2.1 и рис. 2.6 видно, что несущая частота L1 модулируется как общедоступным кодом C/A (Clear Access/Coarse Acquisition) с частотой 1,023 МГц, так и точным защищенным кодом P с частотой в 10,23 МГц, а несущая частота L2 модулируется только кодом P.

**Таб. 2.1. Компоненты сигнала GPS**

| <b>Назначение</b> | <b>Коэффициент</b> | <b>Частота (МГц)</b> |
|-------------------|--------------------|----------------------|
| Основная частота  | $f_0$              | 10,23                |
| Несущая L1        | $f_1 = f_0 * 154$  | 1575,42              |
| Несущая L2        | $f_2 = f_0 * 120$  | 1227,60              |
| P-код             | $f_0$              | 10,23                |
| C/A-код           | $f_0 / 10$         | 1,023                |
| навигационное     | $f_0 / 204600$     | $50 \cdot 10^{-6}$   |



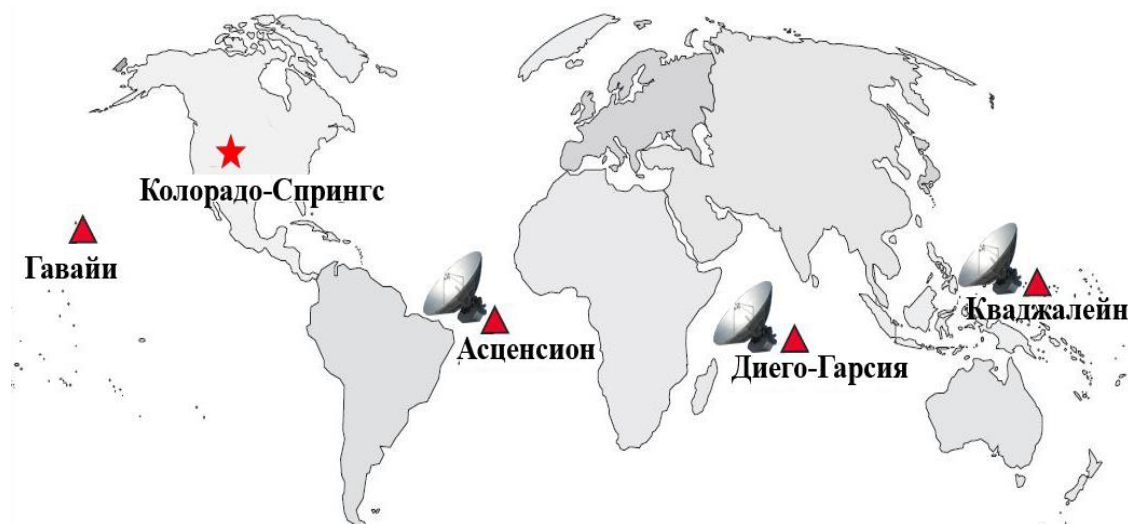
**Рис.2.6. Структурная схема спутникового сигнала GPS**

Каждый спутник обладает своим индивидуальным кодом, по которому приёмнику удастся идентифицировать спутник, от которого передаются радиосигналы. Потом эти коды могут быть применены для измерения псевдодалностей, с помощью которых вычисляется положение наблюдателя.

## **2. Сегмент управления спутниковой системы GPS**

Сегмент управления состоит из одной ведущей станции управления, пяти контрольных станций, три из которых оснащены передающими антеннами, передающими информацию спутникам, равномерно распределенным вокруг земного шара в экваториальных широтах (рис.2.7).

Контрольные станции расположены в Диего-Гарсия, Асценционе, Гавайях, Кваджалейн и последняя станция является ведущей станцией, находящейся в районе г. Колорадо-Спрингс, штат Колорадо. Наземные антенны, передающие информацию спутникам, расположены на станциях Диего-Гарсия, Кваджалейн и Асценсион. Все эти станции работают в автономном режиме и управляются ведущей станцией [3].



**Рис. 2.7. Расположение станций в спутниковой системе управления GPS**

С помощью высокоточных приемников спутниковые сигналы GPS регистрируются на контрольных станциях. Результаты измерения дальностей отсылаются ведущей станции управления в Колорадо-Спрингс, где ошибки в радиосигналах обнаруживаются расчетным путем, прогнозируются параметры орбит, и вычисляются значения корректирующих поправок для часов спутников. Затем эта информация отсылается назад трём контрольным станциям и загружается в спутник наземными антеннами.

Сегмент управления также контролирует искусственные искажения сигналов (Selective Availability), по указанию Министерства обороны США с целью снижения точности определения местоположения для гражданских пользователей путем воздействия на код C/A сигналов GPS. В результате погрешность определения координат значительно снижается, и составляет 50-100 м. Но такой режим был отключен в мае 2000 года, хотя его можно запустить снова при необходимости.

Сегмент управления системы ГЛОНАСС содержит: центр управления, центральный синхронизатор, командную станцию слежения, контрольные станции, и разные системы. Его принцип работы и задачи аналогичны сегменту управления GPS. Расположение станций сегмента управления ГЛОНАСС показано на рис.2.8 [5]



**Рис.2.8. Расположение станций сегмента управления ГЛОНАСС**

### **3. Сегмент пользователей**

Сегмент пользователей представляет собой совокупность потребителей навигационной услуги, приёмников навигационного сигнала, способных принимать сигналы GPS, обрабатывать их, измерять и вычислять навигационные параметры: псевдодальность и псевдоскорость; вычислять геоцентрические координаты, переводить их в геодезические координаты, вектор скорости и высоту над поверхностью Земли; находить поправку к местной шкале времени относительно системного времени.

#### **2.1.1. Принцип работы навигационных систем GPS/ГЛОНАСС**

Принцип, по которому работает система GPS для определения координат объекта на Земной поверхности, построен на измерении системами расстояний до доступных искусственных спутников, движущихся по определенным орбитам в космосе. Для этого спутники выполняют роли исходных точек. Расстояния между приёмником и каждым спутником можно вычисляться по простой формуле:

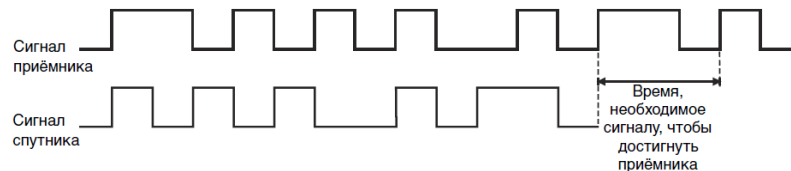
$$\rho = c \cdot \tau, \quad (2.1)$$

где  $c$  — это скорость прохождения радиосигнала. Радиоволны



распространяются со скоростью света (299 792 458 м/с);  $\tau$  — это время, затраченное радиосигналом на прохождение от спутника до GPS приёмника

Основная проблема при измерении времени прохождения радиосигнала GPS заключается в трудности определения точного момента времени, в который радиосигнал спутника начинается излучаться. Вышеописанную проблему можно решить путем синхронизации атомных часов спутников и часов приёмника для того, чтобы одновременно они генерировали одну и ту же кодовую последовательность в одно и то же время (C/A код). После чего, сравнив время их рассогласования можно вычислить время, затрачиваемое радиосигналом на прохождение от спутника до GPS приёмника (рис.2.9).



**Рис. 2.9. Вычисление время, затрачиваемое радиосигналом на прохождение от спутника до GPS приёмника**

Предположим, что в момент времени  $t_C$  спутник излучает радиосигнал, а через время  $t_{II}$  фронт этого радиосигнала достигает приемника. Следовательно, время  $\tau$  в формуле (2.1) можно вычислять по разности:  $\tau = t_{II} - t_C$ . Но эта разность дает правильный результат только, когда  $t_{II}$  и  $t_C$  имеют одинаковое начальное время отсчета. Однако излучаемые сигналы формируются по атомным часам, установленными на спутнике. Они исключительно точные, но и дорогие, а прием сигнала производится обычными кварцевыми часами приемника. Они не так совершенны, как атомные и не вполне синхронизированы с единым временем системы. Из-за этого возникают рассогласование часов спутника и приёмника.

Обозначим,  $\delta_{II}$  и  $\delta_C$  — поправки времени, которые необходимо добавить соответственно к значениям  $t_{II}$ ,  $t_C$  для получения времени по эталонной шкале,

которая называется системной шкалы GPS. Тогда формула (2.1) имеет вид:

$$\rho = c[(t_{\Pi} + \delta_{\Pi}) - (t_C + \delta_C)] = c(t_{\Pi} - t_C) + c(\delta_{\Pi} - \delta_C) = R + c\Delta\delta, \quad (2.2)$$

или

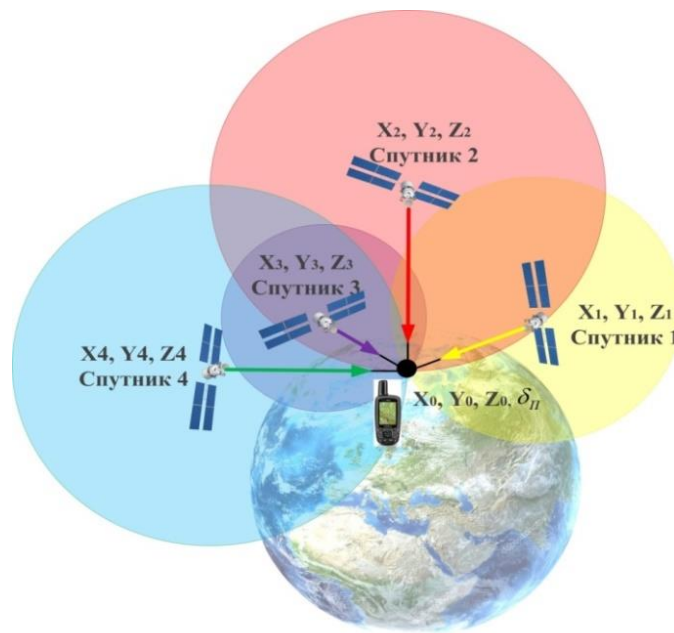
$$R = \rho - c\Delta\delta = \sqrt{(X_i - X_0)^2 + (Y_i - Y_0)^2 + (Z_i - Z_0)^2} - c(\delta_{\Pi} - \delta_C), \quad (2.3)$$

где  $R$  — расстояние от приемника пользователя до спутника, которое называется «псевдодальность» и вычисляется по форме:

$$R = c(\delta_{\Pi} - \delta_C), \quad (2.4)$$

$X_i, Y_i, Z_i$  — координаты  $i$  — спутников (где  $i = 1, 2, 3, 4$ ) и  $\delta_C$  — поправка времени каждого спутника, определяющаяся сегментом управления GPS, от которого прогнозируемые параметры орбит спутников передаются к потребителям вместе с измерительными сигналами.

Система уравнения (2.3) называется системой основных уравнений для решения навигационной задачи. Решив (2.3) с четырьмя источниками сигналов будет найдены определяемые координаты  $X_0, Y_0, Z_0$  и  $\delta_{\Pi}$ .



**Рис. 2.10. Спутника необходимы для определения позиции в трехмерном пространстве**

На рис. 2.10 показан принцип работы системы GPS. Приемник GPS, находящийся на Земле, измеряет время, затрачиваемое радиосигналом на прохождение от спутника до GPS приёмника, умноженное на скорость прохождения радиосигнала (скорость света). В результате, получено расстояние от приемника пользователя до спутника. Для получения данных о местоположении пользователя (координат  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  или широту  $\varphi$ , долготу  $\lambda$ , высоту  $h$  и время  $t$ ) приемник должен увидеть четыре спутника (допускается и три спутника, но ошибка при этом увеличивается). Точка пересечения четырёх воображаемых сфер с радиусами, равными расстоянию до каждого из спутников, и с центрами, совпадающими с видимыми спутниками, определяет местоположения пользователя.

### 2.1.2. Источники ошибок

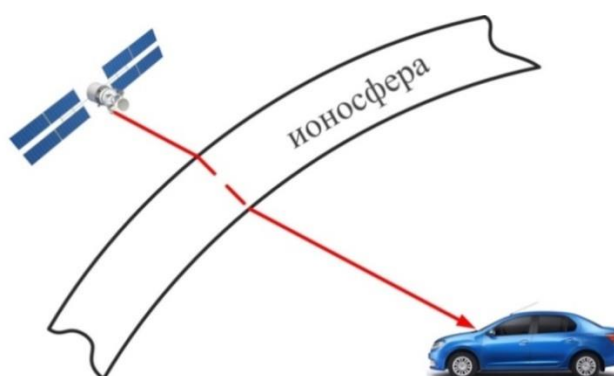
В реальных условиях на точность определения координат потребителя существенное влияние оказывают множество факторов, воздействующих на результаты измерений псевдодальностей, изображенные на рис. 2.11.



**Рис. 2.11. Источники погрешностей**

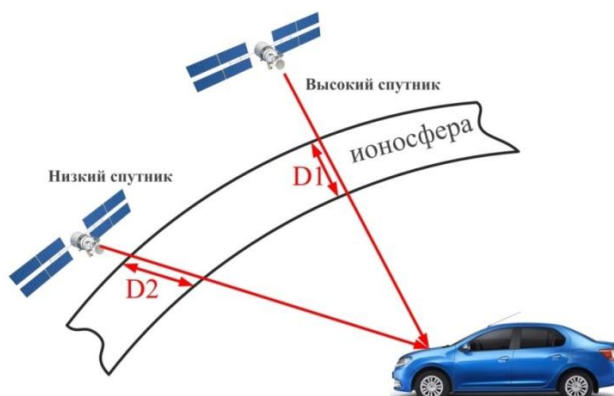
Под воздействием космического излучения (прежде всего солнечного) в слое ионосферы образуются свободные электроны и ионы, уменьшающие скорость распространения радиоволн при прохождении через нее. Эффект выглядит подобно преломлению луча света, который проходит через стекло (рис.2.12). Замедление зависит от концентрации электронов. Основной

проблемой при компенсации ионосферной задержки является тот факт, что её значение сильно зависит от географического положения, температуры, давления, влажности воздуха, солнечной и геомагнитной активности, и особенно от времени суток и года. Например, ночью влияние ионосферы весьма низкое, время запаздывания может составлять 10 нс (3м). Днём солнце увеличивает воздействие ионосферы и замедляет сигнал, время запаздывания может достигать до 50 нс.



**Рис. 2.12. Ионосферные задержки**

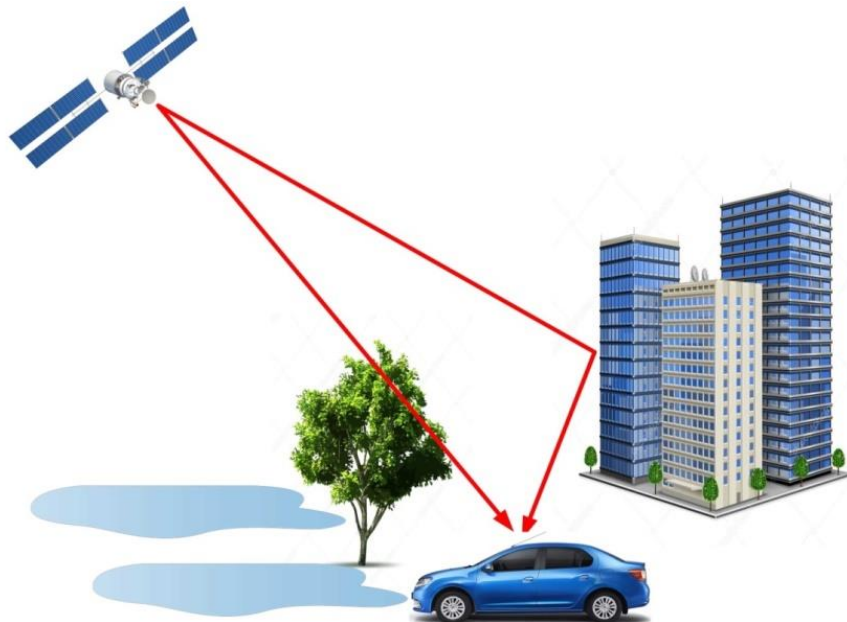
Значение задержки сигналов спутников, находящихся низко над горизонтом, может возрасти в несколько раз по сравнению со случаем, когда спутник находится в зените из-за увеличения расстояния прохождения сигнала через атмосферу (рис. 2.13). Для спутников, расположенных в зените, тропосферная задержка сигнала может составлять 7 нс (2м), и до 83 нс (25м) для спутников, находящихся под углом к горизонту меньше  $5^{\circ}$ .



**Рис. 2.13. Влияние расположения спутника на величину задержки сигналов спутников**

Ионосферные задержки необходимо учитывать, если требуется достичь точности определения координат менее 8 м. Определение и учет значения ионосферной задержки может осуществляться несколькими методами: методом моделирования трассы, методом двухчастотных измерений и методом избыточных одночастотных измерений.

В реальных условиях на вход антенны приёмника поступают кроме радиосигналов со спутника, радиоволны, переотраженные от местных предметов (здания, земной и водной поверхности, деревьев и т.п.). Это явление называется многолучевостью. На рис. 2.14 изображено явление переотражения радиосигнала в городских условиях.



**Рис. 2.14. Явление переотражения радиосигнала**

В городских условиях, в окружении высотных зданий, величина погрешности может достигать 50 м и более. Для снижения погрешности можно поднять антенну приемника на максимально возможную высоту или использовать сигналы высокой точности с помощью специальных GPS антенн, со встроенным защитным экраном для предотвращения приёма отраженных сигналов (рис. 2.1.5).



**Рис. 2.15. Антенна Choke-Ring (кольцевой дроссель)**

Переотражение учитывается только при высокоточных измерениях, таких, например, как геодезические измерения. Простые карманные навигационные приёмники не используют методы фильтрации переотражённых сигналов.

### 2.1.3. Точность системы GPS/ ГЛОНАСС

Суммарное значение погрешности GPS/ГЛОНАСС получается в результате суммирования всех погрешности от различных источников, рассмотренных выше. Типовая погрешность гражданской приемной аппаратуры составляет приблизительно 1,5-10 м для системы GPS и 5-15 м для системы ГЛОНАСС. Как правило, значение погрешности возникает в результате расхождения между фактическим положением навигационного спутника и его расчетным положением и не превышает 3 м для системы GPS и 5,3 м для системы ГЛОНАСС. В таб. 2.2 приведены источники ошибок и их погрешности.

Табл. 2.2. Общий набор погрешностей определения псевдодальности [7]

| Источник погрешности            | GPS | ГЛОНАСС |
|---------------------------------|-----|---------|
| Ошибки эфемеридного обеспечения | 2,5 | 2,6     |
| Нестабильность часов спутника   | 2   | 2       |
| Влияние ионосферы               | 5   | 4       |
| Влияние тропосферы              | 0,5 | 0,5     |
| Многолучевость                  | 1   | 2,5     |
| Ошибки, связанные с приемником  | 1   | 1,5     |
| Прочие                          | 2   | 2       |

В зависимости от метода измерения точность определения координат

наблюдателя с использованием системы GPS/ГЛОНАСС может достигать значений от 100 м до единиц миллиметров. По используемому наземному оборудованию эти методы могут быть разделены на три основных класса [3]:

- Первый класс: Дифференциальное координирование (DGPS- Differential GPS). В этом режиме используются два приемника: один на опорной станции с определенными координатами, и другой (приемник пользователя) на местности. По радиоканалу корректирующие поправки от опорной станции передаются приемнику, где выполняется коррекция координаты. Благодаря этому точность определения координат может достигать 0,5-5 м.

- Второй класс: Автономная навигация, в которой используется единственный приёмник (карманный GPS приёмник) для мгновенного получения координат и высоты. В этом случае точность определения координат может быть выше 100 м для гражданских потребителей и приблизительно 20 м для военных потребителей.

- Третий класс: Дифференциальные фазовые измерения используются для определения координат объектов с высокой точностью (около 0,5 – 20 мм). Эти методы обычно применяются при решении задач навигации или геодезических работ.

Табл. 2.3. Интегральные погрешности определения псевдодалности при использовании дифференциального режима [7]

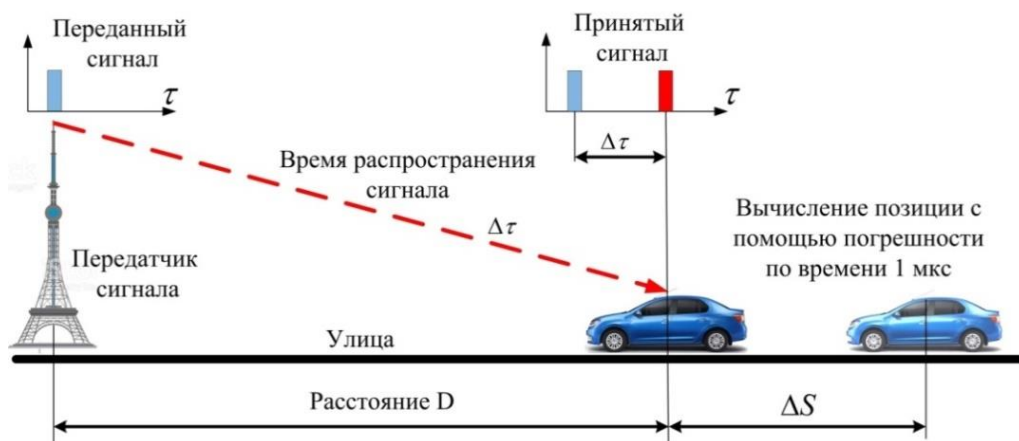
| Источник погрешности       | GPS без-дифференциального режима (м) | Дифференциальный режим GPS (м) | Дифференциальный режим ГЛОНАСС (м) |
|----------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|
| Ошибки эфемериды           | 5-20                                 | 0-1                            | 0                                  |
| Погрешность часов спутника | 3                                    | 0                              | 0,7                                |
| Ионосферные погрешности    | 15-20                                | 2-3                            | 0,5                                |
| Тропосферы погрешности     | 3-4                                  | 1                              | 0,5                                |
| Многолучевость             | 2                                    | 2                              | 1,4                                |
| Шумы в приемнике           | 2                                    | 2                              | 0,6                                |

Использование DGPS (Differential GPS) позволяет точность определения псевдодальности достигать десяти метров. Данная погрешность не зависит от типа приемника, искусственных искажений сигналов (Selective Availability), а зависит только от расстояния между опорной станцией и приемником пользователя. В таб. 2.3 приведены достижения дифференциального режима.

## 2.2. Определение координат средствами мобильных навигационных систем

Предполагаем, что по длинной и прямолинейной дороге движется автомобиль, в котором установлен приемник GPS. В конце улицы существует неподвижный радиопередатчик, посылающий тактовый импульс каждую секунду (рис.2.16). Для уменьшения погрешности измерения необходимо синхронизировать часы приемника и часы радиопередатчика. Значит, они должны работать в одной и той же шкале времени. Положение этого автомобиля определяется измерением времени распространения сигнала  $\Delta\tau$  от передатчика до автомобиля.

Скорость распространения радиосигнала достаточно близка к скорости света. Тогда расстояние  $D$  можно вычислять по формуле:  $\rho = c \cdot \Delta\tau$



**Рис. 2.16. Расстояние определяется с помощью радиопередатчика**

Основной проблемой такого метода является трудность синхронизации часов приемника с передатчиком. Если между ними возникает расхождение

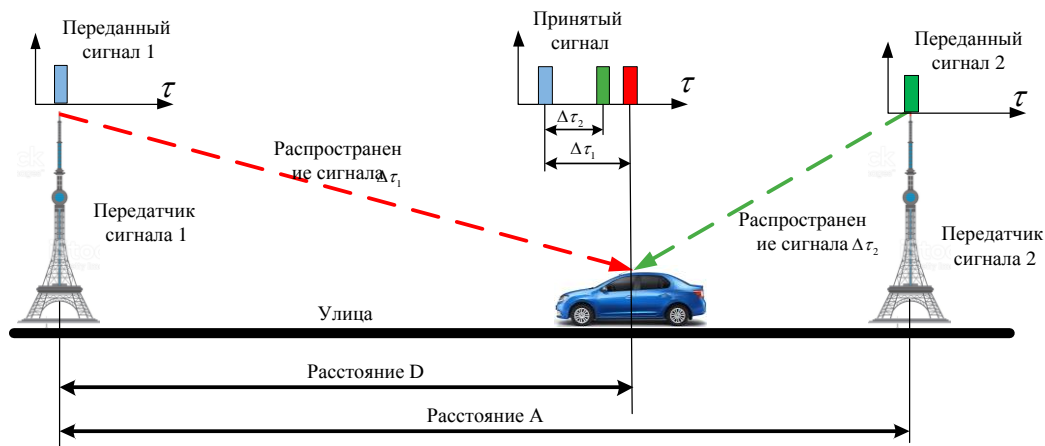


шкал времени даже на 1 микросекунду (1 мкс), то измерение расстояния будет произведено с ошибкой в 300 м. В результате существует разница между вычисленным расстоянием и фактическим.

Для решения данной проблемы используют второй передатчик, расстояние между которыми известно. Измеряя оба времени распространения от двух передатчиков до автомобиля, можно определить положение автомобиля с высокой точностью по формуле (2.5), несмотря на неточные бортовые часы.

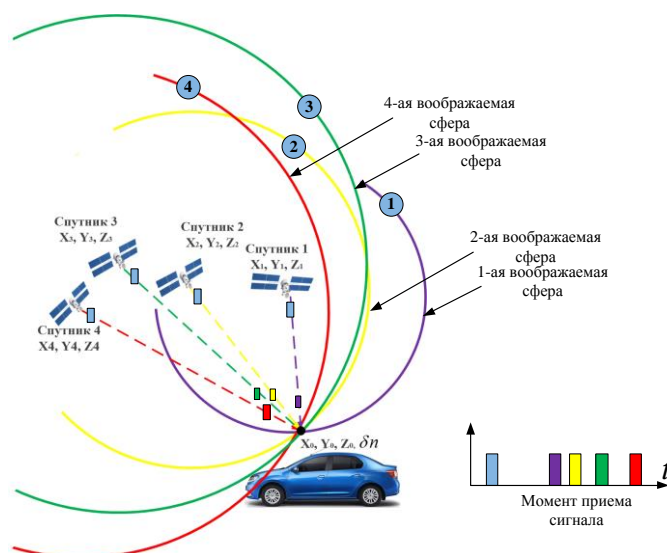
$$D = \frac{(\Delta\tau_1 - \Delta\tau_2)c + A}{2}, \quad (2.5)$$

где  $\Delta\tau_1, \Delta\tau_2$  — времена распространения сигнала, соответственно от передатчиков сигнала 1 и 2.



**Рис. 2.17. Вычисление точной позиции с двумя передатчиками**

На рис.2.17 видно, что с помощью двух передатчиков, можно определить время и позицию автомобиля вдоль улицы только по одной координате ОХ. Для определения положения автомобиля ещё по координате ОУ, а для определения высоты потребуется четвертый датчик (рис. 2.18).



**Рис. 2.18. Системы спутниковой навигации необходимы для определения координат автомобиля**

### 2.3. Разработка программного обеспечения записи GPS-трека движения транспортного средства

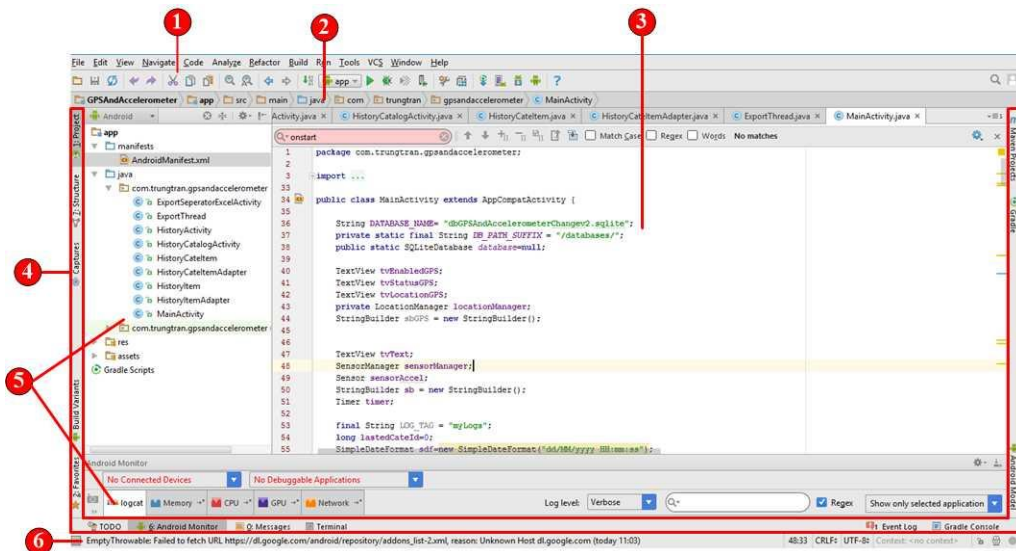
Современные смартфоны (например, под управлением операционной системы Android) могут предоставить пользователю данные определения положения по GPS спутникам с помощью встроенного чипа GPS. При разработке приложений для платформы Android удобно использовать язык программирования Java, который является мощным и открытым языком.

Разработку Android-приложений можно выполнять как в среде Eclipse, так и в среде Android Studio. За последние годы Android Studio стала самой распространённой средой разработки и наиболее часто используется как опытными программистами, так и начинающими. Среда Android Studio, выпущенная Google в 2013 году, является официальной интегрированной средой разработки (IDE) для разработки приложений под Android платформы. На рис. 2.19 показано главное окно Android Studio.

В среде Android Studio версии 1.4.1 был создан проект под названием «GPSAndAccelerometer», который имеет следующие свойства:

- Project name (Имя проекта): GPSAndAccelerometer

- Build Target (Операционная система): Android 4.0
- Application name (Имя приложения): GPSAndAccelerometer
- Package name (Название пакета): com.trungtran.gpsandaccelerometer
- Create Activity (Создать активности): MainActivity



**Рис. 2.19. Главное окно Android Studio**

1. **Панель инструментов** позволяет выполнять спектр действий, включая запуск приложения и запуск инструментов Android.

2. **Панель навигации** позволяет перемещаться по проекту и открывать файлы для редактирования. Она обеспечивает более компактный вид структуры, видимой в окне проекта.

3. **Окно редактора**, в котором можно создать и изменять код. В зависимости от текущего типа файла редактор может изменяться.

4. **Панель инструментов** содержит кнопки, которые позволяют развернуть или свернуть отдельные окна инструментов.

5. **Окна инструментов** предоставляют разработчикам доступ к определенным задачам, таким как, управление проектами, поиск, контроль версий и многое другое.

6. **Строка состояния** отображает статус вашего проекта и самой IDE (интегрированная среда разработки), а также предупреждения или сообщения компилятора или среды.

Кроме среды Android Studio, необходимо настроить программное обеспечение, требуемые для разработки приложений под Android: JDK (Java Development Kit), Android SDK (Software Development Kit), ADT (Android Development Tools). Основным компонентом из них является Android SDK, в состав которого включены разнообразные библиотеки, документация и инструменты, используемые для разработки, тестирования и отладки приложений.

В Android SDK все классы и интерфейсы по работе с навигационными системами для получения и использования данных о местоположении объединены в пакет **android.location**, в который входят следующие компоненты: класс **LocationManager**, интерфейс **LocationListener**, класс **Location**.

Для получения доступа к аппаратному обеспечению, отвечающему за геолокационные сервисы, необходимо создать файл манифеста **AndroidManifest.xml**, который содержит один или несколько пользовательских полномочий (uses-permission), приведённый в лист. 2.1[10, 13].

Лист. 2.1. Файл AndroidManifest.xml

```
package="com.trungtran.gpsandaccelerometer">
<uses-permission
android:name="android.permission.ACCESS_FINE_LOCATION" />
<uses-permission
android:name="android.permission.ACCESS_COARSE_LOCATION" />
```

При инициализации активности (**activity**) приложения в первую очередь Android вызывает метод **onCreate()**, в котором определяются необходимые TextView-компоненты и выполняется доступ к системной службе определения местоположения **LocationManager**.

В лист. 2.2 показаны три TextView-компонента: tvEnabledGPS, tvStatusGPS и tvLocationGPS, которые определяются в методе **onCreate()**.

## Лист. 2.2. Создание разметки пользовательского

```
protected void onCreate(Bundle savedInstanceState) {
    super.onCreate(savedInstanceState);
    setContentView(R.layout.activity_main);
    tvEnabledGPS = (TextView) findViewById(R.id.tvEnabledGPS);
    tvStatusGPS = (TextView) findViewById(R.id.tvStatusGPS);
    tvLocationGPS = (TextView) findViewById(R.id.tvLocationGPS);
    locationManager = (LocationManager)
    getSystemService(LOCATION_SERVICE);
}
```

В данном приложении метод **onResume()** вызывается для создания потока **locationListener** с помощью метода **requestLocationUpdates**. Прежде чем вызывать такой метод, необходимо проверить наличие разрешений в файле манифеста. Однако в любом случае при отсутствии необходимых разрешений работа с навигационной системой должна быть завершена до регистрации объекта **LocationListener**. В лист. 2.3 проводится код метода **onResume()**.

## Лист. 2.3. Метод onResume()

```
protected void onResume() {
    super.onResume();
    if (ContextCompat.checkSelfPermission(MainActivity.this,
    Manifest.permission.ACCESS_FINE_LOCATION) != PackageManager.
    PERMISSION_GRANTED &&
    ContextCompat.checkSelfPermission(MainActivity.this,
    Manifest.permission.ACCESS_COARSE_LOCATION) != PackageManager.
    PERMISSION_GRANTED)
    {
        return;
    }
    locationManager.requestLocationUpdates(LocationManager.
    GPS_PROVIDER, 0, 1, locationListener);
}
```

Как показано в лист. 2.3 метод **requestLocationUpdates** включает в себя несколько аргументов, четыре из которых необходимо рассмотреть:

1. Первый аргумент: Поставщик данных о местоположении. В библиотеке Android существует всего два типа источников данных **GPS\_PROVIDER** и **NETWORK\_PROVIDER**. GPS предоставляет доступ к глобальной системе определения местоположения для получения данных о местонахождении устройства, и NETWORK позволяет использовать для определения местоположения сотовую сеть или WiFi. Для этого телефон должен быть подключен к интернету. В данном приложении используется только источник **GPS\_PROVIDER**.

2. Второй аргумент: Минимальный интервал между получением данных о местоположения в миллисекундах. Значение «0» соответствует использованию минимально возможного интервала времени для данного устройства. В действительности данные приходят не чаще одного раза в секунду.

3. Третий аргумент: Минимальное расстояние, пройденное в период времени, соответствующий изменению положения в метрах. Значение «1» соответствует использованию минимально возможного расстояния для данного устройства. Т.е. если местоположение изменилось на 1 метр, новые координаты будут получены.

4. Четвертый аргумент: Регистрируемые объекты потока **LocationListener**, код которых приведён в лист. 2.4, предназначены для получения обновленной информации об изменении местоположении устройства, если изменяется физическое местоположение устройства либо изменяется статус и доступность потока положения. Объекты **LocationListener** имеют следующие основные методы:

- Метод **onLocationChanged** вызывается в том случае, если значения минимальных интервала и расстояния изменятся. В разработанном приложении минимальные значения времени и расстояния были выбраны значениями соответственно 0 и 1. Это означает, что **LocationManager** должен присылать новые значения о местоположении сразу же по мере их поступления, и с помощью метода **showLocation** текущие географические координаты будут отображены на экране смартфона.

- Метод **onProviderDisabled** вызывается, когда пользователь отключается от потока. В этом методе вызываем метод **checkEnabled** для того, чтобы обновить текущие статусы потоков. Если поток был отключен, то на экране показан статус **false**.

- Метод **onProviderEnabled** обозначает, что пользователь получает доступ к потоку данных о местоположении. Если поток был включен, то на экране отображается статус **true**. При вызове **getLastKnownLocation** возвращается

экземпляр **android.location.Location**. Класс **Location** дает последнее известное местоположение, которое было определено во время предыдущего «захвата» GPS и отображает его на экран смартфона. Во многих случаях значения координат могут быть неактуальными, если устройство долго не обновляло текущую позицию.

- Метод **onStatusChanged** «отвечает» за изменения состояния в статусе потока данных о местоположении. В поле **status** (статус) могут быть значения **OUT\_OF\_SERVICE** (если поток не работает, и это не ожидается в ближайшем будущем), **TEMPORARILY\_UNAVAILABLE** (поставщик временно недоступен, но ожидается, что он будет доступен в ближайшее время), **AVAILABLE** (поставщик в настоящее время доступен). В этом методе просто выводим новый статус на экран.

Лист. 2.4. Слушатель **locationListener**, применяемый для прослушивания изменений локации объекта

```
private LocationListener locationListener = new
LocationListener() {
    @Override
    public void onLocationChanged(Location location) {
        showLocation(location);
    }
    @Override
    public void onProviderDisabled(String provider) {
        checkEnabled();
    }
    @Override
    public void onProviderEnabled(String provider) {
        checkEnabled();
        if (ContextCompat.checkSelfPermission(MainActivity.this,
Manifest.permission.ACCESS_FINE_LOCATION) != PackageManager.PERMISSION_GRANTED && ContextCompat.checkSelfPermission
(MainActivity.this, Manifest.permission.ACCESS_COARSE_LOCATION) !=
PackageManager.PERMISSION_GRANTED)
            {return;
            }
        showLocation(locationManager.getLastKnownLocation(provider));
    }
    @Override
    public void onStatusChanged(String provider, int status,
Bundle extras) {
        if (provider.equals(LocationManager.GPS_PROVIDER)) {
            tvStatusGPS.setText("Status: " + String.valueOf(status));
        }
    }
};
```

Метод **formatLocation** вызывается для того, чтобы читать выбранные значения географических координат, именно: `getLatitude` — широта, `getLongitude` — долгота, `getAltitude` — высота, `getSpeed` — скорость из объектов **Location** и формировать из них строку. Значения широты и долготы взяты с точностью до 6 знаков после запятой, а значение высоты и скорости — до двух знаков после запятой. В лист. 2.5 приведено содержимое метода **formatLocation**.

Лист. 2.5. Формат значения географических координат

```
private String formatLocation(Location location) {
    if (location == null)
        return "";
    return String.format(
        "%1$.6f\t\t %2$.6f\t\t %3$.2f\t\t %4$.2f ",
        location.getLatitude(), location.getLongitude(),
        location.getAltitude(), location.getSpeed());
}
```

Данные по текущему местоположению обновляются каждую секунду с помощью класса **Time**, который выполняет одну задачу типа **TimerTask** и отображают на экране смартфона. В лист. 2.6 представлен код для ежесекундного обновления данных.

Лист. 2.6. Коды для ежесекундного обновления данных

```
timer = new Timer();
TimerTask task = new TimerTask() {
    @Override
    public void run() {
        runOnUiThread(new Runnable() {
            @Override
            public void run() {
                showInfo();
            }
        });
    }
};
timer.schedule(task, 0, 1000);
```

Так как всем приемникам GPS, встраиваемым в смартфоны и в другие устройства в рабочем режиме требуются значительные энергозатраты, то с целью экономии батареи их необходимо минимизировать путем отключения обновления информации о местоположении с помощью метода **onPause()**.



Метод **onPause()** является последним методом, который будет вызываться перед тем, как система завершит работу приложения. Он позволяет сохранить информацию в базе данных приложения. В лист. 2.7 показаны коды метода **onPause()**.

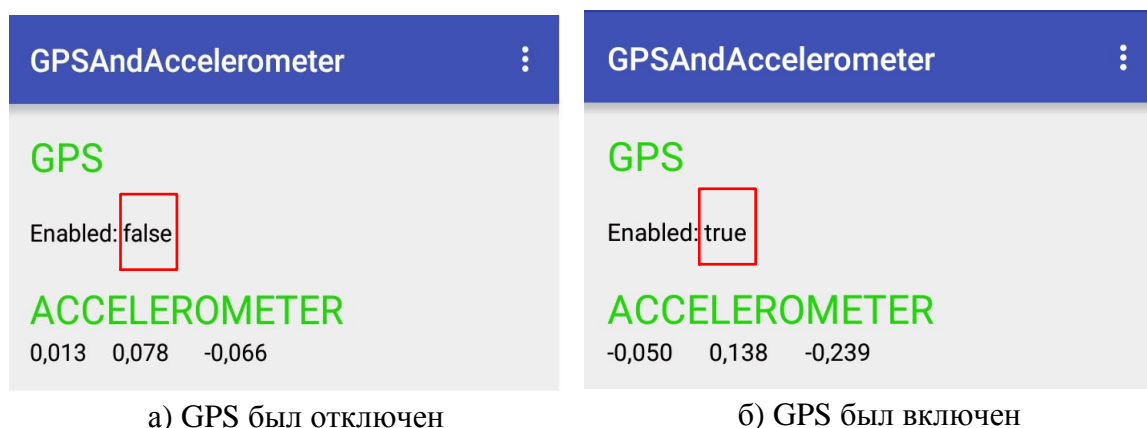
Лист. 2.7. Метод **onPause()** позволит сохранить пользовательские настройки и подготовить к прекращению взаимодействия с пользователем

```
protected void onPause() {
    super.onPause();
    if (ContextCompat.checkSelfPermission(MainActivity.this,
Manifest.permission.ACCESS_FINE_LOCATION) != PackageManager.
PERMISSION_GRANTED &&
ContextCompat.checkSelfPermission(MainActivity.this,
Manifest.permission.ACCESS_COARSE_LOCATION) !=
PackageManager.PERMISSION_GRANTED )
    {
        return;
    }
    locationManager.removeUpdates(locationListener);

    sensorManager.unregisterListener(listener);
    timer.cancel();
}
```

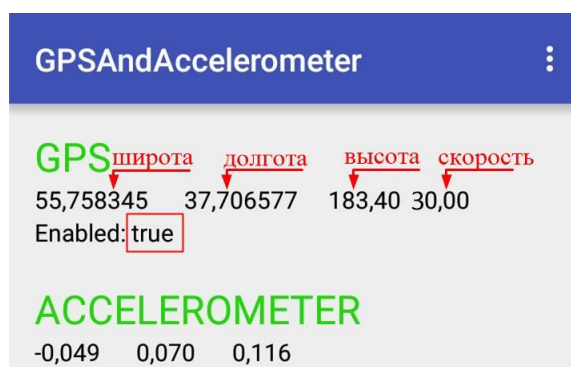
Для приема сигналов от спутниковой системы GPS, как рассказано в разделе 2.1.1, смартфон (устройство приемника) должен находиться в зоне, где можно принимать сигналы от спутников. Для этого надо выйти на улицу и подождать несколько секунд, необходимых для поиска и приема сигнала GPS смартфоном. После того на экране появятся значения широты, долготы, высоты и скорости, которые обновляются каждую секунду, и состояние потока (рис. 2.21).

На рис. 2.20 показано состояние доступа к потоку **GPS\_PROVIDER**. Если GPS был отключен, то на экране показан статус «false» (рис а), а если GPS был включен, то на экране показан статус «true» (рис б).



**Рис. 2.20. Состояние доступа к провайдеру GPS\_PROVIDER**

После чего, когда статус равен «true», подтверждающий соединение с GPS успешно на экране появляются и географические координаты: широта, долгота, и высота над уровнем моря, и скорость движения объекта, которые обновляются каждую секунду как показано на рис. 2.21.



**Рис. 2.21. Географические координаты, полученные от GPS**

В отличие от других подобных приложений GPS (например: Геотрекер, Runstastic Road Bike PRO GPS...) в магазине Google Play, данные GPS которых обычно сохраняются в GPX (или KML, KMZ) – файлах, читающихся только картографическими программным обеспечением, являющимися платными и дорогими, приложение «GPSAndAccelerometer» сохраняет данные в Excel-файлах, которые можно открыть с помощью обычного программного обеспечения Microsoft Office Excel, созданного корпорацией Microsoft и можно продолжать работать с этими данными.

Для удобства исследования данных GPS приложение «**GPSAndAccelerometer**» дает три способа сохранений данных в Excel–файлах (рис. 2.22):

1. Export Selected Scan to Excel: Экспорт выбранного сканирования в единственный Excel–файл;
2. Export All Scan to One Excel: Экспорт всех сканирований в единственный Excel-файл;
3. Export All Scan to separate Excel: Экспорт всех сканирований в отдельный Excel;

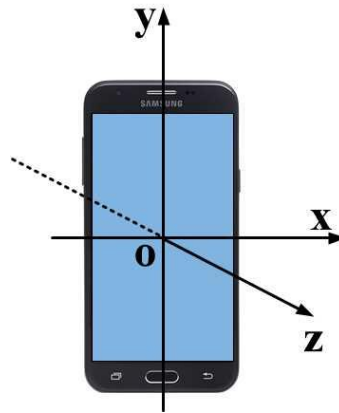


**Рис. 2.22. Способы сохранений данных в Excel –файлах**

Как показано на рис.2.21, кроме значения географических координат, высоты и скорости на экране смартфона, были значения ускорений от сенсора ускорения, который называется акселерометром.

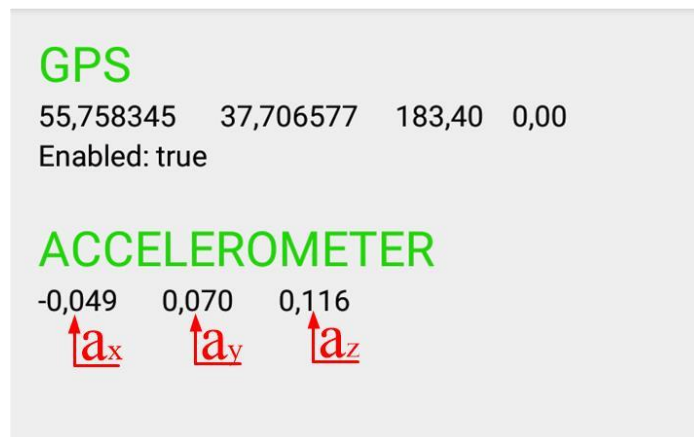
Во все современные мобильные устройства (смартфоны) устанавливается сенсор ускорения (акселерометр), компас и гироскоп, с помощью которого можно определить значение ускорения движения самого смартфона в пространстве в определенное время по трем координатам. Если устройство лежит параллельно Земле и его экран направлен вверх, то ось OX определяется прямой, которая параллельна Земле и направлена слева на право устройства, ось

ОУ направлена снизу вверх устройства, ось OZ проходит сквозь устройство и направлена вверх (рис. 2.23).



**Рис. 2.23. Координаты устройства**

Акселерометр дает массив из трех значений ускорения с точностью до 3 знаков после запятой, каждое из которых соответствует определенной оси (рис. 2.24). Для этого в приложении вызывается опрос сенсора **TYPE\_ACCELEROMETER** (лис. 2.8). Возможность использования акселерометра будет рассмотрена в следующих разделах.



**Рис. 2.24. Значения ускорения, полученные от сенсора ускорения (акселерометра)**

Лис. 2.8. Сенсор TYPE\_ACCELEROMETER

```
public void onSensorChanged(SensorEvent event) {
    switch (event.sensor.getType()) {
        case Sensor.TYPE_ACCELEROMETER:
            for (int i = 0; i < 3; i++) {
                valuesAccel[i] = event.values[i];
                valuesAccelGravity[i] = (float) (0.1 *
event.values[i] + 0.9 * valuesAccelGravity[i]);
                valuesAccelMotion[i] = event.values[i] -
valuesAccelGravity[i];
            }
            break;
    }
}
```

## 2.4. Использование картографических сервисов для учета высоты

Выше был показан принцип, по которому спутниковая система GPS определяет положение любой точки на земной поверхности по географическим координатам (широте, долготе) и высоте. Обычно широта и долгота отображаются в десятичных градусах (или градусах и десятичных минутах или градусах, минутах и секундах), а высота отображается только в метрах. Из-за особенностей работы глобальных навигационных систем высота измеряется с очень низкой точностью, недостаточной для определения уклона дороги при измерении траектории движения. Поэтому было принято решение для определения высоты воспользоваться существующими картографическими сервисами.

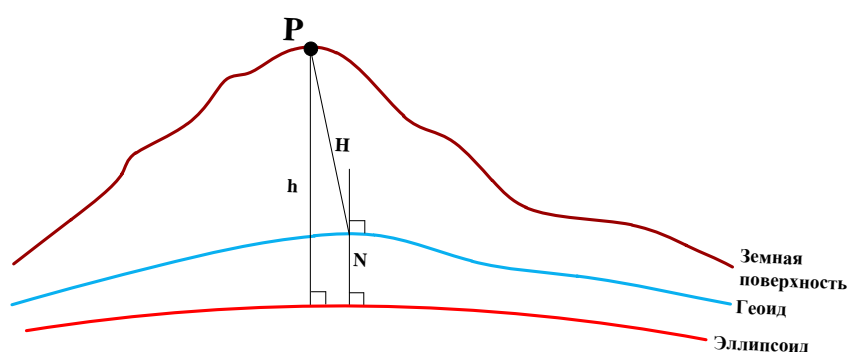
Основная проблема заключается в том, что значение высоты строго зависит от выбора эллипсоида относимости. Из-за вращения Земля не является идеальной сферой, а имеет сплюснутую форму. В качестве фигур, аппроксимирующих поверхность Земли (больше всего похож на сферу Земли), выбран эллипсоид вращения. Хотя этот эллипсоид не имеет никакой физической поверхности, но для удобства работы он представляется достаточно просто определяемой математической поверхностью.

В настоящее время применяются различные эллипсоиды земной поверхности, в которые входят эллипсоид IERS96 (International Earth Rotation Service 1996), эллипсоид GRS80 (Geodetic Reference System 1980), ПЗ-90

(Параметры Земли 1990 года). Наиболее широкое использование получил эллипсоид WGS84 (World Geodetic System 1984), используемый в спутниковой системе GPS. Он служит основой для определения положений любой точки, находящейся на поверхности Земли с высокой точностью [18].

Высота, которая определяется минимальным расстоянием между поверхностью эллипсоида WGS84 и определяемой точкой, называется геодезическими высотами. Геодезическая высота имеет только геометрический смысл и не может быть непосредственно измерена наземными методами [20].

Геодезическая высота разделяет на две составляющие части. Одна из них характеризует физическую поверхность Земли относительно среднего уровня моря (геоида), называется ортометрической высотой, а вторая — геоидальная составляющая высоты. Их зависимость показана на рис. 2.25.



**Рис. 2.25. Зависимость между геоидом, эллипсоидом и земной поверхностью**

Для связи ортометрических и геодезических высот имеется соотношение:

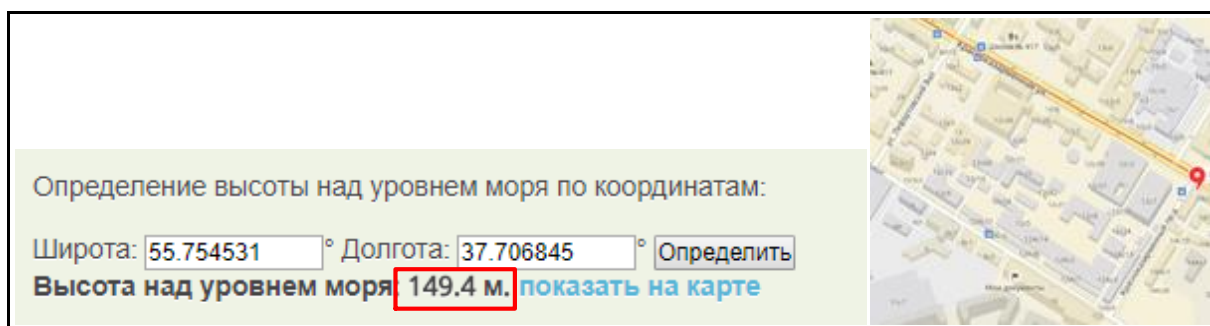
$$h = H + N, \quad (2.6)$$

где  $h$  — геодезическая высота;  $H$  — ортометрическая высота;  $N$  — превышение геоида над эллипсоидом.

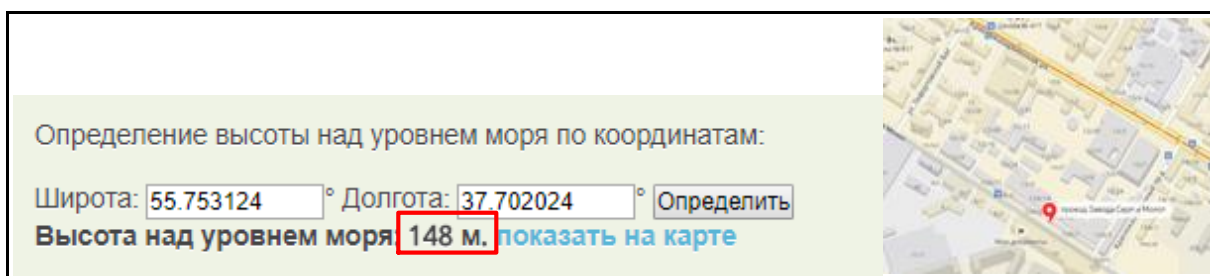
Из рис. 2.25 видно, что ортометрические высоты связаны с земной поверхностью. На практике они отображаются на топографических картах и приводятся в большинстве существующих каталогов координат геодезических пунктов. Для удобства большинство потребителей GPS также требуют, чтобы их

высоты были ортометрическими. Эти требования решены с помощью глобальной модели геоида (EGM2008), предназначенной для преобразования геодезических высот в ортометрические высоты [19].

С целью оценки изменения значений высоты над уровнем моря автомобиля, движущегося на дороге по определенной траектории, кроме использования мобильного приложения «**GPSAndAccelerometer**», которое рассмотрено выше, было решено использовать картографические сервисы. Одним из них является программа «Навигация» находится в Веб-сайте по адресу: <http://www.latlong.ru/>, с помощью которой можно определять точно высоты любых точек на поверхности Земли над уровнем моря, если их географические координаты (широты и долготы) известны. Введя значения широты и долготы, программа автоматически дает значение высоты над уровнем моря, соответствующее с исходными координатами, как показано на рис. 2.26 и рис. 2.27.



**Рис. 2.26. Высота имеет значение 149,4м соответственно с широтой 55,754531<sup>0</sup> и долготой 37,706845<sup>0</sup>**



**Рис. 2.27. Высота имеет значение 148м соответственно с широтой 55,753124<sup>0</sup> и долготой 37,702024<sup>0</sup>**

## 2.5. Преобразование координат для определения положения транспортного средства в метрической системе координат

Следующей задачей для конвертации траектории движения является преобразование координат точек, определяющихся геодезическими широтами, долготами, и высотами с поверхности выбранной общеземной системы координат в координаты в метрической системе координат, находящейся в плоскости для определения положения транспортного средства.

В настоящее время применяется несколько различных общеземных систем координат. В США и многих странах наиболее применена система WGS-84 для спутниковой системы GPS. В России распространены общеземная система ПЗ-90 (Параметры Земли 1990 г.) для спутниковой системы ГЛОНАСС и базовая система координат 1995 года (СК-95), согласно которой большая полуось эллипсоида  $a_{кр} = 6378245$  м и сжатие  $\alpha_{кр} = 1 / 298,31$  [21, 22].

Основная проблема заключается в том, что не существует преобразования с общеземной системы координат на плоскость без искажений линии. Вследствие чего результаты, которые получают из этих преобразований, могут не иметь необходимую точность, удовлетворяющую практическим требованиям. Существуют несколько различных методов преобразований, обладающих различными величинами искажений.

На территории Российской Федерации в качестве метода преобразования геодезических координат в плоские прямоугольные координаты, выбирают проекцию Гаусса-Крюгера. Проекция Гаусса-Крюгера имеет прямоугольную систему координат, в которой ось  $Y$  направлена на восток (вправо), а ось  $X$  направлена на север (вверх). Такое обозначение осей кажется непривычным для пользователя, но так принято в геодезии. Согласно ГОСТу Р 51794-2001 плоские прямоугольные координаты определяемой точки в проекции Гаусса-Крюгера обладают погрешностью не более 0,001 м и вычисляются по формулам [22]:



$$\begin{aligned}
x = & 6367558,4968B - \sin 2B(16002,89 + 66,9607 \sin^2 B + 0,3515 \sin^4 B - \\
& - l^2(1594561,25 + 5336,535 \sin^2 B + 26,790 \sin^4 B + 0,149 \sin^6 B + \\
& + l^2(672483,4 - 811219,9 \sin^2 B + 5420 \sin^4 B - 10,6 \sin^6 B + \\
& + l^2(278194 - 830174 \sin^2 B + 572434 \sin^4 B - 16010 \sin^6 B + \\
& + l^2(109500 + 574700 \sin^2 B + 863700 \sin^4 B - 398600 \sin^6 B)))));
\end{aligned} \tag{2.7}$$

$$\begin{aligned}
y = & (5 + 10n)10^5 + l \cos B(6378245 + 21346,1415 \sin^2 B + \\
& + 107,1590 \sin^4 B + 0,5977 \sin^6 B + \\
& + l^2(1070204,16 - 2136826,66 \sin^2 B + 17,98 \sin^4 B - 11,99 \sin^6 B + \\
& + l^2(270806 - 1523417 \sin^2 B + 1327645 \sin^4 B - 21701 \sin^6 B + \\
& + l^2(79690 - 866190 \sin^2 B + 1730360 \sin^4 B - 945460 \sin^6 B))),
\end{aligned} \tag{2.8}$$

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:

$$l = \{L - [3 + 6(n - 1)]\} / 57,2957; \tag{2.9}$$

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

$$n = E[(6 + L) / 6], \tag{2.10}$$

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

Основным преимуществом проекции Гаусса-Крюгера является деление поверхности математической модели эллипсоида на шестиградусные зоны, ограниченные меридианами от экватора до  $84^\circ$  северной широты. В пределах каждой зоны строится своя плоская прямоугольная координата Гаусса-Крюгера, где абсцисса и ордината определяемой точки отсчитываются с высокой точностью.

## 2.6. Метод интерполяции траектории движения по данным глобальных навигационных систем

Современные навигационные GPS-системы предоставляют географические координаты, определяющие местоположения ТС. Точность самых популярных GPS – приемников не превышает  $\pm 1$  метра, а ошибка измерения высоты намного выше из-за принципа работы GPS (приблизительно  $\pm 10$  метров). Проблема ошибки высоты уже решена выше путем использования цифровых карт местности, которые содержат высоту над уровнем моря для каждой точки ландшафта на карте в соответствии с их географическими координатами [57].

Напрямую использовать полученные с GPS-приемника данные нельзя по двум основным причинам:

- Географические координаты выдаются примерно один раз в секунду, однако они могут содержать значительную ошибку, обусловленную шумом. Для устранения шума требуется программная обработка.
- Соединение последовательных точек прямыми линиями даст бесконечное ускорение на стыках.

Применение сплайн-интерполяции не решает проблему отработки ошибок в координатах GPS-трека, связанных с простым шумом приемника, и приводит к неверному поведению во время остановок. В данном разделе был разработан специальный алгоритм с целью фильтрации данных и экстраполяции траектории GPS-трека в промежутках между измерениями.

### 2.6.1. Фильтрация нехарактерных точек траектории

Анализ показал, что при нормальном поведении трека, расстояние между двумя соседними точками, не являющимися точками остановки, имеющими географические координаты, выдающиеся от GPS за промежуток  $\Delta t = 1c$ , не может быть больше пяти метров.

$$l = R \cdot \text{acos}[\sin(\varphi_A) \cdot \sin(\varphi_B) + \cos(\varphi_A) \cdot \cos(\varphi_B) \cdot \cos(\lambda_A - \lambda_B)], \quad (2.11)$$

где  $\varphi_A$  и  $\varphi_B$  — широты;  $\lambda_A$ ,  $\lambda_B$  — долготы;  $l$  — расстояние между двумя точками, измеряемое в метрах;  $R = 6371$  км — средний радиус земного шара.

Принцип, по которому работает фильтр, достаточно прост. Вычисляется расстояние от начальной точки до соседней точки по направлению движения транспортного средства по формуле (2.11). Если это расстояние между ними меньше четырех метров, то точка пропускается и не записывается в массив с данными траектории. Фильтр, написан в среде «Microsoft Visual Studio 2013», код которого представлен в лис. 2.9.

Лис. 2.9. Код Фильтра в среде «Microsoft Visual Studio 2013»

```

180 void filter2(double *vysota1, double *shirota1, double *dolgota1, double *time1, double *vysota2,
181 double *shirota2, double *dolgota2, double *time2, unsigned int &h)
182 {
183     int iii = 0;
184     double d, delta_s;
185     unsigned int prom = h, w = 1;
186     h = 0;
187     for (unsigned int l = 0; l < prom; l++) //фильтр 2.
188     {
189         vysota2[h] = vysota1[l]; //запись текущей координаты.
190         shirota2[h] = shirota1[l];
191         dolgota2[h] = dolgota1[l];
192         time2[h] = time1[l];
193
194         d = acos(sin(shirota1[l] * (pi / 180)) * sin(shirota1[l + w] * (pi / 180)) + cos(shirota1[l] *
195 (pi / 180)) * cos(shirota1[l + w] * (pi / 180)) * cos((dolgota1[l + w] - dolgota1[l]) * (pi / 180)));
196         delta_s = d * R; //рассчитываем расстояние между точками.
197         cout << h << " " << l << " " << delta_s << " " << time2[h] << " " << shirota2[l+w] << " " << dolgota2[l+w] << endl;
198         if (0 < delta_s && delta_s <= 4 && shirota1[l + w] != shirota1[l + w + 1] && dolgota1[l + w] != dolgota1[l + w + 1])
199         {
200             iii++;
201             w = w++; //если расстояние меньше 5 м и точка не является точкой остановки
202         }
203         else
204         {
205             l = l + w; //если больше 5 м оставляем координату, делая ее текущей.
206             h = h++;
207             w = 1;
208         }
209     }
210 }

```

## 2.6.2. Алгоритм аппроксимации ускорений

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 транспортного средства. Они содержат некоторую ошибку, возникающую из-за погрешностей системы GPS. Поэтому нет необходимости точно следовать этим точкам. Траектория транспортного средства описывается следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} &= \int \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} dt; \\ \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} &= \int \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} dt, \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

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 транспорта.

Для любого набора опорных точек во времени ускорение, требуемое, чтобы пройти через следующую опорную точку, можно оценить с помощью:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} a_x[n] \\ a_y[n] \\ a_z[n] \end{bmatrix} &= f \frac{2}{(t[n+1]-t[n])^2} \cdot \\ &\cdot \left( \begin{bmatrix} x[n+1] \\ y[n+1] \\ z[n+1] \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x[n] \\ y[n] \\ z[n] \end{bmatrix} - (t[n+1]-t[n]) \cdot \begin{bmatrix} v_x[n] \\ v_y[n] \\ v_z[n] \end{bmatrix} \right), \end{aligned} \quad (2.13)$$

где  $a_i[n]$  — ускорение в определенном направлении, которое прикладывается к транспортному средству 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 точке  $n$ ; и  $f$  — коэффициент аппроксимации, который может варьироваться от 0 до 1.

Коэффициент аппроксимации определяет, насколько точно новая траектория, оцененная по (2.13), 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. 2.28.

Эксперимент проводился на легковом автомобиле. На рис. 2.29 представлена карта города и маршрут транспортного средства, движущегося из точки старта (А) до точки финиша (В). Часть GPS-трека и его интерполяция с различными коэффициентами аппроксимации показаны на рис. 2.30. 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 GPS.

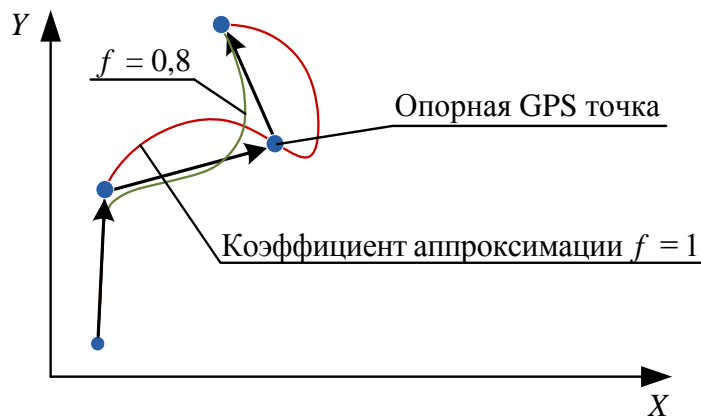
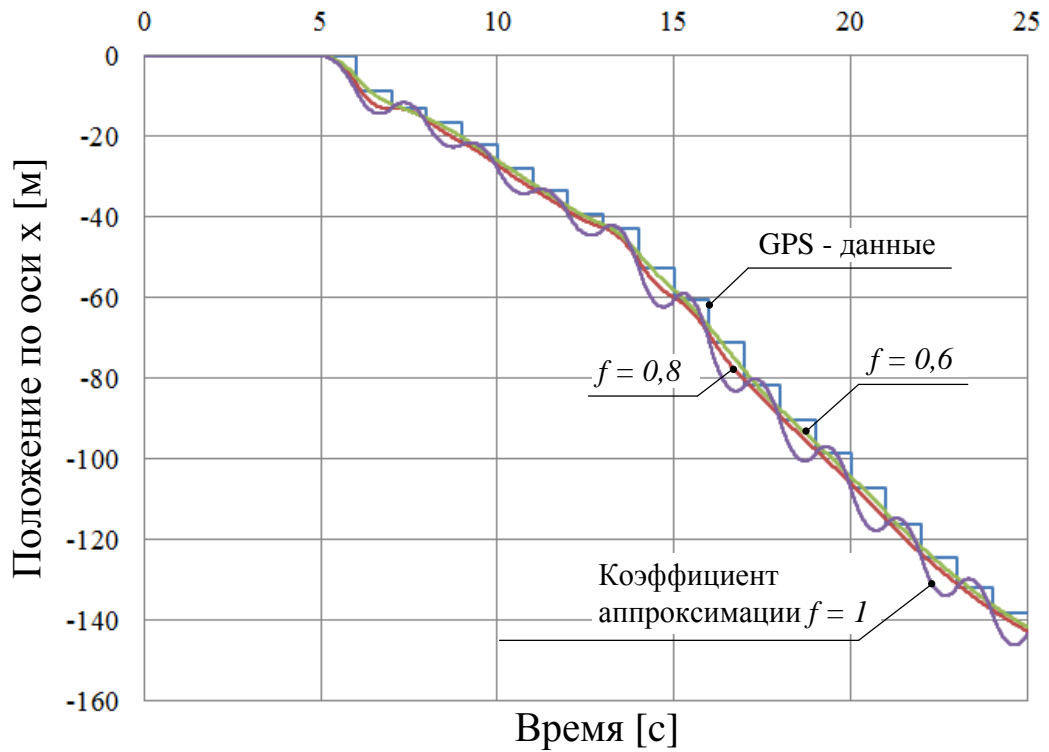


Рис. 2.28. Траектории для различных коэффициентов аппроксимации



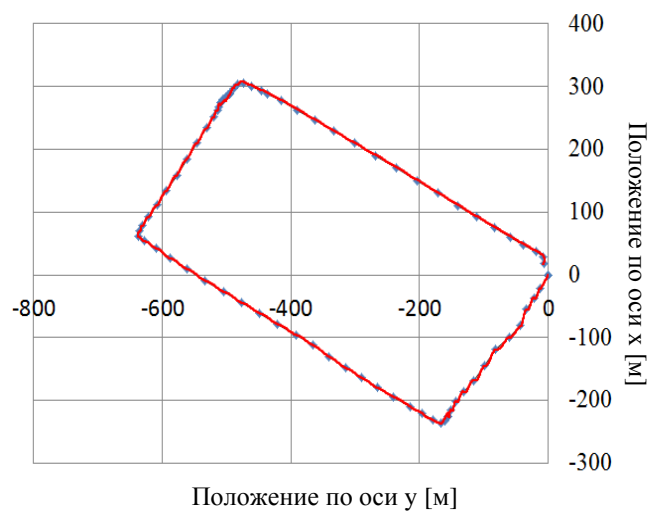
Рис. 2.29. GPS- трек транспортного средства



**Рис. 2.30. Аппроксимация GPS-трека**

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 позиции GPS.

Результат обработки всего маршрута показан на рис. 2.31 для осей  $x$  и  $y$ .



**Рис. 2.31. GPS-трек и его аппроксимация: маркеры - точки GPS; сплошная линия - аппроксимированный маршрут**

## 2.7. Выводы по главе 2

Рассмотрены принципы работы и структура американской глобальной навигационной спутниковой системы (GPS) и российской (ГЛОНАСС). Приведены уравнения для определения местоположения любого объекта, находящегося на поверхности Земли в любое время и с высокой точностью и достаточной надежностью путем решения навигационной задачи с помощью системы основных уравнений GPS.

Дана оценка влияния множества факторов на точность определения координат потребителя. Значение погрешности GPS/ГЛОНАСС будет получен в результате суммирования всех погрешности от различных источников. В результате исследования показано, что типовая погрешность гражданской приемной аппаратуры составляет приблизительно 1,5-10 м для системы GPS и 5-15 м для системы ГЛОНАСС.

Создано мобильное приложение под названием «**GPSAndAccelerometer**» с помощью среды Android Studio версии 1.4.1 на языке программирования Java для определения текущих географических координат с помощью чипа GPS, установленного в смартфоне. Приложение позволяет сохранять GPS-треки в удобном для дальнейшей обработки виде.

Выбрана проекция Гаусса-Крюгера для преобразования полученных координат точек от приложения GPS, определяющихся геодезическими широтами, долготами, и высотами в координаты в метрической системе координат, находящейся в плоскости для определения положения транспортного средства.

Разработана методика обработки и анализа данных GPS-трека транспортного средства путем использования специального алгоритма, устраняющего ошибки дискретизации системы GPS. Предложенный метод преобразует траекторию движения, представленную набором точек в пространстве и времени, в набор ускорений во времени, которые в дальнейшем

могут быть использованы совместно с механической моделью транспортного средства для оценки требуемых тяговых усилий и мощности.



## **ГЛАВА 3. КОРРЕКЦИЯ ДАННЫХ ТРАЕКТОРИИ СРЕДСТВАМИ АКСЕЛЕРОМЕТРА, ГИРОСКОПА И КОМПАСА**

### **3.1. Вспомогательные инструменты для уточнения данных о перемещении ТС: акселерометр, компас, гироскоп**

Несмотря на широкое применение индивидуальных средств навигации, использующих технологии GPS/ГЛОНАСС. В некоторых особенных условиях (в городах с плотной застройкой, в лесу с густотой, или под землей) спутниковая навигационная система имеет недостаток, который заключается в невозможности определять координат местоположения с высокой точностью из-за влияний среды распространения, многолучевого распространения сигналов. Также, при работе с траекторией, полученной с приемника глобальной навигационной системы, отсутствуют данные в промежуточных точках между измерениями положения. А так как измерение положения производится достаточно редко (около 1 раза в секунду), то желательно уточнить траекторию движения в промежуточных точках.

Для решение данного недостатка применен способ определения перемещения ТС, который не зависит от наличия GPS сигналов путем использования микроэлектромеханических систем датчиков, имеющих низкое энергопотребление, невысокую стоимость и малые габариты. Одним из таких датчиков является микросхема MPU-9250 компании InvenSense.

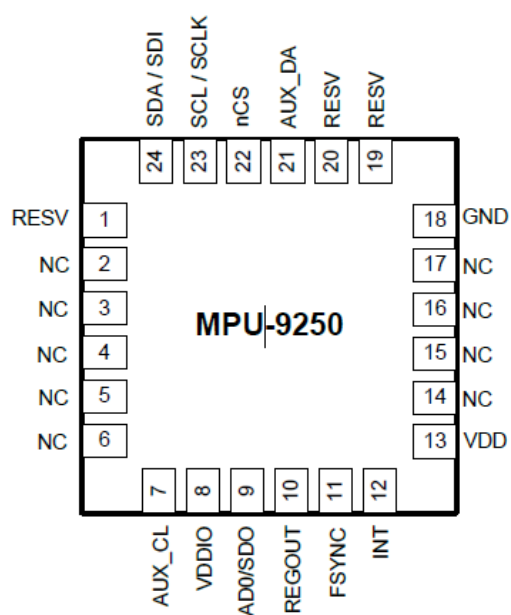
Как было уже сказано в предыдущей главе, современные смартфоны имеют встроенные 3-осевой акселерометр, гироскоп и компас, однако их использование ограничено низкой частотой опроса, которую позволяет организовать операционная система Android, в связи с чем было принято решение использовать отдельностоящий измеритель инерциальных параметров.

Микросхема MPU-9250 — многокристальный (многочиповый) модуль, состоящий из двух кристаллов, объединённых в один корпус QFN. В одном кристалле находится трёхосевой акселерометр и трёхосевой гироскоп. В другом

— размещён трёхосевой магнитометр (компас) АК8963. На рис. 3.1 и рис. 3.2 изображены печатная плата модуля GY-9250 на базе микросхемы MPU-9250 и ее схема выводов.



**Рис. 3.1. Внешний вид печатной платы модуля GY-9250**



**Рис. 3.2. Схема выводов для MPU-9250 (3x3x1м)**

Таб. 3.1. Описания сигналов

| Номер | Название | Описание                                                                         |
|-------|----------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | RESV     | Зарезервированный. Подключение к VDDIO.                                          |
| 7     | AUX_CL   | Тактовый сигнал шины I2C при работе в режиме мастера                             |
| 8     | VDDIO    | Напряжение питания цифрового ввода / вывода                                      |
| 9     | AD0/SDO  | Адрес подчиненного устройства I2C (AD0); Выход последовательных данных SPI (SDO) |
| 10    | REGOUT   | Регулятор соединения фильтра                                                     |

| Номер     | Название | Описание                                                                                     |
|-----------|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 11        | FSYNC    | Цифровой вход для синхронизации кадра. Подключение к Земле, если он не используется.         |
| 12        | INT      | Прерывание цифрового выхода                                                                  |
| 13        | VDD      | Напряжение питания                                                                           |
| 18        | GND      | Общий провод                                                                                 |
| 19        | RESV     | Зарезервированный. Не подключение                                                            |
| 20        | RESV     | Зарезервированный. Подключение к Земле                                                       |
| 21        | AUX_DA   | Последовательные данные шины I2C при работе в режиме мастера                                 |
| 22        | nCS      | Выбор микросхемы (только режим SPI)                                                          |
| 23        | SCL/SCLK | Последовательные тактовые сигналы I2C (SCL);<br>Последовательные тактовые сигналы SPI (SCLK) |
| 24        | SDA/SDI  | Последовательные данные сигналы I2C (SDA);<br>Последовательные данные сигналы SPI (SDI)      |
| 2-6:14-17 | NC       | Не подключен внутренне                                                                       |

### 3.1.1. Трёхосевой Акселерометр

Акселерометр представляет собой компактное устройство, предназначенное для измерения ускорений, обусловленных действием негравитационных сил. Когда объект, в котором он встроен, переходит из состояния покоя в состояние движения с любой скоростью, акселерометр регистрирует ускорения, связанные с изменением скорости. Он использует микромеханические кристаллы, которые выдают электрический сигнал пропорциональный ускорению. Трёхосевой акселерометр определяет величину мгновенной проекции векторов ускорения на осях OX, OY и OZ.

Трёхосевой акселерометр в MPU-9250 имеет следующие основные параметры:

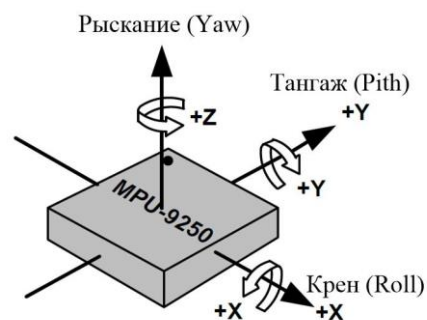
- акселерометры с переключаемыми диапазонами:  $\pm 2g$ ,  $\pm 4g$ ,  $\pm 8g$  и  $\pm 16g$  оцифровывают встроенные 16-разрядные АЦП;
- номинальный ток в рабочем режиме: 450 мкА;
- ток в режиме малой мощности: 8,4 мкА при 0,98 Гц; 19,8 мкА при 31,25 Гц;
- ток в режиме ожидания: 8 мкА;
- программируемые пользователем прерывания;

- прерывание во время пробуждения для работы с низким энергопотреблением процессора;
- самотестирование.

### 3.1.2. Трёхосевой гироскоп

MPU-9250 состоит из трех независимых вибрационных гироскопов скорости MEMS, которые обнаруживают вращение вокруг осей  $OX$ ,  $OY$  и  $OZ$ . Результирующий сигнал усиливается, модулируется и фильтруется для получения напряжения, которое пропорционально угловой скорости во времени. Это напряжение оцифровывается с использованием индивидуальных 16-разрядных аналого-цифровых преобразователей (АЦП) на кристалле для каждой оси.

На рис.3.3 изображены углы поворота по осям  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$  (рыскание, тангаж и крен), вычисляемые за счет определения угловых скоростей.



**Рис. 3.3. Ориентация осей чувствительности и полярности вращения акселерометра и гироскопа**

**Рыскание** (*Yaw*) — угловые движения оси  $OX$  датчика относительно вертикальной оси ( $OZ$ ). Угол рыскания считается положительным, если оси  $OX$  направлена влево (против часовой стрелки, если смотреть сверху на датчик), и отрицательным, если оси  $OX$  направлена вправо.

**Тангаж** (*Pitch*) является углом между осью  $OX$  датчика и плоскостью Земли. Угол тангажа считается положительным, если ось  $OX$  направлена к Земле, а отрицательным если направлена к небу.

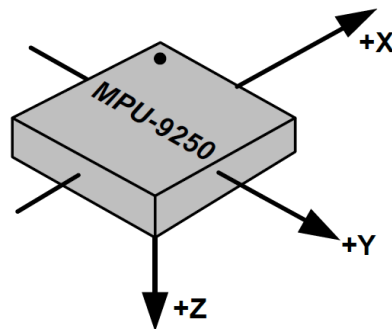
**Крен (Roll)** является углом между осью  $OY$  датчика и плоскостью Земли. Угол крена считается положительным, если ось  $OY$  поворачивает вверх, а отрицательным если вниз.

Трёхосевой гироскоп в MPU-9250 имеет следующие основные параметры:

- переключаемые диапазоны:  $\pm 250$ ,  $\pm 500$ ,  $\pm 1000$  и  $\pm 2000$  град/секунду оцифровывают встроенные 16-разрядные АЦП;
- номинальный ток в рабочем режиме: 3,2 мА;
- ток в режиме ожидания: 8 мкА;
- самотестирование.

### 3.1.3. Трёхосевой магнитометр

Трёхосевой магнитометр использует высокочувствительную технологию датчика Холла. Он включает в себя магнитные датчики для обнаружения земного магнетизма в осях  $OX$ ,  $OY$  и  $OZ$ , схему управления датчиком, цепь усилителя сигнала, и арифметическую схему для обработки сигнала от каждого датчика. Каждый АЦП имеет 16-битное разрешение и полный диапазон шкалы  $\pm 4800$  мкТ. На рис. 3.4 показана ориентация осей чувствительности компаса



**Рис. 3.4. Ориентация осей чувствительности компаса**

Трёхосевой магнитометр в MPU-9250 имеет следующие основные параметры:

- трёхосевой кремний монолитный магнитный датчик эффекта Холла с магнитным концентратором;
- Широкий динамический диапазон измерений и высокое разрешение;

- разрешение выходных данных 14 бит (0,6 мкТ/LSB) или 16 бит (15 мкТ/LSB);
- диапазон измерения полной шкалы составляет  $\pm 4800\mu\text{T}$ ;
- нормальный ток магнитометра в рабочем режиме: 280 мкА при частоте преобразования 8 Гц;
- Функция самотестирования с внутренним магнитным источником для подтверждения работы магнитного датчика на конечных продуктах.

### **3.2. Разработка программного обеспечения поддержки вспомогательных инструментов измерения для мобильной навигационной системы**

Для сбора данных использован комплекс, состоящий из платы контроллера МК19.2 производства ООО «НПФ «ВЕКТОР» и микросхемы MPU-9250. На плате контроллера встроен микроконтроллер, выполняющий обработку данных от датчиков и передачу их на компьютер с помощью разработанного программного обеспечения, в котором осуществляется несколько алгоритмов обработки и фильтрации для данных датчиков. В результате определяется траектория движения.

#### **3.2.1. Контроллер МК19.2 для разработки и отладки программного обеспечения и интегрированная среда Code Composer Studio**

Для реализации системы сбора данных и управления микросхемой MPU-9250 использовался контроллер МК19.2 на базе микроконтроллера фирмы Texas Instruments (TI) TMS320F28335, разработанный фирмой ООО «НПФ ВЕКТОР», г. Москва. Микроконтроллер TMS320F28335 обладает высокой производительностью. Его внешний вид представлен на рис. 3.5.



**Рис. 3.5. Конструкция контроллер МК19.2**

Вычислительное ядро контроллера имеет производительность до 150 млн. операций в секунду при использовании модуля поддержки вычислений с фиксированной точкой [27].

Основные технические характеристики контроллера МК19.2

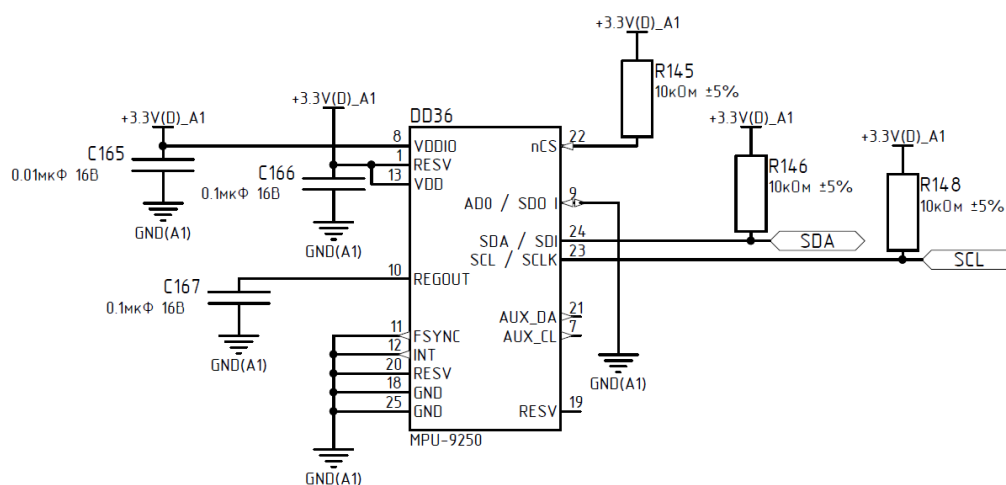
- тип микроконтроллера: TMS320F28335;
- внешний источник питания: +24В
- встроенная оперативная память: 34К – 16-разрядных слов;
- перепрограммируемая флеш-память: 256К – 16-разрядных слов;
- тактовая частота: 150 МГц;
- коммуникационные интерфейсы: I2C, SPI, RS-232, RS-485, CAN ;
- число основных ШИМ-выходов: 6;
- входы приема аппаратных аварий: 5; [27]
- JTAG-интерфейс. [28]

Для разработки программного обеспечения для микроконтроллера TMS320F28335 была использована интегрированная среда Code Composer Studio

(CCS) от фирмы Texas Instruments (TI), позволяющая писать и отлаживать программы на языке высокого уровня C/C++ [28].

### 3.2.2. Двухпроводный последовательный интерфейс I2C

Микросхема MPU-9250 жестко закрепляется в салоне автомобиля так, что ось X MPU-9250 направлена вдоль продольной оси по движению автомобиля. Таким образом, когда автомобиль движется, MPU-9250 измеряет как ускорения движения, так и углы наклона автомобиля в выбранной системе координат (в том числе угол рыскания, тангажа и крена). Передача данных между микросхемой MPU-9250 и контроллером МК19.2 осуществляется по двухпроводному последовательному интерфейсу I2C, в котором MPU-9250 выступает в качестве ведомого устройства, а контроллер МК19.2 выполняет роль ведущего устройства (рис. 3.6).

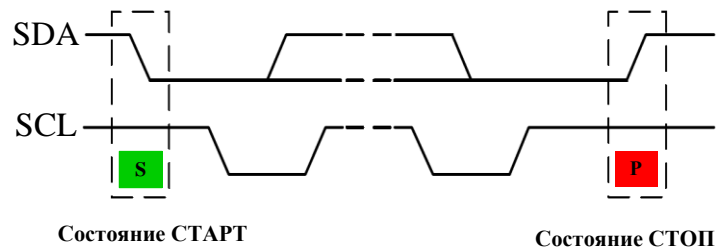


**Рис. 3.6. Электрическая схема подключения MPU-9250 к шине I2C**

Адрес ведомого устройства MPU-9250 —  $b110100x$ , который имеет длину 7 битов. Наименьший значащий бит (7-ой бит) определяется логическим уровнем на выводе AD0. Это позволяет подключать два MPU-9250 к одной шине I2C. Следовательно, адрес одного из устройства может быть  $b1101000$  (68-шестнадцатеричное) если контакт AD0 соединен с землёй, а адрес другого —  $b1101001$  (69-шестнадцатеричное) если на контакт AD0 подана логическая единица.

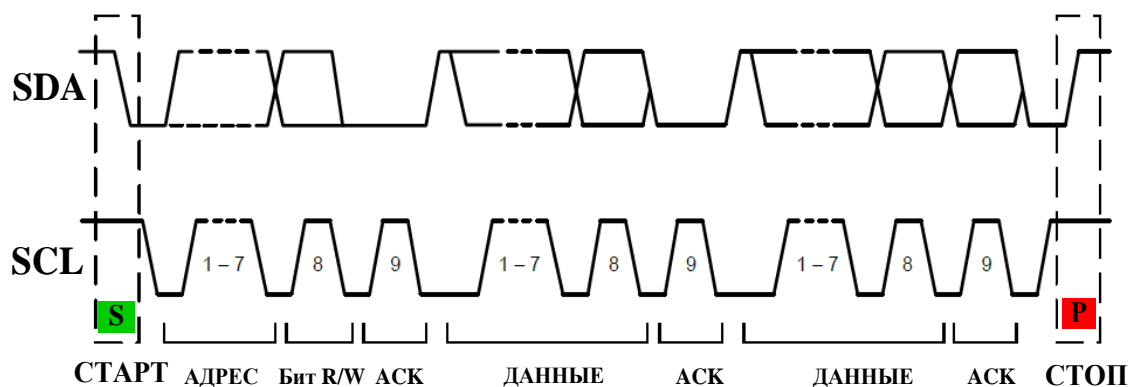


Обмен данными по шине I2C начинается, когда ведущий выставляет состояние СТАРТ (S) на шину, которое определяется переходом с высокого уровня на низкий уровень в линии SDA, в то время как линия SCL находится в высоком уровне. Шина считается занятой до тех пор, пока ведущий не выполнит состояние СТОП (P) на шине, которое определяется переходом от низкого уровня до высокого уровня на линии SDA, в то время SCL находится в высоком уровне (рис. 3.7).



**Рис. 3.7. Состояние СТАРТ и СТОП**

После начала обмена ведущий посылает 7 битов адреса ведомого устройства MPU-9250, за которыми следует 8-й бит, который является битом чтения/записи (бит R/W). Бит чтения/записи указывает на то, что принимает ли ведущий данные или записывает их на ведомый. Затем ведущий освобождает линию SDA и ожидает сигнал подтверждения (ACK) от ведомого устройства. Каждый переданный байт должен сопровождаться битом подтверждения (ACK). Передача данных всегда завершается ведущим с состоянием СТОП (P), таким образом, освобождается линия связи (рис. 3.8).



**Рис. 3.8. Передача данных по интерфейсу I2C**

### 3.2.3. Последовательность записи

В таб. 3.2 показана последовательность записи внутренних регистров MPU-9250. Сначала ведущий передает сигнал запуска (S), за которым следуют адрес ведомого устройства (адрес MPU-9250 равен 0x68) и бит записи (0). На девятом такте MPU-9250 подтверждает передачу. Затем ведущий выставляет адрес регистра (RA) на шину. После того, как MPU-9250 подтверждает прием адреса регистра, ведущий выставляет данные регистра на шину. За этим следует сигнал ACK, и передача данных завершается стоповым битом (P).

Таб. 3.2. Последовательность записи

|              |   |      |     |    |     |      |     |   |
|--------------|---|------|-----|----|-----|------|-----|---|
| TMS320F28335 | S | AD+W |     | RA |     | DATA |     | P |
| MPU-9250     |   |      | ACK |    | ACK |      | ACK |   |

Таб. 3.3. Термины I2C

| Сигнал | Описание                                                                                                       |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| S      | Состояние запуска                                                                                              |
| AD     | Адрес подчиненного устройства (MPU-9250): 0x68                                                                 |
| W      | Бит записи (0)                                                                                                 |
| R      | Бит чтения (1)                                                                                                 |
| ACK    | сигнал подтверждения: SDA линия в низком состоянии, в то время как SCL линия в высоком состоянии на 9-ом такте |
| NACK   | Отсутствие подтверждения                                                                                       |
| RA     | Адрес внутреннего регистра MPU- 9250                                                                           |
| DATA   | Передача или получение данных                                                                                  |
| P      | Состояние остановки                                                                                            |

### 3.2.4. Последовательность чтения

Чтобы прочитать внутренние регистры MPU-9250, ведущий отправляет сигнал запуска, за которым следуют адрес I2C и бит записи (0), а затем адрес регистра, который будет считаться. После приема сигнала ACK от MPU-9250 ведущий передает сигнал запуска, а затем адрес ведомого устройства и бит чтения (1). В результате MPU-9250 отправляет сигнал ACK и данные. Связь заканчивается сигналом «отсутствия подтверждения» (NACK) и битом остановки от ведущего устройства. Условие NACK определено таким образом,

что линия SDA остается высокой на девятом такте. Последовательность чтения показана в таб. 3.4.

Таб. 3.4. Последовательность чтения

|              |   |      |     |    |     |   |      |     |      |     |      |      |   |
|--------------|---|------|-----|----|-----|---|------|-----|------|-----|------|------|---|
| TMS320F28335 | S | AD+W |     | RA |     | S | AD+R |     |      | ACK |      | NACK | P |
| MPU-9250     |   |      | ACK |    | ACK |   |      | ACK | DATA |     | DATA |      |   |

Модуль I2C содержит всего 17 регистров, каждый из них имеет индивидуальный адрес и свои значения. Например: регистр I2CSAR предназначен для сохранения адреса ведомого устройства, регистр I2CDRR имеет 16 бит, используемые для считывания принятых данных, регистр I2CDXR, в который микроконтроллером записываются данные передачи и другие. В таб. 3.5. подробно перечислены регистры модуля I2C.

Таб. 3. 5. Регистры модулей I2C

| Название | Адрес   | Описание                               |
|----------|---------|----------------------------------------|
| I2COAR   | 0x7900  | I2C регистр собственного адреса        |
| I2CIER   | 0x7901  | I2C регистр разрешения прерывания      |
| I2CSTR   | 0x7902  | I2C регистр состояния                  |
| I2CCLKL  | 0x7903  | I2C младшее слово делителя частоты     |
| I2CCLKH  | 0x7904  | I2C старшее слово делителя частоты     |
| I2CCNT   | 0x7905  | I2C регистр счета данных               |
| I2CDRR   | 0x7906  | I2C регистр приема данных              |
| I2CSAR   | 0x7907  | I2C регистр адреса ведомого устройства |
| I2CDXR   | 0x7908  | I2C регистр передачи данных            |
| I2CMDR   | 0x7909  | I2C регистр режима                     |
| I2CISRC  | 0x790A  | I2C регистр источника прерывания       |
| I2CEMDR  | 0x7900B | I2C регистр расширенных режимов        |
| I2CPSC   | 0x7900C | I2C регистр предварительного делителя  |
| I2CFFTX  | 0x7920  | I2C регистр передачи в режиме FIFO     |
| I2CFFRX  | 0x7921  | I2C регистр приема в режиме FIFO       |
| I2CRSR   | -       |                                        |
| I2CXSR   | -       |                                        |

На рис. 3.9 показаны четыре регистра, используемые для передачи и приема данных без FIFO. Микроконтроллер записывает данные для передачи в регистр I2CDXR и считывает данные, полученные из регистра I2CDRR. Когда модуль I2C сконфигурирован как передатчик, данные, записанные в регистр I2CDXR, копируются в регистр I2CXSR и сдвигаются на вывод SDA. Когда модуль I2C

настроен как приемник, принятые данные сдвигаются в I2CRSR, а затем копируются в регистр I2CDRR.

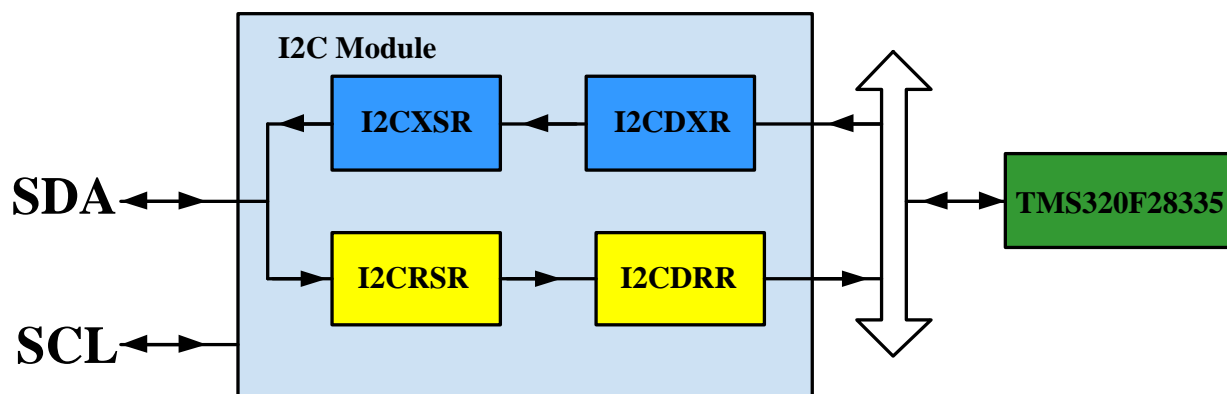


Рисунок 3.9. Функциональная блок-схема модуля I2C

### 3.2.5. Калибровка и инициализация микросхемы MPU-9250

Каждая микросхема MPU-9250 требует калибровки. Показания датчиков имеют некоторое смещение относительно нуля, что вносит погрешность в измерения. Нужно учесть смещение для каждой оси гироскопа и каждой оси акселерометра, чтобы внести корректировку в программу. При производстве микросхем невозможно получить абсолютную точность угла между осями датчиков, поэтому угол между ними содержит погрешность. Также нельзя забывать о том, что данные от трех осей могут иметь разные коэффициенты усиления. Наибольшая точность результатов для получения параметров движения может быть получена при синхронном считывании данных акселерометра и гироскопа.

Согласно описанию MPU-9250, исходные данные акселерометра программой преобразуются в ускорение свободного падения  $g = 9,8 \text{ м} / \text{с}^2$  путем деления на коэффициент чувствительности акселерометр, который равен 16384. При перемещении и вращении датчика данные акселерометра сильно колеблются. Если шумы отфильтровать, то акселерометр обеспечит точные результаты.

Для вычисления ориентации, в первую очередь необходимо инициализировать гироскоп с известным значением, затем измерить угловую скорость  $\omega$  через интервалы времени  $\Delta t$ . Тогда изменение угла определяется выражением  $\omega\Delta t$ . Проблема с этим подходом заключается в том, что многократное суммирование приращения  $\omega\Delta t$  приведет к увеличивающейся со временем ошибке. Это является причиной гироскопического дрейфа.

Аналогично, чтобы получать угловую скорость в градусах в секунду, необходимо делить исходные данные гироскопа на коэффициент чувствительности гироскопа, который равен 131. С помощью этих данных можно получить положение объекта. Для этого, мгновенное значение угловой скорости умножим на промежуток времени между опросами датчика гироскопа. Далее каждое полученное значение нужно сложить с предыдущим.

### **3.3. Анализ точности определения координат в инерциальной навигационной системе**

В отличие от различных глобальных навигационных систем, таких как GPS инерциальные навигационные системы (ИНС) имеют преимущество в виде полной автономности, помехозащищенности и помехоустойчивости, которые состоят из трёхосевых гироскопов, трёхосевых акселерометров и трёхосевых магнитометров, позволяющих отслеживать вращательные и поступательные движения [29, 30]. Инерциальные навигационные системы используют систему отчёта, известную как “рыскание, тангаж, крен”, способны обеспечить полное измерение ориентации относительно силы тяжести и земного магнитного поля. В качестве инструмента используются кватернионы, которые позволяют использовать данные акселерометра и магнитометра для аналитических вычислений и оптимизации методом градиентного спуска в получении погрешности направления гироскопа в виде производного кватерниона [31].

Как объяснено выше данные акселерометра и гироскопа склонны к систематическим ошибкам. Акселерометр и магнетометр измеряют

гравитационные и магнитные поля планеты, и соответственно могут определять абсолютное значение ориентации в пространстве в долгосрочной перспективе, но дают сильный шум за короткий промежуток времени. Гироскоп обеспечивает получение точных данных об изменении ориентации за короткий промежуток времени, но при интегрировании данных происходит гироскопический дрейф, приводящий к накоплению ошибки в вычислении ориентации. Таким образом, гироскопы, сами по себе, не могут обеспечить абсолютное измерение ориентации.

Решение этих проблем заключается в использовании данных акселерометра и гироскопа вместе таким образом, чтобы ошибки взаимно уничтожались. Стандартным способом объединения является применение фильтра Калмана, комплементарный фильтр или фильтр Маджвика.

### **3.3.1. Фильтр Маджвика**

Фильтр Маджвика представляет собой фильтр показаний датчиков для определения ориентации в пространстве. Фильтр Маджвика занимается обработкой массивов данных, поступающих с датчиков, и устраняет проблемы точности и настройки параметров фильтров, основанных на подходах Калмана. Кроме того, он использует кватернион для представления ориентации, чтобы описать положение в пространстве в трёх измерениях и не содержит проблем, связанных с описанием положения углами Эйлера [31].

Одним из основных параметров фильтра Маджвика является коэффициент усиления фильтра  $\beta$ , представляющий все ошибки измерений среднего нулевого гироскопа, выраженные как величина производного кватерниона. Существует много источников ошибки, влияющих на точности результата измерений датчиков. Например: шум датчика, сглаживающий фильтр, ошибки квантования, ошибки калибровки, ошибки установки и выравнивания датчика, неортогональность осей датчика и ограничения по частоте сигнала.

Другой коэффициент усиления фильтра обозначается символом  $\zeta$ , который представляет собой скорость сходимости для удаления ошибок измерения гироскопа, не связанных с нулём, и также выражен как величина производного кватерниона. Эти ошибки представляют собой смещение гироскопа.

В начале работы над фильтром предполагалось, что акселерометр и магнитометр будут измерять только силу тяжести и магнитное поле Земли. На практике, из-за ускорений движения это приводит к ошибочному наблюдаемому направлению силы тяжести (особенно если перегрузка, создаваемая движением соизмерима или больше величины силы тяжести), что даёт потенциально неправильную оценку высоты, а искажения магнитного поля дают неправильную оценку курса.

Можно предположить, что ускорение движения и магнитные искажения присутствуют только короткий период времени. Поэтому величина коэффициента усиления фильтра  $\beta$  может быть выбрана достаточно низкой, чтобы отклонение, вызванное ошибочными представлениями о гравитационных и магнитных искажениях, наблюдаемых на местах, снизилось до приемлемого уровня за период. Минимально допустимое значение  $\beta$  ограничивается погрешностью измерений гироскопа.

В среде Code Composer Studio значение  $\beta$  определено по формуле:

$$\beta = \text{sqrt}(3.0f / 4.0f) * \text{GyroMeasError}, \quad (3.1)$$

где `GyroMeasError` является погрешностью измерения гироскопа, измеряемой в рад/с. По (3.1) значение коэффициента  $\beta$  до 10 с вычислено и равно 0.906899682. После 10 с, когда фильтр стабилизируется, погрешность измерения гироскопа (`GyroMeasError`) уменьшится до 3 град/с, т.е. коэффициент усиления фильтра  $\beta$  снижается, и становится равен 0.045344984. Коды программы на языке C в среде CCS изображены в лис. 3.1.

Лис. 3. 1. Коэффициент усиления фильтра  $\beta$  в среде CCS

```

if(p->time_ms - p->firstUpdate > 10000.0f)
{
    p->beta = 0.026179939; // decrease filter gain after stabilized
}

```

В лис. 3.2 показан фрагмент программы фильтра, оптимизированной на языке C в среде Code Composer Studio.

Лис. 3.2. Фрагмент программы фильтра Маджвика

```

// Compute then integrate estimated quaternion derivative
q1 += (qDot1 - (p->beta * hatDot1)) * p->deltat;
q2 += (qDot2 - (p->beta * hatDot2)) * p->deltat;
q3 += (qDot3 - (p->beta * hatDot3)) * p->deltat;
q4 += (qDot4 - (p->beta * hatDot4)) * p->deltat;

// Normalize the quaternion
norm = sqrt(q1 * q1 + q2 * q2 + q3 * q3 + q4 * q4); //normalise quaternion
norm = 1.0f/norm;

p->q[0] = q1 * norm;
p->q[1] = q2 * norm;
p->q[2] = q3 * norm;
p->q[3] = q4 * norm;

```

Таким образом, значения углов рыскания, тангажа и крена (yaw, pitch, roll) можно определять по полученным значениям от фильтра Маджвика, как показано в лис. 3.3

Лис. 3.3. Определение значения углов поворота

```

p->yaw = atan2(2.0f * (p->q[1] * p->q[2] + p->q[0] * p->q[3]),
              p->q[0] * p->q[0] + p->q[1] * p->q[1] - p->q[2] * p->q[2] - p->q[3] * p->q[3]);
p->pitch = -asin(2.0f * (p->q[1] * p->q[3] - p->q[0] * p->q[2]));
p->roll = atan2(2.0f * (p->q[0] * p->q[1] + p->q[2] * p->q[3]),
               p->q[0] * p->q[0] - p->q[1] * p->q[1] - p->q[2] * p->q[2] + p->q[3] * p->q[3]);

```

Экспериментальная процедура, используемая для оценки точности фильтра, имеет ряд ограничений. Фильтр не был синтезирован для условия одновременного вращения вокруг более чем одной оси и скорости вращения были ограничены по величине и по времени [31].

### 3.4. Коррекция данных GPS-трека данными инерциальной навигационной системы



Предлагаемый метод обработки и анализа данных GPS-трека предназначен для уточнения информации о маршруте автомобиля. Метод основан на алгоритме устранения ошибок, имеющих место после получения траектории от глобальной навигационной системы. Введение дополнительной информации от акселерометра, гироскопа и компаса позволит уточнить траекторию движения между опорными точками траектории, полученной от GPS.

В соответствии с системой координат проекции Гаусса-Крюгера для построения траектории движения автомобиля данными от MPU-9520, выбираем неподвижную прямоугольную систему координат XOY, связанную с поверхностью Земли, в которой ось OY тоже направлена на восток, а ось OX направлена на север (рис.3.10).

Эксперимент проводился с использованием одновременно микросхемы MPU-9520 и приложения «**GPSAndAccelerometer**» при движении автомобиля по маршруту. Микросхема MPU-9520 измеряет значения ускорений движения и углов поворота, которые можно наблюдать средствами среды Code Composer Studio, и в конце маршрута сохраняет их в файл в память микроконтроллера (или на SD-карту памяти). В то же время приложение GPS снимает географические координаты.

### **3.4.1. Коррекция данных GPS-трека данными инерциальной навигационной системы**

Значения ускорения по направлению движения автомобиля от MPU-9520 используется для вычисления скорости при движении с постоянным ускорением по формуле:

$$v[k+1] = v[k] + a[k]\Delta t, \quad (3.2)$$

где  $v[k+1]$  — скорость в момент времени  $(k+1)$ ;  $v[k]$  — скорость в момент времени  $k$ ;  $a[k]$  — ускорение в момент времени  $k$ ;  $\Delta t$  — промежуток времени, за который данные обновляются,  $\Delta t$  принимает значение 0,1 с.

Однако при движении с постоянным ускорением проекция скорости не остается постоянной, и изменяется в зависимости от времени по линейному закону. Поэтому если считаем движение акселерометра за промежуток времени  $\Delta t$  прямолинейно, то его значение средней скорости равно:

$$\bar{v} = \frac{v_k + v_{k+1}}{2}, \quad (3.3)$$

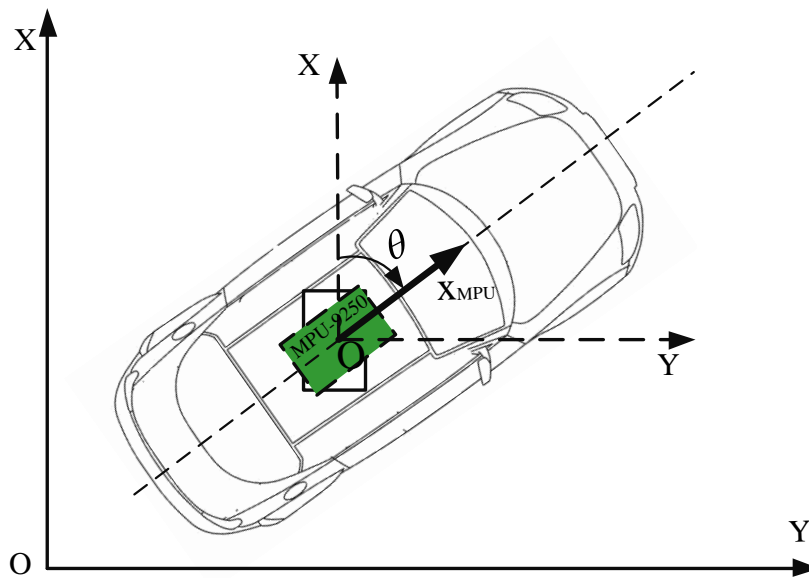
проекция скорости на ось координат OX равна:

$$v_x = \bar{v} * \cos \theta; \quad (3.4)$$

проекция скорости на ось координат OY равна:

$$v_y = \bar{v} * \sin \theta. \quad (3.5)$$

Углом  $\theta$  называется угол рыскания, составляющий между осью OX микросхемы (продольной осью автомобиля) и осью OX системы координаты, связанной с поверхностью Земли (рис.3.10).



**Рис. 3.10. Определение угла рыскания при движении транспортного средства**

Формулы (3.4) и (3.5) показывают, что проекции вектора скорости по координатам есть алгебраические величины, т.е. могут быть положительными,

отрицательными или равным нулю. Знак проекции определяется знаком косинуса (и синуса).

За промежуток  $\Delta t$  изменение координаты точки равно  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  и  $\Delta x = v_x \Delta t$ ,  $\Delta y = v_y \Delta t$ . Следует отметить, что скорости  $v_x$ ,  $v_y$  могут быть как положительной величиной, так и отрицательной. Поэтому изменение координаты  $\Delta x$  может быть как положительной, так и отрицательной.

При равномерном прямолинейном движении скорости изменения координат  $v_x = \frac{\Delta x}{\Delta t}$  и  $v_y = \frac{\Delta y}{\Delta t}$  не меняются за время  $\Delta t = 0,1$  с. В этом случае координата  $y$ , как и координата  $x$ , меняется с течением времени по линейному закону:

$$\begin{bmatrix} x[k+1] \\ y[k+1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x[k] + v_x[k+1]\Delta t \\ y[k] + v_y[k+1]\Delta t \end{bmatrix}. \quad (3.6)$$

На рис 3.11 видно, что первая часть GPS-трека находится в третьем квадранте, и составляет с осью ОХ угол  $\beta$ , определяемый по формуле:

$$\beta = \left| \text{atan} 2(y_{GPS}[k], x_{GPS}[k]) \right| + \pi / 2, \quad (3.7)$$

где  $y_{GPS}[k]$ ,  $x_{GPS}[k]$ : первые координаты GPS, которые отличаются от нуля. В расчете GPS было выбрано значение  $k = 51$ , соответственно  $y_{GPS}[k] = -0.857261$  м и  $x_{GPS}[k] = -1.30096$  м. Её направление взято для инициализации параметров инерциальной системы.

Из координат, вычисляемых по формулам (3.6) построена траектория всего маршрута по акселерометру, затем использовано координатное преобразование, чтобы поворачивать его координаты на угол  $\beta$  по часовой стрелке. Результаты показаны на рис. 3.12.

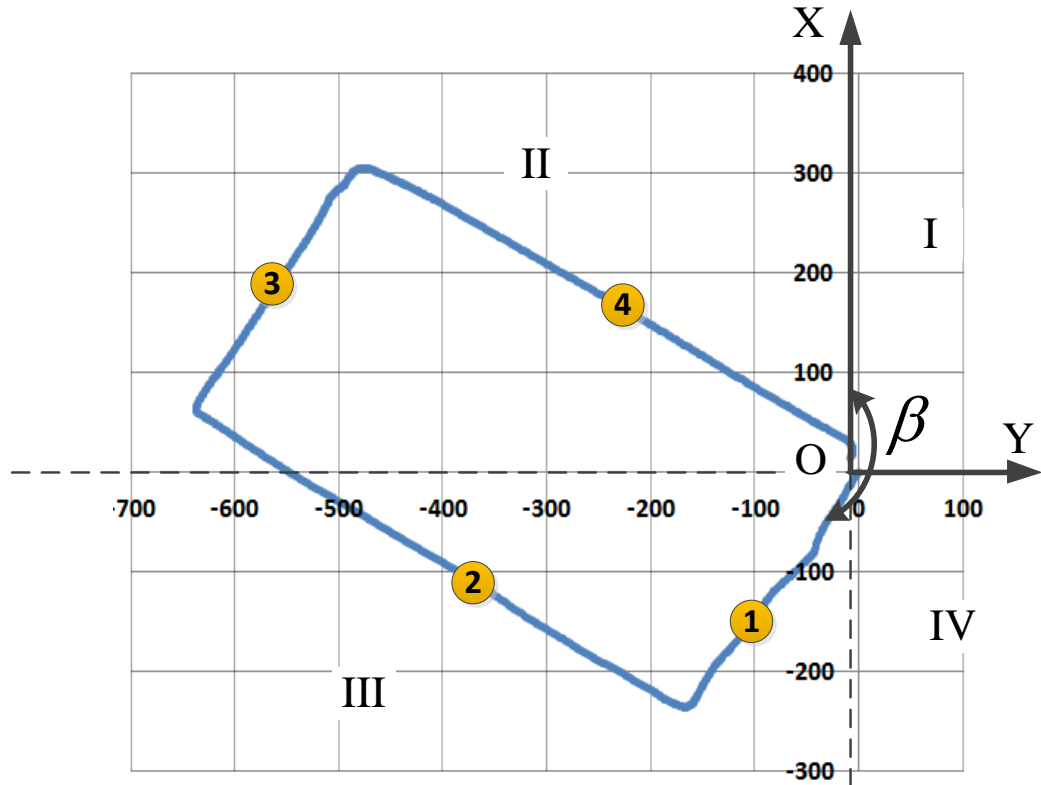


Рис. 3. 11. GPS-трек и угол  $\beta$

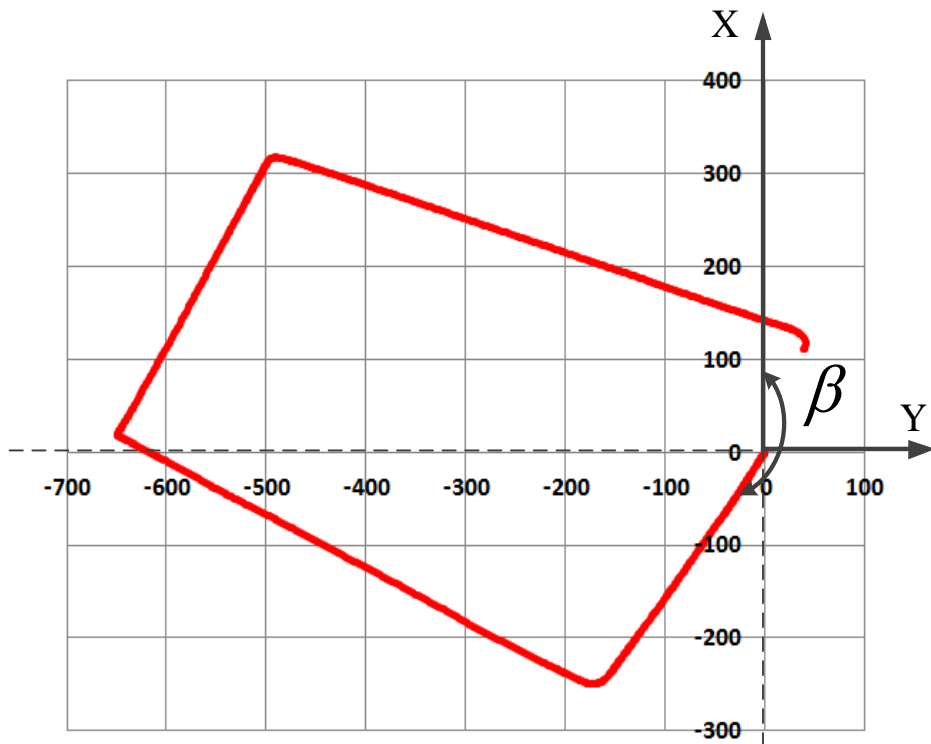
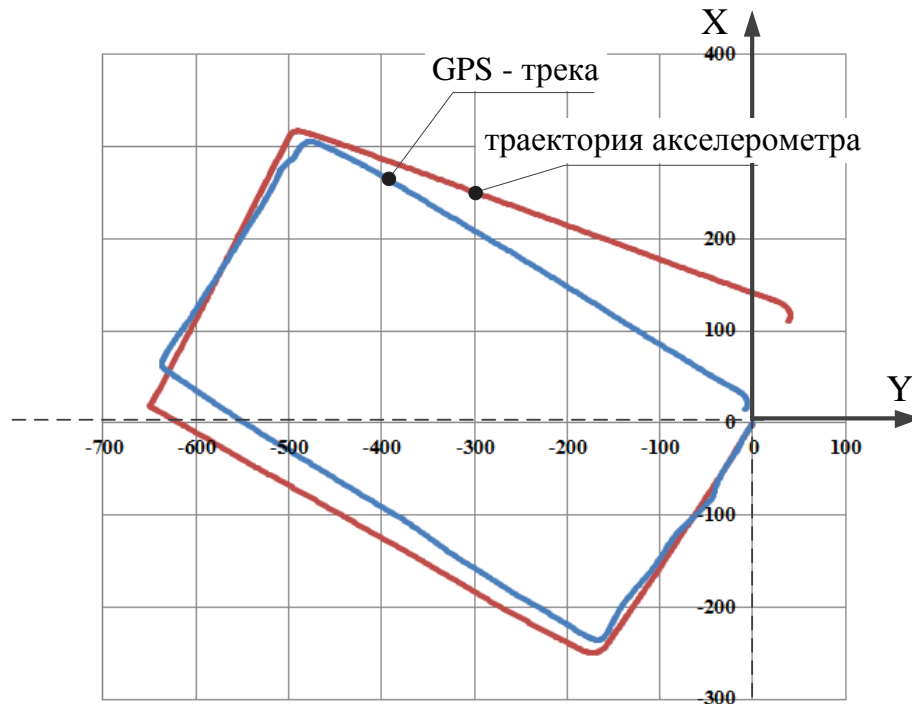


Рис. 3. 12. Траектория акселерометра после использования координатного преобразования



**Рис. 3. 13. GPS-трек и траектория акселерометра в одной системе координаты**

Из рис. 3.13 видно, что траектория акселерометра отличается от GPS-трека из-за явления гироскопического дрейфа и шумов, содержащихся в данных акселерометра и магнетометра, что приводит к накоплению ошибки в вычислении ориентации. Однако, при наличии интерполированной траектории, полученной от обработки GPS, которая содержит мгновенную ошибку положения, но не содержит ошибки накопления, данные по ускорению возможно скорректировать. Следя за отклонением траектории акселерометра от интерполированной траектории, ускорения могут быть скорректированы таким образом, чтобы ошибка интегрирования была нивелирована.

Скорректированную траекторию можно рассчитать с использованием следующих выражений:

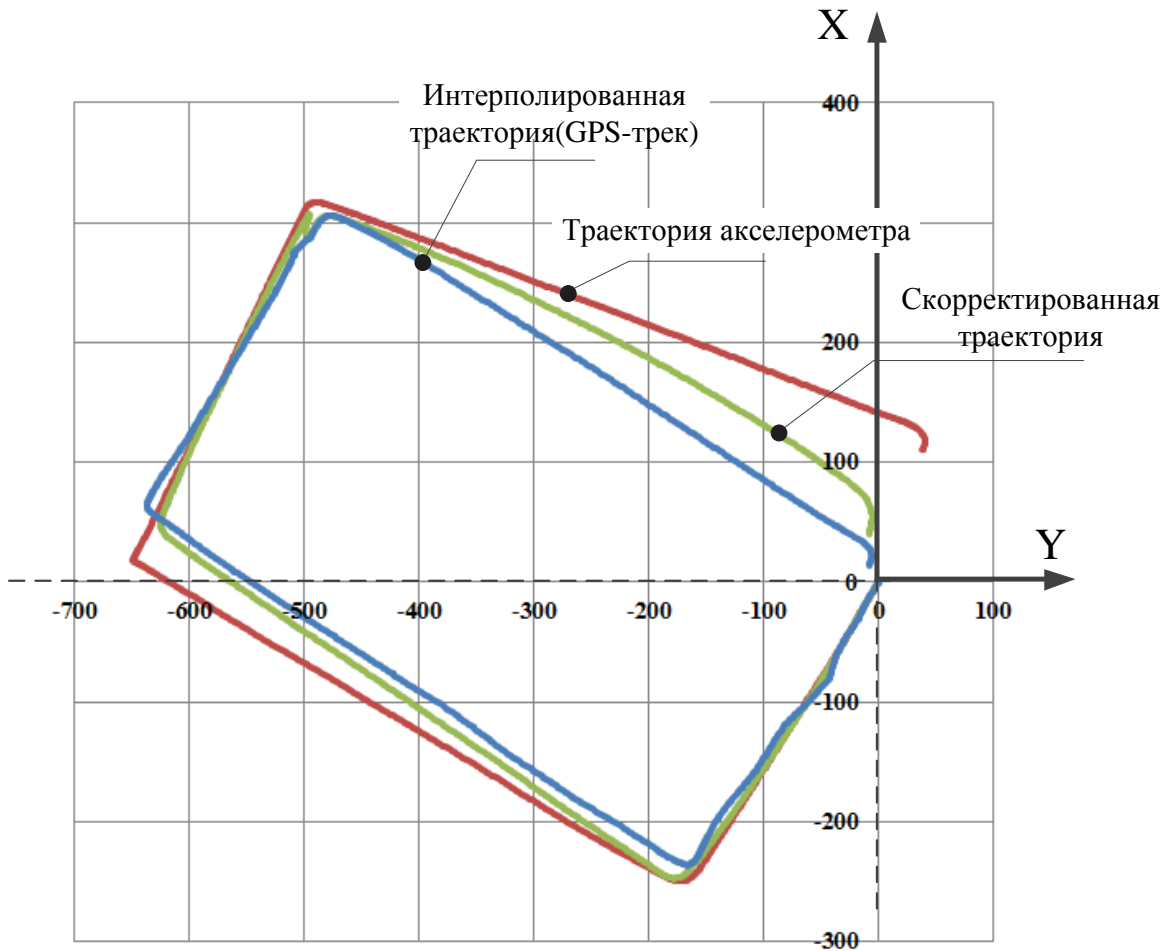
$$\begin{bmatrix} a_{xKop}[k+1] \\ a_{yKop}[k+1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{xАкс}[k+1] + K_{Kop} [x_{GPS}[k+1] - x_{Kop}[k]] \\ a_{yАкс}[k+1] + K_{Kop} [y_{GPS}[k+1] - y_{Kop}[k]] \end{bmatrix}; \quad (3.8)$$

$$\begin{bmatrix} v_{xKop} [k+1] \\ v_{yKop} [k+1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{xАкс} [k+1] + a_{xKop} [k] \Delta t \\ v_{yАкс} [k+1] + a_{yKop} [k] \Delta t \end{bmatrix}; \quad (3.9)$$

$$\begin{bmatrix} x_{Kop} [k+1] \\ y_{Kop} [k+1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{Kop} [k] + v_{xKop} [k+1] \Delta t \\ y_{Kop} [k] + v_{yKop} [k+1] \Delta t \end{bmatrix}, \quad (3.10)$$

где  $a_{xKop} [k+1]$ ,  $a_{yKop} [k+1]$  — ускорения скорректированной траектории в момент времени  $(k+1)$ ;  $a_{xАкс} [k+1]$ ,  $a_{yАкс} [k+1]$  — ускорения траектории акселерометра в момент времени  $(k+1)$ ;  $K_{Kop}$  — коэффициент коррекции;  $x_{Kop} [k]$ ,  $y_{Kop} [k]$  — координаты скорректированной траектории в момент времени  $k$ ;  $v_{xKop} [k+1]$ ,  $v_{yKop} [k+1]$  — скорости скорректированной траектории в момент времени  $(k+1)$ . Следует отметить, что коэффициент коррекции  $K_{Kop}$  определяет, насколько скорректированная траектория будет приближена к траектории GPS. Чем больше  $K_{Kop}$ , тем точнее скорректированная траектория проходит по интерполированной траектории.

Результат, полученный с коррекцией, показан на рис. 3.14



**Рис. 3.14. Исходные и скорректированная траектория**

### 3.4.2. Расчет нормальных и тангенциальных ускорений

Нормальное и тангенциальное ускорения необходимы для расчета параметров механической модели транспортного средства. Для простоты рассмотрим плоскую траекторию движения. Тангенциальное ускорение изменяет абсолютную скорость автомобиля, тогда как нормальное ускорение поворачивает его. Вектор скорости в полярной системе координат может быть оценен как:

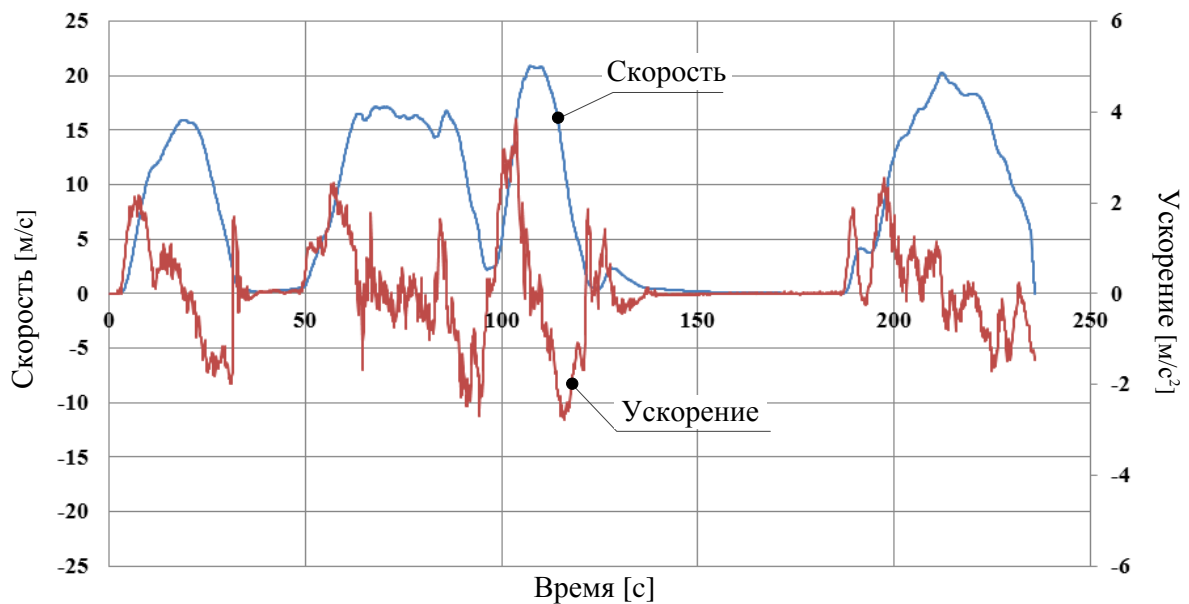
$$\begin{bmatrix} v \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{v_{xKop}^2 + v_{yKop}^2} \\ \text{atan 2}(v_{yKop}, v_{xKop}) \end{bmatrix}, \quad (3.11)$$

где  $v$  — абсолютное значение скорости и  $\theta$  — 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:

$$\begin{bmatrix} a_{T_{Kop}} \\ a_{N_{Kop}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{y_{Kop}} \cos \theta + a_{x_{Kop}} \sin \theta \\ -a_{y_{Kop}} \sin \theta + a_{x_{Kop}} \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (3.12)$$

На рис. 3.15 показаны графики тангенциального ускорения и абсолютного значения скорости в зависимости от времени для траектории движения, обозначенной зеленой линией рис. 3.14.



**Рис. 3.15. Значения скорости и тангенциальное ускорение**

### 3.5. Выводы по главе 3

В данной главе был рассмотрен и реализован метод коррекции траекторий движения ТС по показаниям акселерометра/гироскопа/магнитометра с целью улучшить точность траектории движения, полученной средствами GPS и обеспечить её достоверное поведение в интервалах между точками траектории от глобальной навигационной системы.

На базе контроллера МК19.2 (микроконтроллер TMS320F28335 фирмы Texas Instruments (TI) была реализована инерциальная навигационная система с



использованием микросхемы MPU-9250. Реализовано соответствующее ПО с обменом данных между контроллером и микросхемой MPU-9250 по двухпроводному последовательному интерфейсу I2C. ПО разработано в среде Code Composer Studio (CCS) от фирмы Texas Instruments (TI) на языке высокого уровня C/C++.

Реализован метод устранения систематических ошибок, к которым склонны данные акселерометра и гироскопа из-за явления гироскопического дрейфа и шумов, содержащихся в данных акселерометра и магнетометра. Для этих целей реализован фильтр Маджвика.

Разработан метод обработки и анализа данных глобальных навигационных систем при движении транспортного средства по маршруту с коррекцией информации с помощью акселерометра и гироскопа для получения нормального и тангенциального ускорения и уклона дороги на всём протяжении маршрута.

## ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ГИБРИДНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

### 4.1. Базовая модель транспортного средства

В этом разделе описывается модель ТС. ТС моделируется соответствующими динамическими дифференциальными уравнениями, которые получены из физических законов, описывающих его движение. Моделируется не только продольное движение вдоль линии, но и рассматривается движение по криволинейной траектории. Эта модель считается достаточно точной для изучения тягового привода ТС и объяснения, как полученные ускорения могут быть использованы для оценки требуемых параметров гибридной электрической трансмиссии.

Для определения перемещения ТС и параметров движения, то есть ускорения и скорости предполагается выбрать неподвижную систему координат  $XOZ$ , ось  $OX$  которой параллельна поверхности дороги, и направлена влево (рис. 4.1).

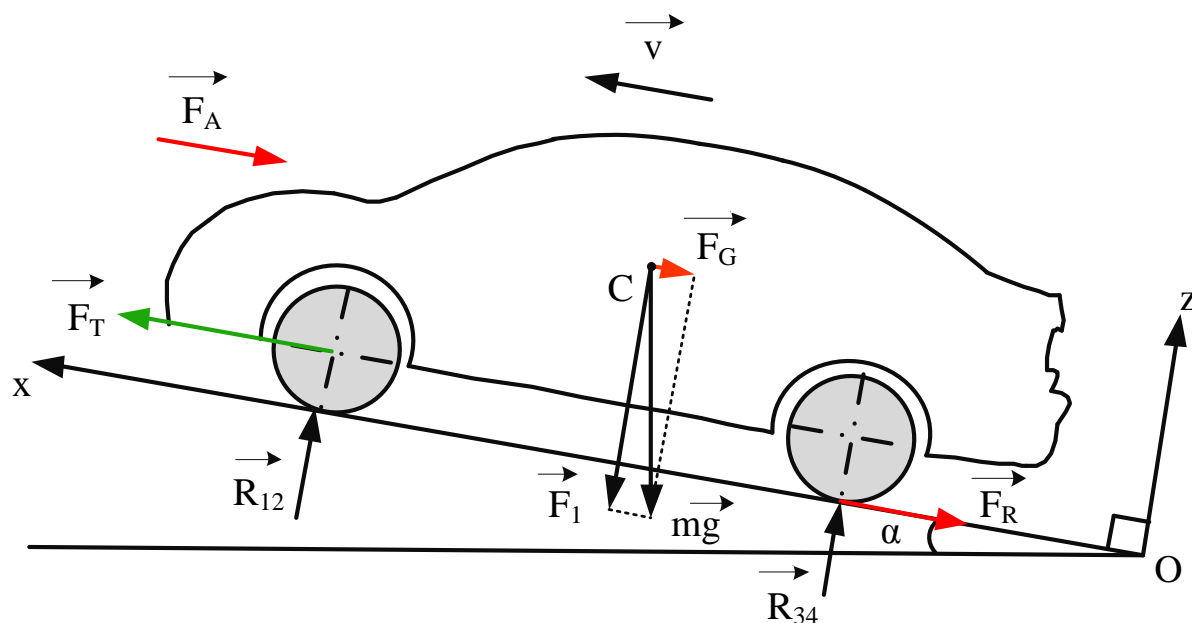


Рис.4.1. Внешние воздействия на ТС

Внешние силы действуют на движущееся ТС:

$$m\vec{a} = \vec{F}_T + m\vec{g} + \vec{F}_R + \vec{F}_A + \vec{R}_{12} + \vec{R}_{34}, \quad (4.1)$$

на ось OX и OZ описывается выражениями:

$$m \frac{a_T}{\cos \alpha} = F_T - F_G - F_R - F_A; \quad (4.2)$$

$$R_{12} + R_{34} = F_1, \quad (4.3)$$

где  $m\vec{g}$  — сила тяжести ТС;  $\vec{F}_A$  — аэродинамическое сопротивление (сила сопротивления воздуха);  $\vec{R}_{12}$ ,  $\vec{R}_{34}$  — нормальные реакции опорной поверхности на передние колеса и задние колеса, соответственно;  $\vec{F}_R$  — сила трения качения колес;  $\vec{F}_T$  — сила тяги ТС.

Из (4.2) можно определить тяговое усилие, которое необходимо развить колесам по формуле:

$$F_T = F_G + F_R + F_A + m \frac{a_T}{\cos \alpha}. \quad (4.4)$$

## 4.2. Учет сил сопротивления, действующих на ТС

### 4.2.1. Сила тяжести транспортного средства

Сила тяжести обусловлена массой ТС. Её вектор всегда приложен в центре масс ТС и совпадает по направлению с вектором  $\vec{g}$ . Она раскладывается на две составляющие

$$m\vec{g} = \vec{F}_1 + \vec{F}_G, \quad (4.5)$$

составляющая проекции силы тяжести на продольную ось транспортного средства  $\vec{F}_G$ , создаваемая силой тяжести, зависит от массы ТС и угла продольного уклона дороги. В зависимости от того, движется ли ТС на подъеме или на спуске, эта сила противодействует или способствует движению вперед. Таким образом, как показано на рис. 4.1 ТС, которое движется в гору,

подвержено влиянию силы, направленной против движения и рассчитывающейся как:

$$F_G = mg \sin \alpha; \quad (4.6)$$

составляющая  $\vec{F}_1$  перпендикулярна поверхности дороги, не воздействует на движение ТС, но влияет на силу трения качения и сцепления колес с дорогой. Она вычисляется по формуле:

$$F_1 = mg \cos \alpha, \quad (4.7)$$

где  $g$  — ускорение силы тяжести ( $m/c^2$ );  $m$  — масса ТС ( $кг$ );  $\alpha$  — угол наклона дороги ( $рад$ ).

#### 4.2.2. Сила трения качения

Сила трения качения обусловлена деформацией шины поверхностью дороги. Она определяется суммарной силой трения качения всех его колес:

$$F_k = \sum_{i=1}^n F_{ki} = \sum_{i=1}^n f_i R_i = f_k mg \cos \alpha, \quad (4.8)$$

где  $f_i$  — коэффициент трения качения колеса;  $n$  — количество колес ТС (для легковых автомобилей  $n = 4$ );

$R_i$  — нормальная реакция дороги на  $i$ -го колеса и определяется суммой нормальных реакций дороги на передние и задние колеса по формуле:

$$R_i = R_{12} + R_{34} = F_1 = mg \cos \alpha. \quad (4.9)$$

При движении ТС по неровностям дороги возникают колебания мостов и кузова ТС, что приводит к изменению нормальных реакций и увеличению гистерезисных потерь в шинах. Кроме того, необходимо учитывать потери в амортизаторах подвески кузова ТС. Эти дополнительные потери принято учитывать соответствующим увеличением коэффициента  $f_k$  [32].

$$f_k = f_0 [1 + (0.0216v)^2], \quad (4.10)$$

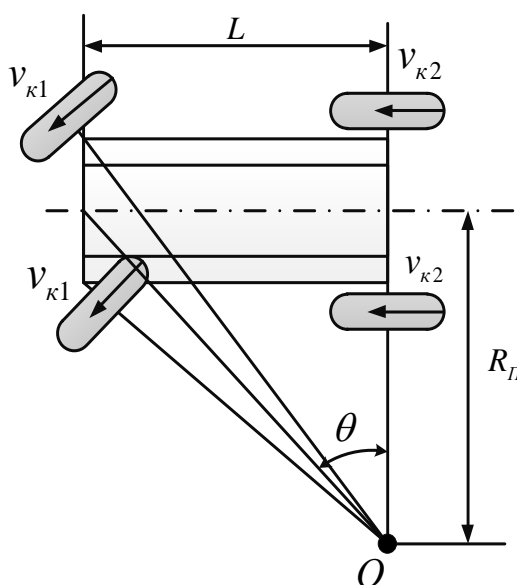
где  $f_0$  — коэффициент трения качения при движении ТС с малой скоростью в удовлетворительном состоянии асфальтобетонной дороги  $f_0 = 0,015 - 0,020$ ;  $v$  — скорость ТС ( $м/с$ ).

ТС практически все время движется по криволинейной траектории. Это обусловлено не только криволинейностью дороги, но и условиями движения. Условно прямолинейным движением называют движение по траектории с радиусом поворота более 500-1000 м. При меньшем радиусе поворота движение относят к криволинейному движению. Радиусом поворота траекторий называется расстояние от мгновенного центра вращения до продольной оси ТС, и рассчитывает по следующей формуле:

$$R_{\Pi} = \frac{L}{\operatorname{tg}\theta}, \quad (4.11)$$

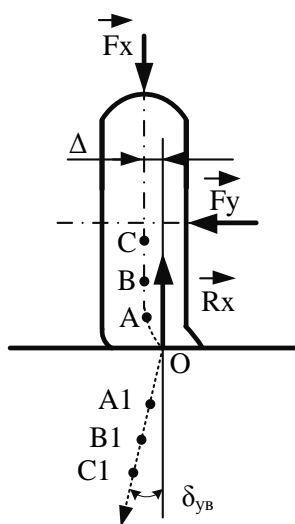
где  $\theta$  — средний угол поворота управляемых колес (рад);  $L$  — расстояние между осями мостов ТС ( $м$ ).

На рис. 4.2. показана схема поворота ТС при качении колес без бокового увода с радиусом поворота  $R_{\Pi}$ . Мгновенный центр вращения определяется точкой пересечения продолжений осей управляемых и неуправляемых колес.



**Рис. 4.2.** Схема поворота транспортного средства

При движении ТС на него всегда действует какая-либо поперечная сила, которая может быть составляющей силой тяжести при поперечном уклоне дороги; силой ветра; случайными воздействиями от неровностей дороги и др. Под действием этой силы возникает явление бокового увода, которое обусловлено отклонением вектора скорости колеса ТС от плоскости его вращения. Угол отклонения траектории движения колеса от плоскости вращения называют углом увода колеса  $\sigma_{yв}$  (рис 4.3). Этот угол может достигать  $7-8^{\circ}$ . Он соизмерим с углом поворота управляемых колес  $\theta$ , поэтому при повороте ТС может оказывать существенное влияние на изменение траектории движения [32].



**Рис 4.3. Качения колеса с уводом**

При качении с уводом кроме радиальной деформации шина деформируется также в боковом направлении, что приводит к увеличению потерь на качение. Значение коэффициента силы трения качения при уводе можно определить по формуле профессора В.А. Иларионова, которая имеет следующий вид [33]:

$$f_{yв} = f_k + \frac{k_{yв} \sigma_{yв}}{F_1}, \quad (4.12)$$

где  $k_{yв}$  — коэффициент сопротивления уводу колеса, который зависит от высоты и ширины профиля шины; угла наклона нитей, числа слоев и материал корда;

давления воздуха в шине; нормальной нагрузки; продольной реакции; типа и состояния дорожного покрытия. Значение коэффициента  $k_{y\phi} = 15 - 40 \text{ кН / рад}$  для легковых ТС, и  $k_{y\phi} = 60 - 120 \text{ кН / рад}$  для автобусов.

### 4.2.3. Аэродинамическое сопротивление

Силой сопротивления воздуха является аэродинамическое сопротивление, которое воздействует на движущееся ТС вперед. В основном зависит от двух основных явлений: вязкого трения и разности давлений между передней и задней частью ТС. Вязкое трение вызвано тем, что воздух, окружающий поверхность корпуса ТС, движется с другой скоростью, чем воздух дальше от ТС. В зависимости от формы ТС движение ТС вперед создает разницу давлений между воздухом в передней части ТС и то, что на задней части ТС. В результате чего аэродинамическая сила противоположна движению вперед. Следовательно, в общем случае аэродинамическая сила приближается к следующему выражению [8]:

$$F_A = \frac{1}{2} c_x \rho_B A_l v_{om}^2, \quad (4.13)$$

где  $v_{om}^2$  — скорость поток воздуха относительно корпуса ТС вычисляет по формуле:

$$v_{om} = v - v_\phi \cos \varphi, \quad (4.14)$$

где  $v$  — скорость ТС ( $\text{м / с}$ );  $v_\phi$  — скорость ветра.  $v_{om}^2$  имеет положительный для встречного ветра (рис.4.4, а) и отрицательный для попутного ветра (рис.4.4, б);

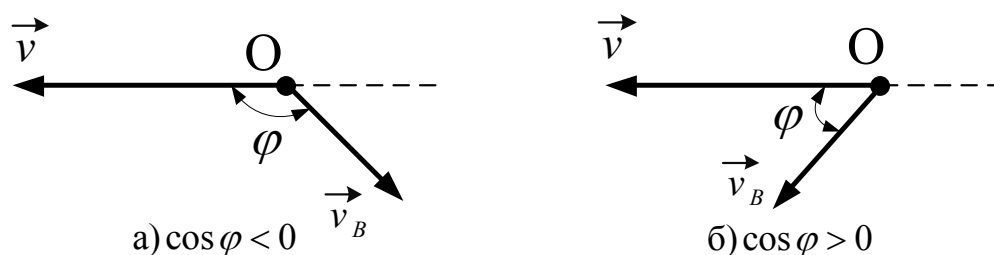


Рис. 4.4. Определение скорости потока воздуха относительно корпуса ТС

$A_n$  — лобовая площадь ТС, вычисляющая по формуле:

$$A_n = \alpha_n BH, \quad (4.15)$$

где  $\alpha_n$  — коэффициент заполнения площади ( $\alpha_n = 0,78 - 0,80$  для легковых ТС);  $B$  и  $H$  — наибольшие ширина и высота ТС соответственно (м);  $\rho_B$  — плотность воздуха ( $кг/м^3$ ),  $\rho_B = 1,225 кг/м^3$ ;

$c_x$  — коэффициент аэродинамического сопротивления, который можно оценить, например, экспериментами в аэродинамических трубах. Его значение зависит от формы транспортного средства,  $c_x$  принимает значение от 0,15 до 0,7.

При анализе силы аэродинамического сопротивления  $F_A$  можно разделить на несколько составляющих. Составляющая, зависящая от формулы корпуса, является сопротивлением формы, она может достигать 60% от  $F_A$ . Вторая составляющая называется сопротивлением поверхностного трения, она составляет до 10%. Выступающие части корпуса (фары, ручки, зеркала и др.) создают дополнительное сопротивление до 15% от  $F_A$ . Потoki воздуха в подкапотном пространстве двигателя и в салоне транспортного средства создают сопротивление до 15% от  $F_A$ . Кроме того, конфигурация капота, ветровое стекло, крышки, боковые стенки кузова, багажник... также значительно влияют на аэродинамическое сопротивление. Для уменьшения аэродинамического сопротивления применяют различные аэродинамические приспособления, чтобы улучшать обтекание корпуса ТС потоками воздуха [32, 33].

#### 4.2.4. Тяговое усилие

При движении ТС с переменной скоростью возникают силы инерции поступательно движущихся масс, которые при ускорении движения создают сопротивление движению. Следовательно, требует больше затрата энергии. Сила инерции поступательно движущихся масс ТС пропорциональна ускорению, а ее вектор имеет направление, которое противоположно вектору ускорения. Она вычисляется по формуле:



$$\vec{F}_p = -m\vec{a} = -m \frac{\vec{a}_T}{\cos \alpha}. \quad (4.16)$$

### 4.3. Пересчет траектории движения к координатам, связанным с положением транспортного средства в пространстве

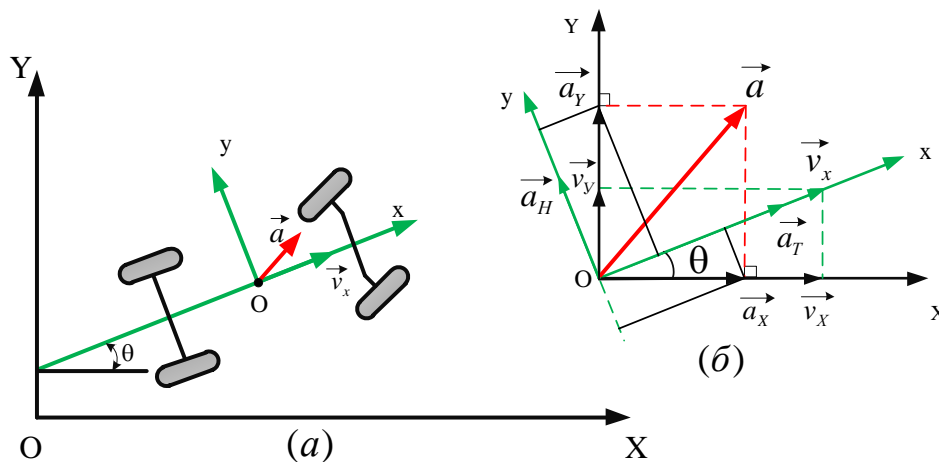
Принимаем ТС как твердое тело, движущееся по дороге в горизонтальной плоскости относительно неподвижной системы координат XOY (рис.4.5, а).

Для нахождения тангенциального и нормального ускорения ТС в подвижной системе координат xOy, оси которой повернуты относительно осей OX, OY на угол  $\theta$ , необходимо спроецировать составляющие  $a_x, a_y$  векторов ускорений по осям X, Y на оси x, y и сложить получившиеся проекции по каждой из осей, как это показано на рис. 4.5, б. Уравнения преобразования можно записать следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} a_T &= a_x \cos \theta + a_y \sin \theta; \\ a_N &= -a_x \sin \theta + a_y \cos \theta, \end{aligned} \right\} \quad (4.17)$$

где  $\theta$  — угол вектора скорости, который вычисляется по формуле:

$$\theta = \operatorname{atan} 2(v_x, v_y). \quad (4.18)$$



**Рис. 4.5. Определение ускорения транспортного средства при повороте путем координатного преобразования**

Тангенциальное ускорение определяет динамику ТС, а нормальное ускорение помогает скорректировать механическую модель. Во время движения коэффициент трения меняется в зависимости от положения рулевых колес. Нормальное ускорение определяет радиус поворота:

$$R_{\Pi} = \frac{v^2}{a_H}. \quad (4.19)$$

Кроме того, во время поворота транспорт получает некую угловую скорость

$$\omega_{\Pi} = \frac{v}{R_{\Pi}}, \quad (4.20)$$

и поэтому обладает некоторой кинетической энергией

$$W_{\Pi} = J \frac{\omega_{\Pi}^2}{2}, \quad (4.21)$$

которая первоначально являлась энергией линейного движения транспортного средства.

Мощность на валу тягового двигателя равна скалярному произведению вектора требуемого усилия (4.4) и вектора скорости ТС:

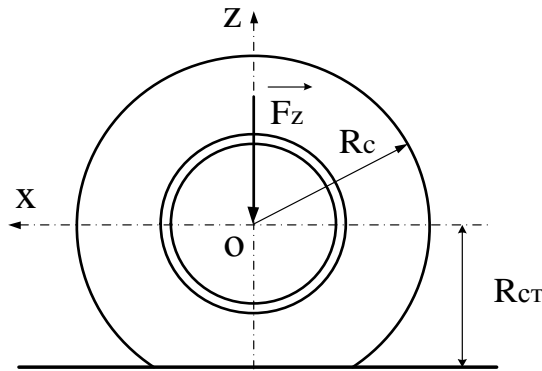
$$P = \vec{F}_T \vec{v} = F_T v \cos(\vec{F}_T, \vec{v}). \quad (4.22)$$

При движении ТС воздействия сил и моментов на колесо приводят к деформации эластичной шины, и параметры колеса изменяются (рис 4.6). Расстояние от центра катящегося колеса до опорной поверхности дороги при нагружении его нормальной нагрузкой называется динамическим радиусом колеса  $R_{\delta}$ , который можно оценить следующим образом:

$$R_{\delta} \approx R_c - h_z, \quad (4.23)$$

где  $h_z$  — нормальный прогиб шины, который можно находить с помощью графика зависимости нормального прогиба от нормальной нагрузки, для шины 205/55/R16  $h_z$  принимает значения в пределах 0,01–0,025 м [32];

$R_c$  — свободный радиус колеса равен половине наибольшего наружного диаметра шины без нагрузки. Размер используемых шин 205/55/R16 (205 — ширина профиля, 55 — отношение ширины профиля к высоте в процентах, 16 — диаметра диска в дюймах).  $R_c = (205 \cdot 0.55 \cdot 2 + 16 \cdot 25.4) / 2 \cdot 10^{-3}$  м.



**Рис. 4.6. Действие на колесо нормальной нагрузки**

Таким образом, момент на валу тягового двигателя можно оценить, если известен радиус колес  $R_0$  и передаточное отношение редуктора  $i$  по следующей формуле:

$$M = \frac{P}{i\nu} R_0. \quad (4.24)$$

#### 4.4. Механическая модель ТС

Для определения потребляемой мощности ТС и ее изменения по всей траектории с помощью рассмотренных формул (4.4), (4.10), (4.12), (4.13), (4.15) была создана механическая модель ТС в среде Matlab Simulink. Механическая модель (рис. 4.9) состоит из четырех основных блоков Matlab-function, вычисляющих коэффициент трения качения, как при прямолинейном движении, так и при криволинейном движении; лобовую площадь ТС; аэродинамическую силу; силу двигателя.

В качестве ТС в эксперименте использован автомобиль типа Форд Фокус модель 2012 года выпуска. Его параметры для моделирования в среде Matlab показаны в таб. 4.1.

Таб. 4.1. Параметры для моделируемого ТС

| Параметры                                                                                   | Значение    | Размерность       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------------|
| Масса транспортного средства (m)                                                            | 1348        | кг                |
| Гравитационное ускорение (g)                                                                | 9,81        | м/с <sup>2</sup>  |
| Коэффициент трения качения в удовлетворительном состоянии асфальтобетонной дороги ( $f_0$ ) | 0,015-0,02  | -                 |
| Плотность воздуха ( $\rho_B$ )                                                              | 1,225       | кг/м <sup>3</sup> |
| Коэффициент аэродинамического сопротивления ( $c_x$ )                                       | 0,3         | -                 |
| Наибольшая ширина ТС (B)                                                                    | 2,010       | м                 |
| Наибольшая высота ТС (H)                                                                    | 1,451       | м                 |
| коэффициент заполнения площади ( $\alpha_n$ )                                               | 0,78 – 0,80 | -                 |

Мощность на валу тягового двигателя равна произведению требуемого усилия и скорости ТС по формуле (4.22). На рис. 4.7 и 4.8 показана мощность, которую развивал автомобиль во время движения, пики потребления при ускорении, значения средней мощности при постоянной скорости, и области, где возможна рекуперация при торможении.

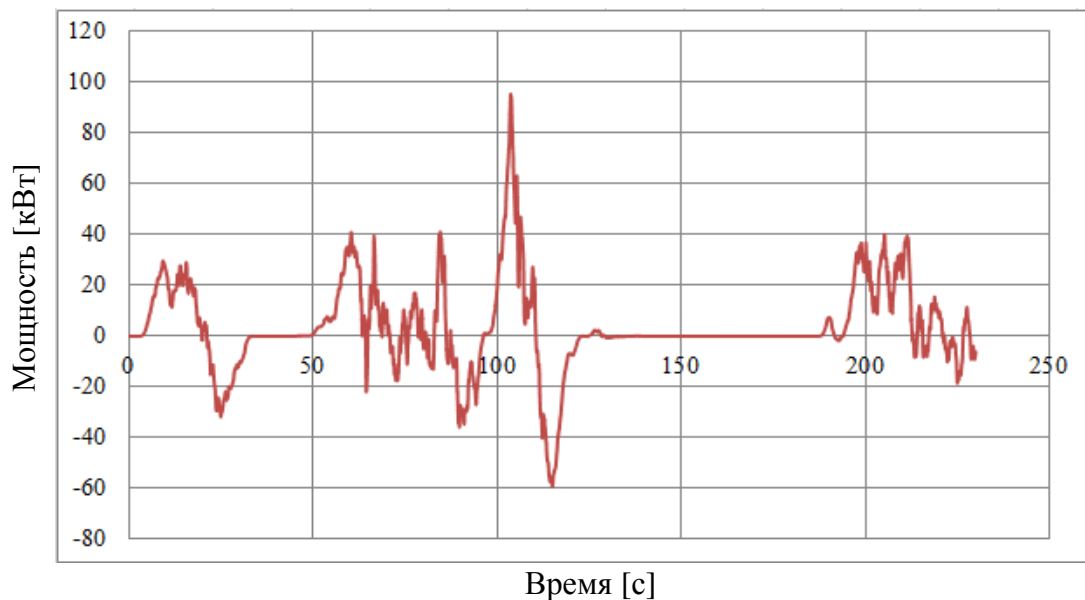
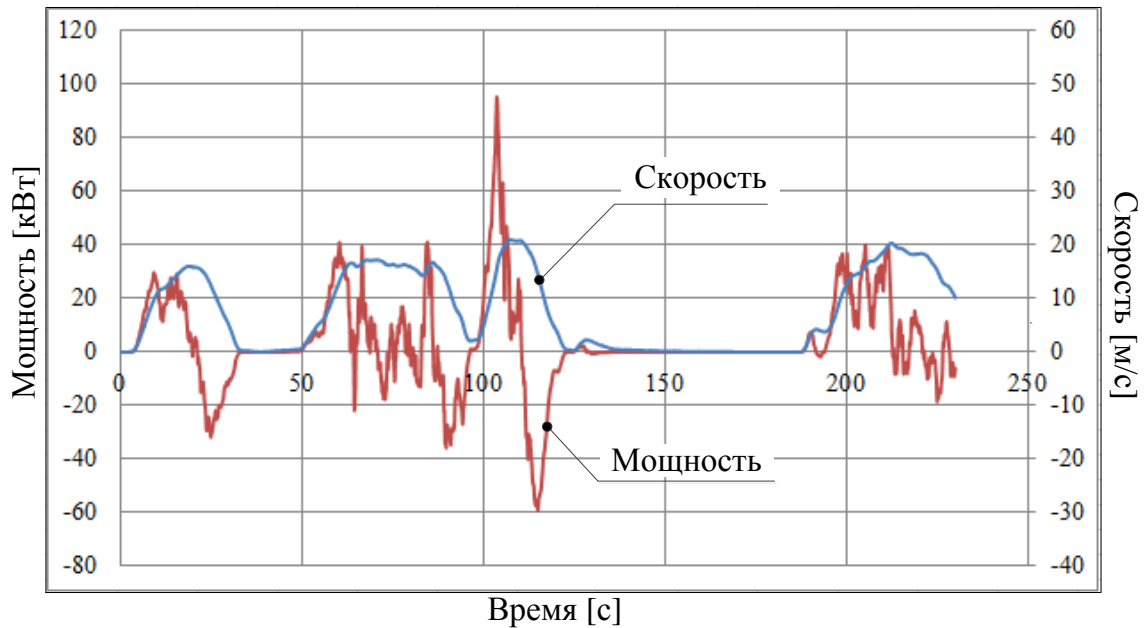


Рис. 4.7. Требуемая мощность на валу тягового двигателя



**Рис. 4.8. График скорости и мощности на исследуемой траектории ТС**

#### 4.5. Выводы по главе 4

Рассмотрена механическая модель автомобиля и внешние силы, действующие на автомобиль как в прямолинейном движении, так и по криволинейной траектории. Тангенциальное ускорение определяет тяговое усилие, которое должен развивать электродвигатель, а произведение усилия на текущую скорость — мощность. Показано, что при криволинейном движении появляется нормальное ускорение, которое вызывает явление бокового увода и происходит увеличение потерь на качение.

Выполнен пересчет траектории движения к координатам, связанным с положением транспортного средства в пространстве путем использования координатного преобразования для нахождения тангенциального и нормального ускорения транспортного средства в подвижной системе.

Разработана механическая модель транспортного средства для оценки необходимого тягового усилия и мощности на валу двигателя, которые позволяют моделировать и оптимизировать параметры гибридных и электрических трансмиссий.

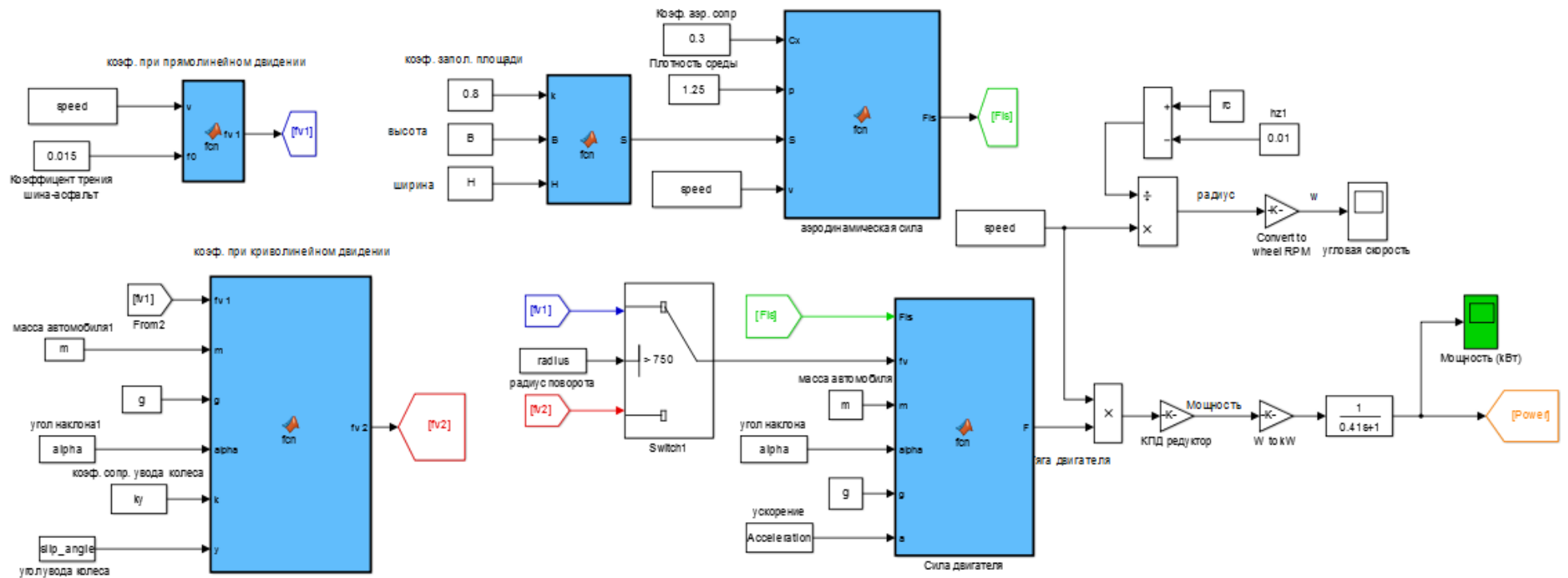


Рис. 4.9. Механическая модель ТС в среде Matlab Simulink

## **ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ГИБРИДНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ НА МАРШРУТЕ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА**

### **5.1. Составляющие гибридной трансмиссии**

Гибридное транспортное средство представляет собой комбинацию элементов, объединенных между собой силовым и информационным каналами. В последовательных гибридных транспортных средствах силовой канал представляет собой общее звено постоянного тока, к которому подключаются такие компоненты как система «ДВС-генератор-выпрямитель», накопители энергии с силовыми преобразователями (при необходимости), тяговые электроприводы и др. [39].

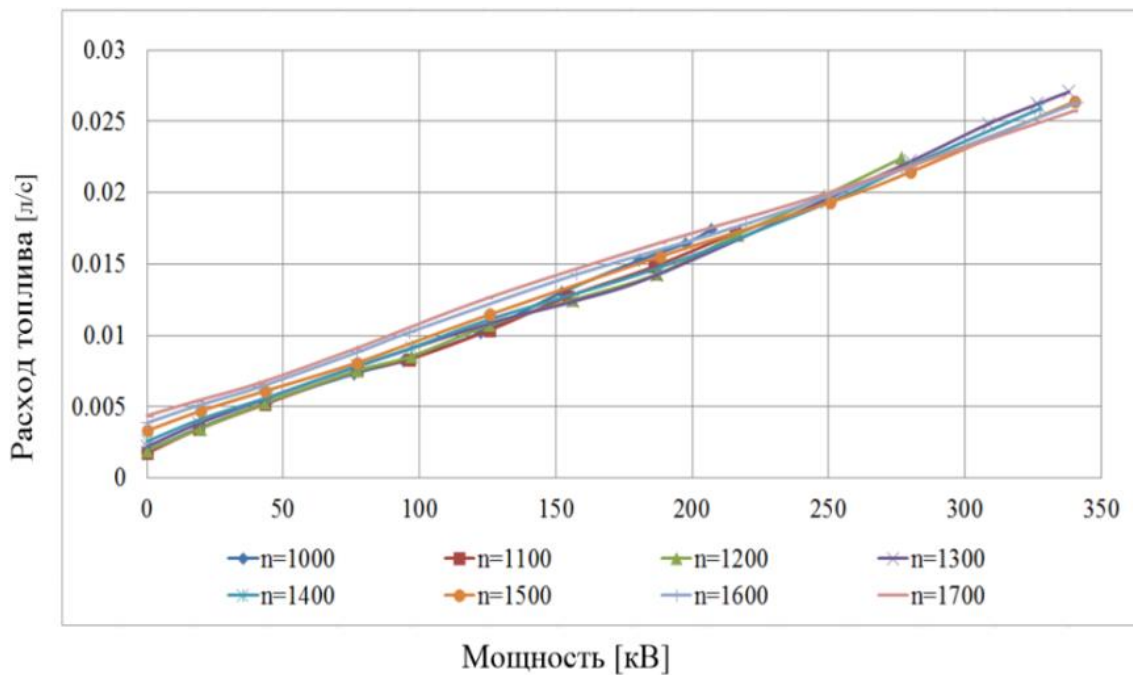
#### **5.1.1. Система выработки электроэнергии**

В основном для производства электроэнергии на борту ТС применяется установка «ДВС-генератор-выпрямитель». Источником первичной энергии может быть бензин, дизельное топливо или газ. Сгорая, топливо вращает вал ДВС и генератор, вырабатывающий электроэнергию [40]. Так как генератор, как правило, является трехфазной электрической машиной переменного тока, то для питания постоянным током общего звена постоянного тока применяют неуправляемый выпрямитель или активный выпрямитель. Применение активного выпрямителя позволяет не только получать энергию от ДВС, но и при необходимости направлять в него излишки энергии, поступающие на звено постоянного тока в процессе торможения ТС. Такой режим называется — «торможение двигателем» и часто применяется, чтобы снизить нагрузку на тормозные резисторы. Кроме того, применение активного выпрямителя позволяет производить запуск ДВС, прокручивая его генератором в стартерном режиме.

Производительность генераторной установки определяют изменением подачи топлива ДВС. В зависимости от типа генератора и силового преобразователя изменение производительности может осуществляться как при

относительно постоянной скорости вращения ДВС (для неуправляемого выпрямителя и синхронного генератора с постоянными магнитами), так и с изменением скорости вращения, если применен активный выпрямитель или генератор с регулируемым возбуждением.

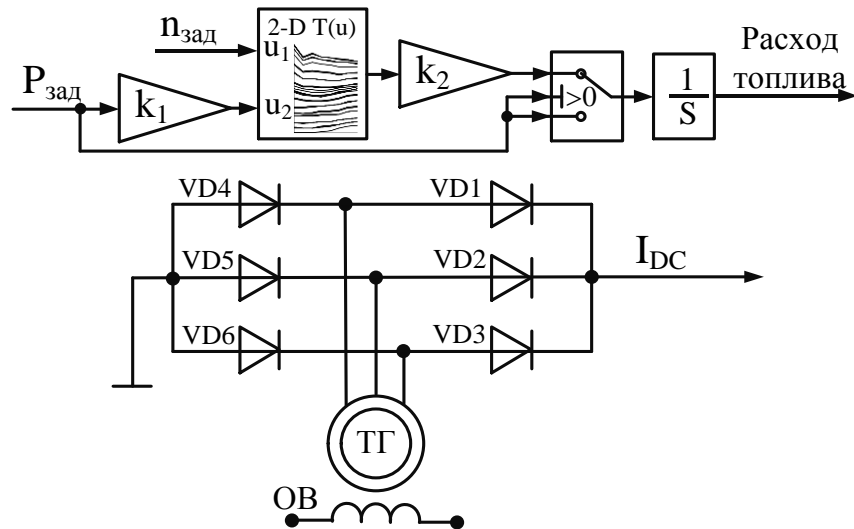
В зависимости от нагрузки и скорости работы ДВС потребляет разное количество топлива. На рис. 5.1 представлены характеристики установки «ДВС-генератор» мощностью до 350 кВт. Из представленных зависимостей для разных скоростей видно, что при высоких нагрузках более эффективно повышать скорость вращения ДВС. На низких нагрузках, наоборот, следует снижать частоту вращения, чтобы исключить вентиляционные потери и потери от трения.



**Рис. 5.1. Зависимость расхода топлива от мощности при разных оборотах вращения**

Показанные на рис. 5.1 зависимости заложены в модель и ДВС-генераторной установки, представленной на рис. 5.2. 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.





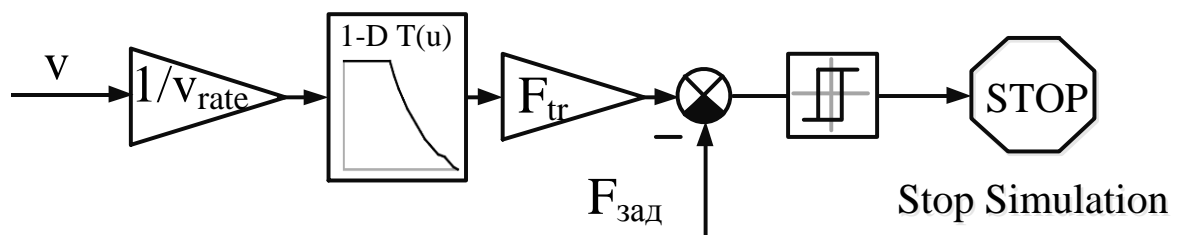
**Рис. 5.2. Модель «ДВС-генератор»**

В современных гибридных ТС также начинают применяться топливные элементы, которые позволяют получать электрическую энергию для питания трансмиссии без промежуточного преобразования в механическую. Так, первая серийная машины, использующая топливный элемент, — Toyota Mirai. Эта машина заправляется водородом, который преобразуется в электричество путем химической реакции.

### 5.1.2. Электродвигатели в гибридных ТС

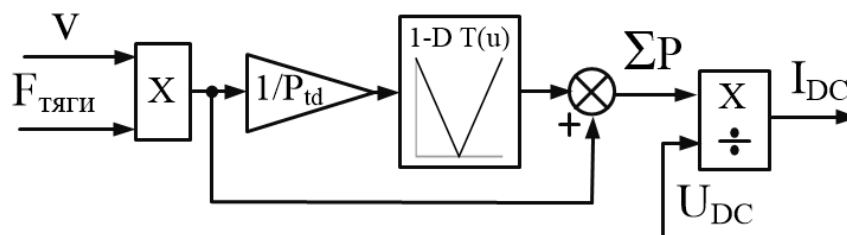
В качестве тяговых используются практически все виды электрических машин. С самого начала наибольшую популярность получили двигатели постоянного тока, которые до сих пор устанавливаются на некоторые локомотивы. В настоящее время более 99% всех тяговых электродвигателей составляют двигатели переменного тока. Асинхронный двигатель применяется в железнодорожном транспорте, карьерных самосвалах, трамваях, троллейбусах и метро. Синхронные машины с постоянными магнитами получили широкое применение в электромобилях, где мощность не велика, но в настоящее время начинают проникать в крупную технику. Наибольшим сдерживающим фактором в проникновении синхронных машин является цена постоянных магнитов.

Тяговый привод обеспечивает два основных режима работы. На низких скоростях — это режим постоянства момента при растущей пропорционально скорости мощности, а на высоких скоростях — это режим постоянства мощности. В данной задаче модель тягового электропривода уже содержит в себе силовой преобразователь и двигатель и имеет некоторую предельную характеристику, которую может обеспечить электропривод. Задача модели определить, обеспечивает ли данный тяговый электропривод необходимое тяговое усилие на всём протяжении маршрута или нет. На рис. 5.3. представлена модель для проверки тягового электропривода. Скорость поступает на вход модели. 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. Иначе, когда усилия хватает для перемещения ТС по заданной траектории, производится моделирование энергетической подсистемы по модели рис. 5.4.



**Рис. 5.3. Блок проверки реализуемости тягового усилия**

Путем перемножения силы тяги и скорости движения получается мощность тягового привода, которая с учетом потерь в приводе (рис. 5.4), делится на напряжение звена постоянного тока, что позволяет вычислить ток звена постоянного тока.



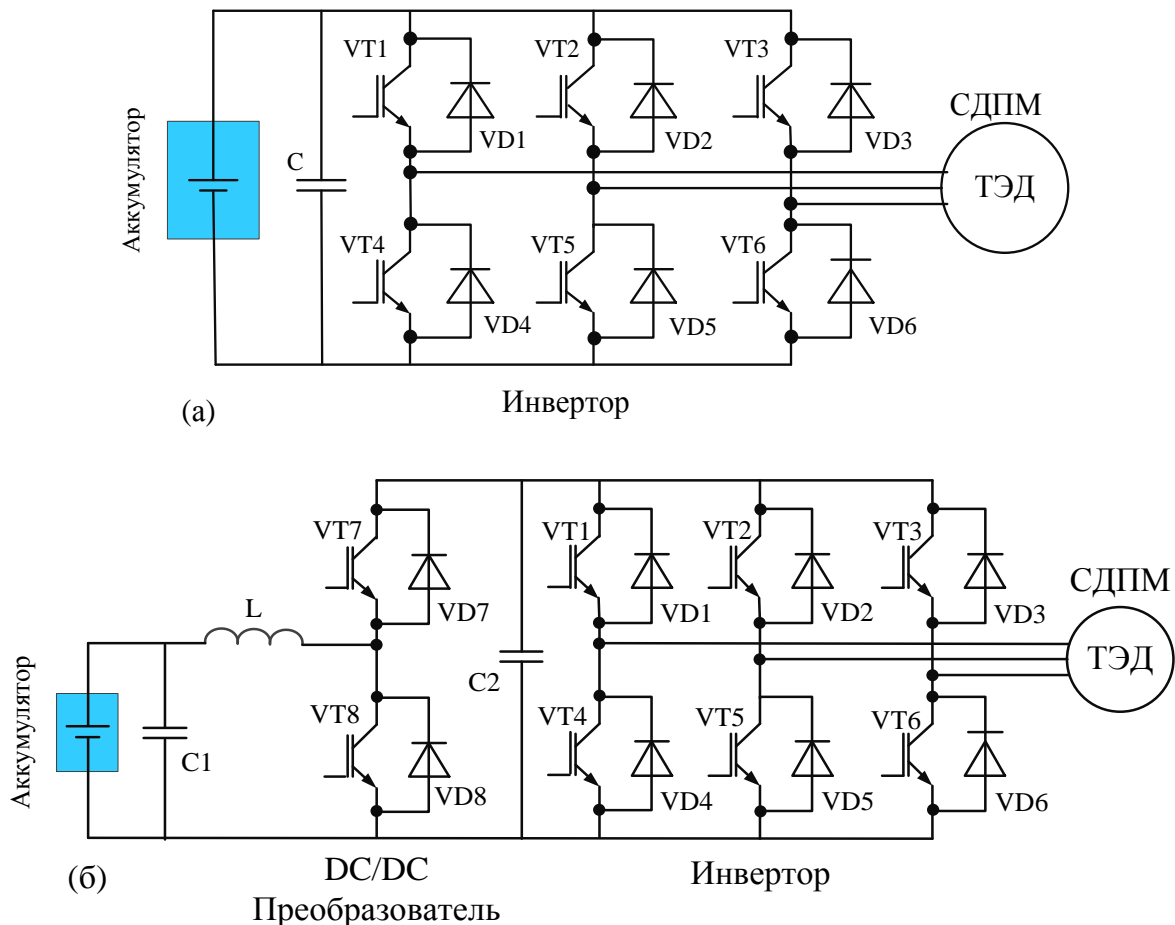
**Рис. 5.4. Вычисление тока звена постоянного тока, создаваемого тяговым электроприводом.**

### 5.1.3. Устройства хранения энергии в гибридных ТС

Существуют два принципиально разных типа накопителей энергии, применяемые в гибридных транспортных средствах. Это накопители с условно постоянной ЭДС источника и с переменной. К первому типу можно отнести аккумуляторные батареи, напряжение питания которых несущественно изменяется во всём диапазоне изменения хранимого заряда. Ко второму типу относят накопители, в которых напряжение меняется в функции накопленного заряда, такие как суперконденсаторы или системы с кинетическим накоплением энергии. Разница между первым и вторым типом накопителей заключается в том, что первые допускаются использовать, подключая их в буферном режиме на звено постоянного тока, а для подключения вторых потребуется согласующий силовой преобразователь.

Традиционно считается, что аккумуляторные батареи имеют большую ёмкость, чем суперконденсаторы или маховиковые накопители, но не могут принимать или отдавать мощность пиковую мощность, требуемую тяговым электроприводом. Для работы с пиковыми нагрузками предпочтительнее использовать маховиковые накопители и суперконденсаторы. Однако в последнее время технологии аккумуляторных батарей ушли вперед и сейчас уже небольшого объема батарея может без существенного снижения срока службы принимать или отдавать ток до 10С. А, например, литийтитанатные аккумуляторы работают без снижения характеристик с токами до 20С.

На рис. 5.5 представлено два варианта включения аккумуляторной батареи к тяговому электроприводу. В первом случае (рис. 5.5а) аккумулятор подключается в буферном режиме. Соответственно энергия может перетекать в любом направлении без дополнительного преобразования. При разгоне ТС она отбирается от аккумуляторной батареи, а при торможении — возвращается. Если по каким-либо причинам уровень напряжений аккумуляторной батареи и тягового электропривода оказался несогласован, то необходима установка промежуточного DCDC-преобразователя, как показано на рис. 5.5б. Следует отметить, что такой вариант требует установки силового преобразователя на полную мощность, что удорожает стоимость трансмиссии, а двойное преобразование энергии снижает общий КПД трансмиссии.



**Рис. 5.5. Подключение аккумулятора к тяговому электроприводу в составе гибридного ТС**

Аккумуляторная батарея состоит из ячеек, которые соединены последовательно или параллельно, чтобы достичь желаемого напряжения и емкости. Ячейка представляет собой элементарный источник энергии, которая вырабатывается или поглощается путем химической реакции.

Основными параметрами аккумуляторной батареи являются: энергия, мощность, срок службы, безопасность и стоимость. Энергия, запасенная в аккумуляторной батарее, определяет пробег ТС на одной зарядке, а так как доступное пространство внутри ТС ограничено, производители гибридных автомобилей уделяют много внимания на разработки аккумуляторов с большой плотностью энергии ( $\text{Вт}\cdot\text{ч}/\text{л}$ ) или ( $\text{Вт}\cdot\text{ч}/\text{кг}$ ).

Свинцово-кислотные батареи использованы в ранних поколениях гибридных ТС. Однако из-за необратимых физических изменений в электродах количество зарядов ограничивается от нескольких сотен до 2000 раз. Основными недостатками этих аккумуляторов являются их низкая плотность энергии, длительное время зарядки, высокий саморазряд и необходимость тщательного обслуживания.

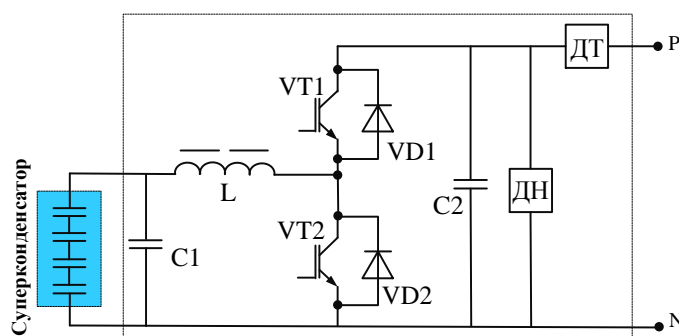
Литий-ионные батареи имеют преимущества по сравнению с другими типами, которые обеспечивают большую разрядную мощность и более высокую плотность энергии для увеличения дальности пробега гибридных ТС. Тем не менее, необходимо решить некоторые проблемы, включая срок службы, стоимость и безопасность, возможность работы при низких температурах. Одной из важных проблем с литий-ионными батареями является необходимость выравнивания заряда каждой ячейки для более точного баланса общего заряда между ячейками по сравнению с другими аккумуляторами. В настоящее время в гибридных ТС Toyota Prius PHV применяется литий-ионная батарея на 95 ячеек с напряжением 351,5 В и емкостью 25 А·ч и вспомогательная на 12В (35 А·ч, 45 А·ч, 51 А·ч).

Суперконденсаторы обладают меньшей удельной емкостью, чем аккумуляторы, но могут многократно перезаряжаться, отдавать энергию

практически мгновенно с высокой пиковой мощностью. Они могут применяться для приёма энергии, выделяющейся при торможении. Накопленная энергия в дальнейшем используется для компенсации пиковых нагрузок в начале движения и при ускорении, что позволяет увеличить экономичность и снизить нагрузку на основной источник энергии.

При заряде и разряде напряжение суперконденсатора изменяется в широком диапазоне. Как правило, рабочее напряжение суперконденсаторов не должно быть выше номинального значения, указанного в техническом описании. Перенапряжение может привести к пробое суперконденсатора и сокращению срока службы. Также как аккумуляторные батареи, у суперконденсаторов существует нижний предел рабочего напряжения (переразряд), который не может быть равен нулю. Диапазон рабочего напряжения суперконденсаторов обычно принимает значение  $(50\%–100\%)U_n$  или  $(25\%–100\%)U_n$ .

Из-за широкого диапазона рабочих напряжений питать тяговые электродвигатели гибридных ТС от суперконденсатора можно только через регулируемый преобразователь. Обычно суперконденсатор подключается к ЗПТ через повышающий преобразователь (рис 5.6). Такой преобразователь имеет ограничение по максимальному напряжению суперконденсатора, которое будет равно напряжению питания ЗПТ. Кроме того, ток заряда и разряда суперконденсатора ограничен возможностями транзисторов силового преобразователя.



**Рис. 5.6. Функциональная схема силового преобразователя суперконденсаторного накопителя**

Модель суперконденсаторного накопителя энергии и его силового преобразователя (рис. 5.7) 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.

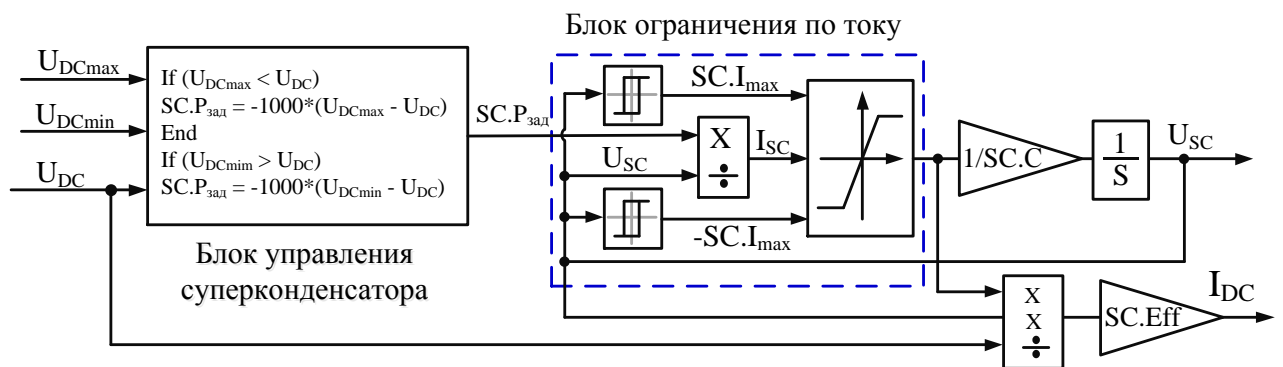
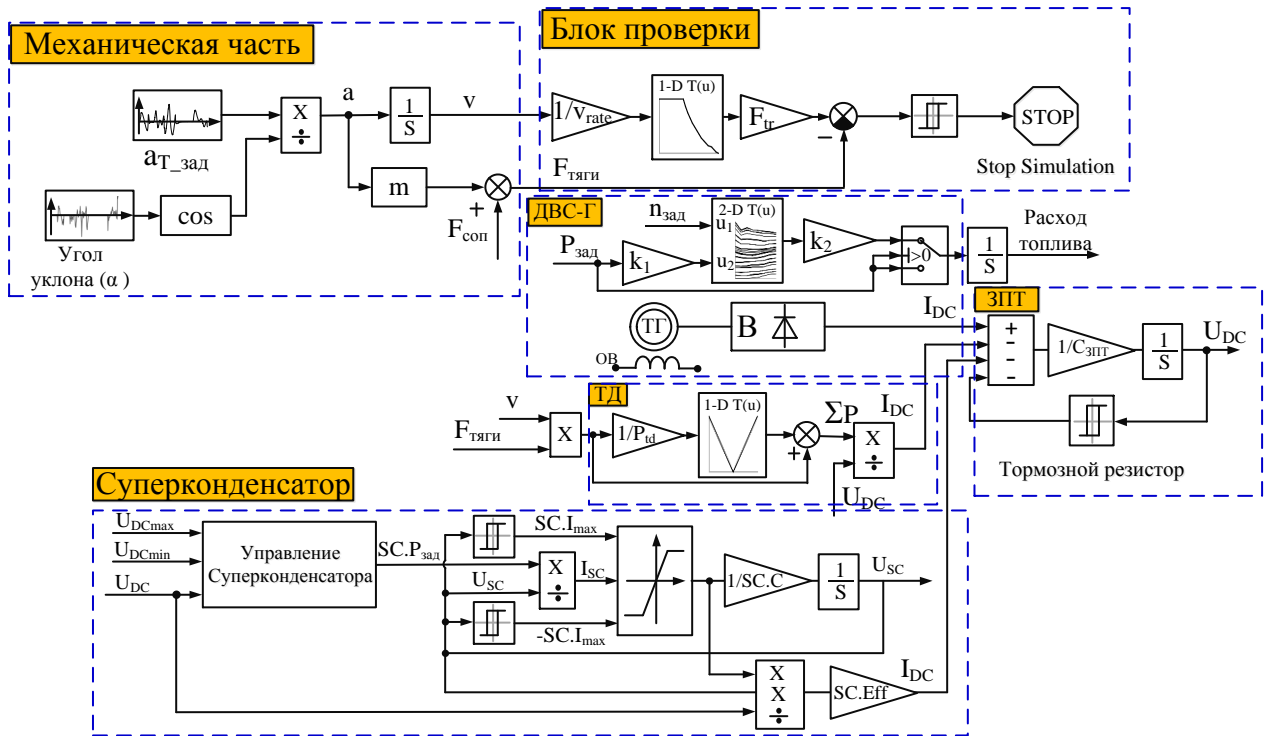


Рис. 5.7. Модель суперконденсаторного накопителя энергии

## 5.2. Моделирование маршрута перемещения гибридного ТС из условия полного использования энергии торможения в системе накопления энергии

### 5.2.1. Функциональная схема модели гибридного электрического транспортного средства

Функциональная схема модели электрического гибридного ТС последовательного типа показана на рис. 5.8.



**Рис. 5.8. Функциональная схема модели гибридного электрического ТС**

Она состоит из следующих основных компонент:

1. Системы «ДВС – генератор»,
2. Механическая часть,
3. Тяговый электродвигатель,
4. Накопитель энергии (суперконденсатор),
5. Тормозной резистор.

### 5.2.1.1. Механическая часть

Схема механической части (рис. 5.9), принимает на вход траекторию движения, представленную 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. Для исследуемой траектории движения были построены графики скорости, мгновенной мощности и силы тяги ТС (см. рис. 5.10).



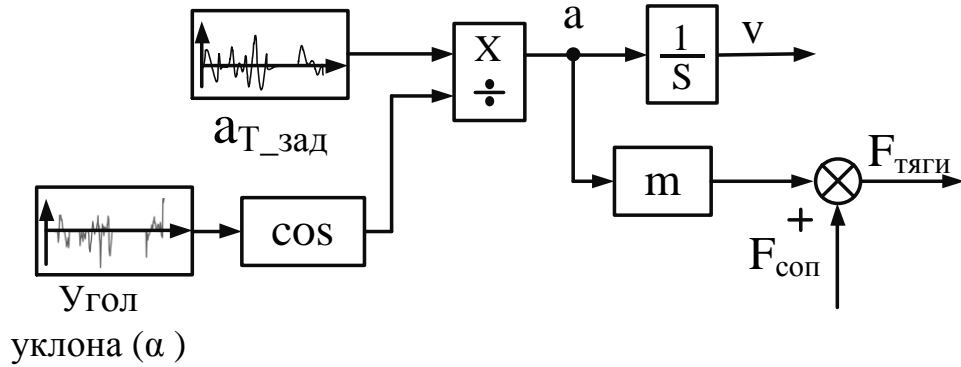


Рис. 5.9. Механическая часть

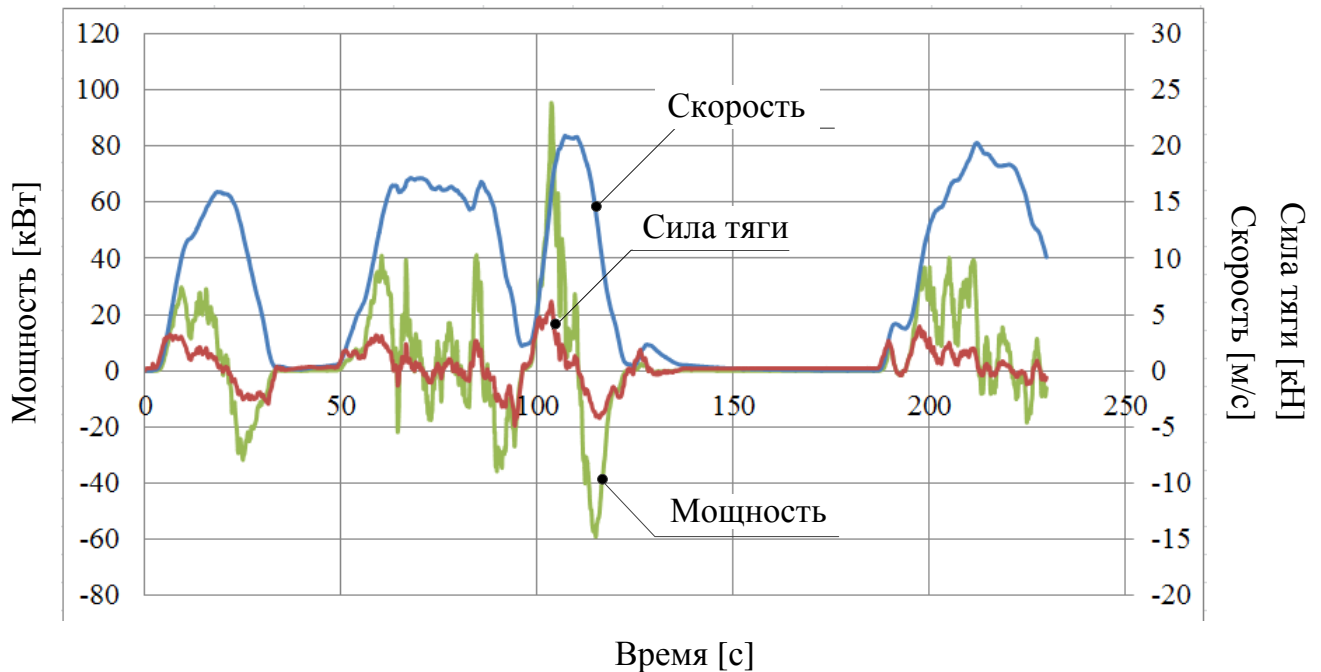


Рис. 5.10. График скорости, силы тяги и мощности для исследуемой траектории движения ТС

### 5.2.1.2. Суперконденсаторный накопитель энергии

Предполагая варьировать рабочее напряжение от  $25\%U_H$  до  $100\%U_H$ , Запасённая энергия в суперконденсаторе зависит как от ёмкости, так и от напряжения заряда и вычисляется по формуле:

$$W_1 = \frac{c(U_{max1}^2 - U_{min1}^2)}{2} = \frac{c(1^2 - 0,25^2)U_H^2}{2} = \frac{c(1 - 0,0625)U_H^2}{2} = 0,46875cU_H^2 \text{ (Дж)}, (5.1)$$

и максимальный ток:

$$I_{max1} = \frac{P_{ск}}{U_{мин1}} = \frac{P_{ск}}{0,25U_H} \text{ (А)}, \quad (5.2)$$

а если рабочее напряжение от 50%  $U_H$  до 100%  $U_H$ ,

$$W_2 = \frac{c(U_{max2}^2 - U_{мин2}^2)}{2} = \frac{c(1^2 - 0,50^2)U_H^2}{2} = \frac{c(1 - 0,25)U_H^2}{2} = 0,3750cU_H^2 \text{ (Дж)}, \quad (5.3)$$

$$I_{max2} = \frac{P_{ск}}{U_{мин2}} = \frac{P_{ск}}{0,50U_H} \text{ (А)}. \quad (5.4)$$

Видно, что разница запасённой энергии в суперконденсаторе при выборе диапазона 2:1 или 4:1 небольшая, и равна  $0,09375cU_H^2$  (Дж), но максимальный ток  $I_{max1}$  для широкого диапазона (25% -100%)  $U_H$  получается в два раза больше, чем  $I_{max2}$  диапазона (50% -100%)  $U_H$ . Это непосредственно определяет габарит и стоимость силового преобразователя. Таким образом, диапазон рабочего напряжения суперконденсатора обычно выбирается от 50% до 100%  $U_H$ .

Для исследуемой траектории движения предполагается дооборудовать автомобиль суперконденсаторами транспортного исполнения ВМ0D0063-Р125-В08, выпускаемыми компанией MAXWELL (рис. 5.11). Его характеристики приведены в таб. 5.1.



**Рис. 5.11. Суперконденсатор транспортного модуля-ВМ0D0063-Р125-В08**

Таб. 5.1. Характеристика суперконденсатора модуля ВМ0D0063-Р125-В08[42]

|                          |                      |                   |
|--------------------------|----------------------|-------------------|
| Ёмкость                  | Номинальная          | 63 Ф              |
|                          | Минимальная          | 63 Ф              |
|                          | Максимальная         | 73 Ф              |
| Напряжение               | Номинальное          | 125 В             |
|                          | Пиковое              | 136 В             |
| Ток                      | Действующее значение | 100 А             |
|                          | Пиковый              | 1900 А            |
|                          | Утечки               | 10 мА             |
| Внутреннее сопротивление |                      | 18 мОм            |
| Температурный диапазон   | Рабочий              | -40...+65 °С      |
|                          | Хранение             | -40...+70 °С      |
| Габариты                 |                      | 782 x 45 x 305 мм |
| Вес                      |                      | 61 кг             |

Запасённая энергия в одном суперконденсаторе определяется:

$$W = \frac{c.U^2}{2.3600} = \frac{63.125^2}{2.3600} = 136,6 \text{ (Вт}\cdot\text{ч)}. \quad (5.5)$$

Для того чтобы обеспечить необходимую энергию и, соответственно, напряжение предполагая использовать три суперконденсаторных модуля ВМ0D0063-Р125-В08, которые соединены последовательно, тогда запасённая энергия в блоке суперконденсатора будет равна:

$$W_{max} = \frac{\sum c.U_{max}^2}{2.3600} = \frac{\left(\frac{63.63}{63+63+63}\right).(3.125)^2}{2.3600} = 410,156 \text{ (Вт}\cdot\text{ч)}, \quad (5.6)$$

$$W_{min} = \frac{\sum c.U_{min}^2}{2.3600} = \frac{\sum c.(U_{max} / 2)^2}{2.3600} = \frac{(21).(375 / 2)^2}{2.3600} = 102,539 \text{ (Вт}\cdot\text{ч)}. \quad (5.7)$$

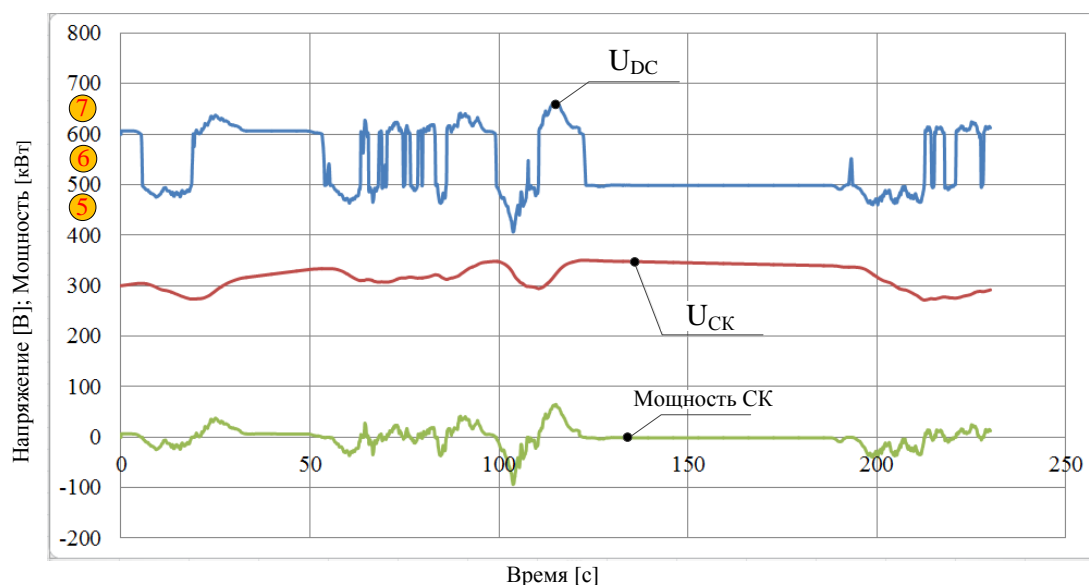
Таким образом, при полном заряде количество запасённой энергии в блоке суперконденсаторов достигает максимального значения  $W_{max} = 410,156 \text{ (Вт}\cdot\text{ч)}$ , соответственно номинальному заряженному напряжению  $U_{max} = 375 \text{ (В)}$ , и при полном разряде  $W_{min} = 102,539 \text{ (Вт}\cdot\text{ч)}$  и  $U_{min} = U_{max} / 2 = 375 / 2 = 187,5 \text{ (В)}$ , значит, к началу разгона автомобиля необходимо иметь полностью заряженный

суперконденсатор. В процессе разгона он будет разряжаться и, снизив свое напряжение в два раза, отдаст 3/4 начальной энергии [2].



**Рис. 5.12. Запасаемая энергия в блоке суперконденсаторов модуля BMOD0063-P125-B08**

Как правило, для повышения эффективности работы и увеличения срока службы суперконденсаторов график запасаемой энергии должен лежать полностью в зоне, ограниченной максимальной и минимальной запасаемой энергией суперконденсатора (рис. 5.12).



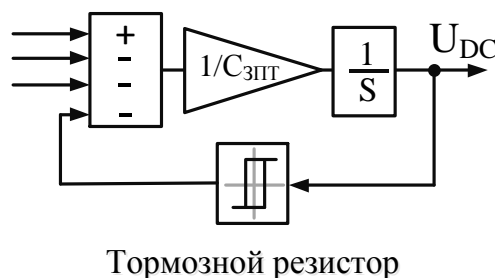
**Рис. 5.13. Графики напряжений суперконденсатора и звена постоянного тока, мощности суперконденсатора**

Работа суперконденсаторного накопителя разделена на три зоны, в соответствии с напряжением звена постоянного тока. В зону 5 трансмиссия попадает в моменты разгона, когда мощности ДВС не хватает для покрытия потребления тягового электропривода. В этой зоне суперконденсаторный накопитель отдает заряд на звено постоянного тока, пытаясь удержать напряжение на уровне (в данном случае) 500 В.

По окончании разгона мощность системы ДВС–генератор оказывается избыточной и напряжение ЗПТ быстро проходит зону 6 и попадает в зону 7, где суперконденсаторный накопитель стремится удержать напряжение на уровне 600 В, забирая избытки мощности и заряжаясь. Аналогично система ведет себя в моменты торможения.

### 5.2.1.3. Звено постоянного тока

Звено постоянного тока (рис. 5.14) 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.

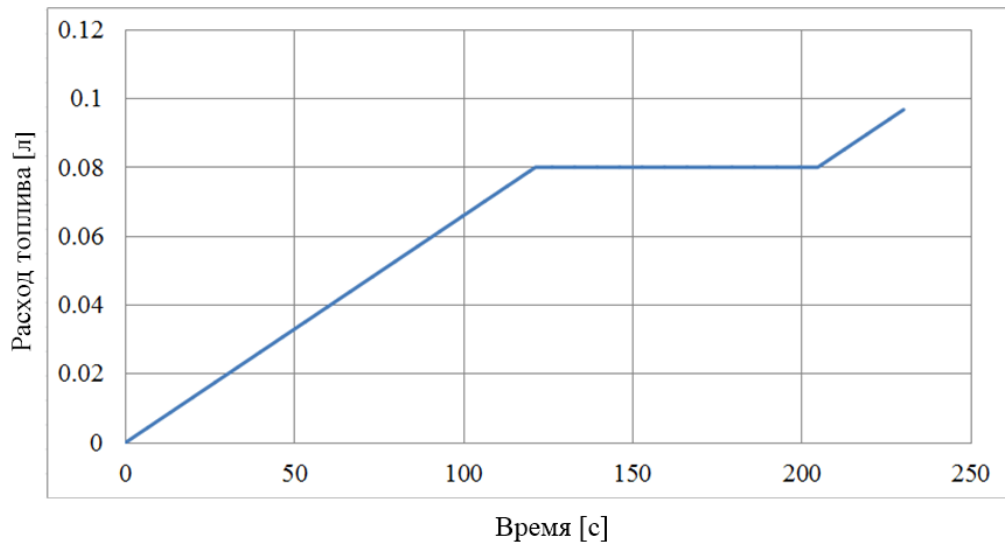


**Рис. 5.14. Звено постоянного тока**

### 5.2.2. Расход топлива автомобиля в условии полного использования энергии торможения в системе накопления энергии

Как было упомянуто, гибридные ТС могут использовать не только необратимый источник энергии, но и несколько суперконденсаторов с целью приема энергии рекуперативного торможения. Кроме того, использование буферных элементов в системе позволяет загружать основную силовую установку

в режиме максимального КПД. При этом ДВС может работать в номинальной точке в качестве источника заряда суперконденсатора. В свою очередь суперконденсатор покрывает недостаток мощности, или накапливает избыток энергии ДВС. При полном заряде аккумулятора, ДВС может быть просто выключен, чтобы не тратить топливо, пока необходимость его подзарядить не появится снова.



**Рис. 5.15. Интегральный расход топлива на заданном маршруте движения**

На рис. 5.15 показан расход топлива в условии полного использования энергии торможения в системе накопления энергии. На полученном графике можно выделить 3 участка. Первый от 0 до 120 с при обычном режиме работы ДВС включен, количество потребленного топлива линейно растет.

С 120с до 205с начинается второй участок, когда ДВС выключен, так как суперконденсатор зарядился до максимального значения.

Когда напряжение суперконденсатора снижается до  $U=300\text{В}$ , ДВС снова включается. Количество потребленного топлива продолжает расти.

В таком режиме работы мощность ДВС составила всего 7,5 кВт. Это говорит о возможности существенной экономии топлива за счет правильного выбора мощности двигателя.

### 5.3. Моделирование маршрута перемещения автомобиля из условия отсутствия накопителя энергии

#### 5.3.1. Структурная схема последовательного электрического гибридного ТС без накопителя энергии

При отсутствии накопителя энергии (суперконденсатора) в гибридных ТС электроэнергия поступает к электродвигателю только от ДВС. Поток энергии от двигателя передается через генератор к ведущим колесам и в результате их взаимодействия с дорогой затрачивается на выполнение работы и преодолению сопротивлений движению автомобиля [32][33].

На рис. 5.16 показана структурная схема этой модели, к которой добавляется регулятор мощности, чтобы поддерживать напряжение в ЗПТ не ниже 550В.

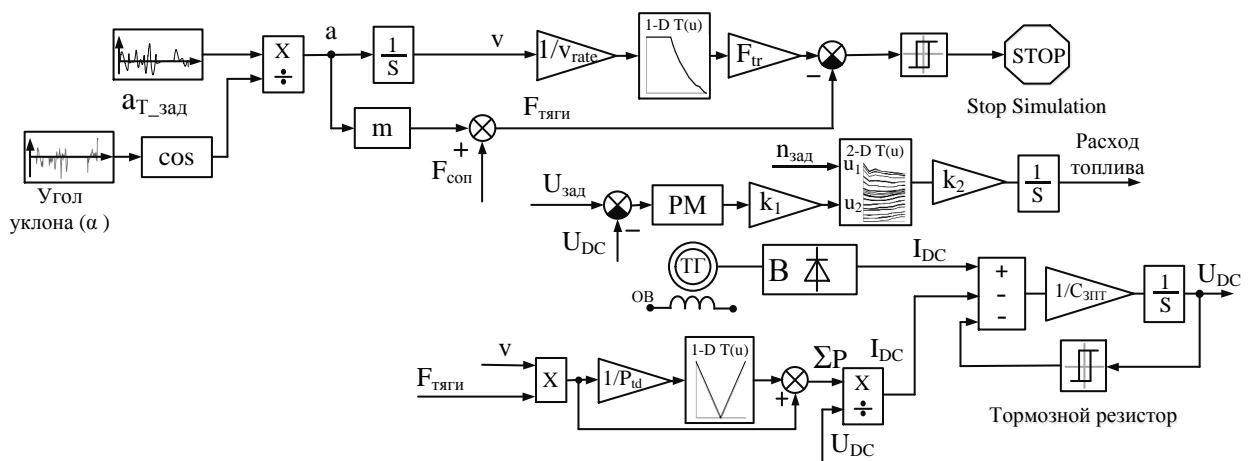
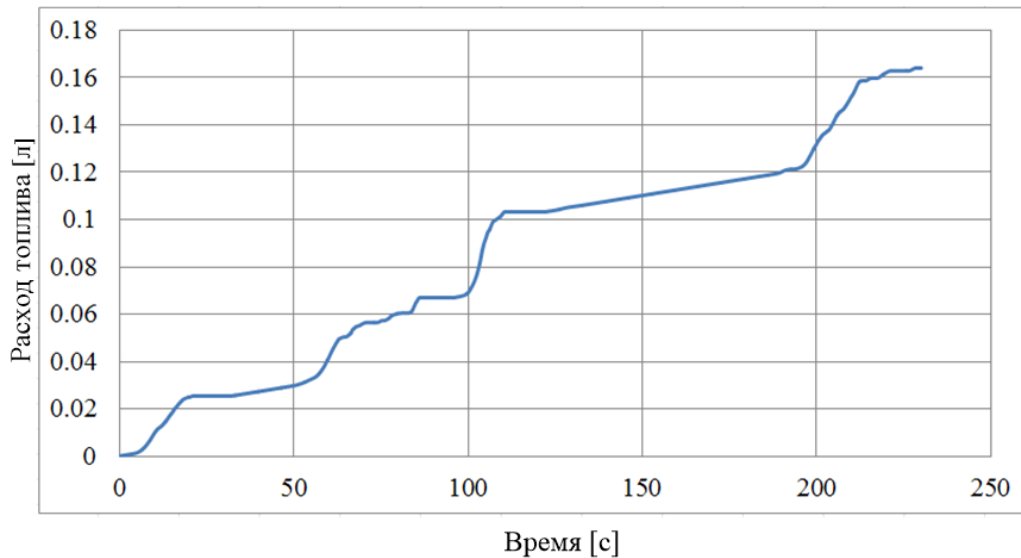


Рис. 5.16. Структурная схема последовательного электрического гибридного ТС без накопителя энергии

#### 5.3.2. Расход топлива в условии отсутствия суперконденсатора

Расход топлива в условии отсутствия суперконденсатора в зависимости от времени. В том случае расход топлива измеряется в литрах (рис.5.17).



**Рис. 5.17. Интегральный расход топлива**

При разгоне ДВС требует больше мощности, потребление топлива увеличивается. При торможении и в неподвижном состоянии расход топлива не изменяется.

#### **5.4. Экономическое сопоставление результатов моделирования**

Из рис. 5.15 и рис. 5.17 показано, что расход топлива на перемещение автомобиля при условии полного использования энергии торможения в системе накопления энергии для конкретной траектории движения составляет всего 90 мл. Он снижен в 1,8 раза по сравнению с системой без накопителя энергии, где расход составил 162 мл на тот же путь. Это позволяет существенно сократить потребление топлива и снизить выбросы выхлопных газов. Применение суперконденсаторов в гибридном автомобиле с учетом надежной работы в диапазоне температур от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $65^{\circ}\text{C}$ , низких эксплуатационных затрат и возможности рекуперации энергии торможения является эффективным решением.

Однако наличие трех суперконденсаторов увеличивает массу автомобиля на 183кг, что снижает динамику транспортного средства или требует установки тягового привода большей мощности, а это увеличение токов, увеличение потерь и снижение эффективности из-за работы с низкой нагрузкой. Также это приведет к увеличению цены.



### 5.5. Выводы по главе 5

Рассмотрены составляющие гибридной трансмиссии, к которым относятся двигатель внутреннего сгорания, электродвигатели, устройство хранения энергии (как аккумуляторные батареи, так и суперконденсаторы), силовые электронные преобразователи.

Выбран суперконденсатор транспортного модуля BMOD0063-P125-B08, выпущенный компанией MAXWELL с диапазоном рабочего напряжения от 50% до 100% $U_n$ , емкость которого должна соответствовать возможному запасу кинетической энергии ТС, чтобы иметь возможность зарядить накопитель при торможении и вернуть энергию при последующем разгоне.

Созданы модель электрического гибридного транспортного средства в двух случаях: с суперконденсатором и без. При сопоставлении результатов моделирования показано, что расход топлива при условии полного использования энергии торможения меньше в 1,8 раза, чем при отсутствии накопителя энергии.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы заключаются в следующем:

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.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Автомобили: Теория и конструкция автомобиля и двигателя: Учебник для студ. учреждений сред. проф. Образования / В. К. Вахламов, М. Г. Шатров, А. А. Юрчевский; Под ред. А. А. Юрчевского. — М. : Издательский центр «Академия», 2003. — 816 с.
2. Алямкин Д. И., Анучин А. С., Козаченко В. Ф., Лашкевич М. М., Остриров В. Н. Направления развития и оптимизации систем электроприводов городского гибридного и электрического транспорта // Электротехника журнал 2015. № 1, С. 5–8.
3. Измерение времени. Основы GPS / К. Одуан, Б. Гино, Перевод с английского Ю. С. Домина под редакцией В.М. Татаренкова с дополнением (глава 10) М. Б. Кауфмана – Москва: Техносфера, 2002. – 400 с.
4. Системы спутниковой навигации / Ю. А. Соловьев – М. : Эко-Трендз, 2000. — 270 с.
5. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Р. В. Бакитько, Е. Н. Болценков, Н. Т. Булавский, В. В. Дворкин, В. С. Ефименко, В. Е. Косенко, В. Я Нартов, А. И. Перов, А. Е. Перьков, В. В. Тюбалин, Ю. М. Урличич, В. Н. Харисов, В. Е. Чеботарев, А. Ю.Шатилов. Под ред. А. И. Петрова, В. Н. Харисов. Изд. 4-е, перераб. И доп. – М. Радиотехника, 2010. – 800 с.
6. Основы спутниковой навигации. Системы GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС / В. С. Яценков – М: Горячая линия – Телеком, 2005. – 272 с.
7. Применение GPS/ГЛОНАСС : Учебное пособие / М.Р. Богданов – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2012. – 136 с.
8. Power Electronics and Electric Drives for Traction Applications / GONZALO ABAD – Mondragon University, Spain - John Wiley & Sons, Ltd, 2017. – 643 с.

9. С. И. Антипов, Ю. В. Дементьев. Современные испытательные ездовые циклы и их актуальность при создании алгоритма работы системы управления автомобиля с КЭУ // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2013. Т. 6. № 10 (113), С. 8–11.
10. Android 2: Программирование приложений для планшетных компьютеров и смартфонов: [пер. с англ.] / Рето Майер –М. : Эксмо, 2011. – 672 с.
11. Google Android: Программирование для мобильных устройств / Голощапов А. Л. –СПб. : БХВ-Петербург, 2011. – 448 с.
12. Хавими С., Коматинени С., Маклин Д. Разработка приложений для Android. –СПб.: Питер, 2011. – 736 с.
13. П. Дейтел, Х. Дейтел, Э. Дейтел, М. Моргано. Android для программистов: создаём приложения. – СПб. : Питер, 2013. – 560 с.
14. Разработка Android-приложений в деталях / Т. С. Машнин – «Издательские решения», 2016. – 400 с.
15. <https://developer.android.com/studio/intro/index.html>.
16. <https://developer.android.com/guide/topics/location/strategies.html>.
17. <http://stolegt.narod.ru/hybrids/h2.htm>.
18. Сферическая астрономия / В. Е. Жаров – Фрязино, 2006. – 480 с.
19. Глобальная модель геоида EGM 08 предварительный анализ / А.П. Пигин, технический директор, компания «Кредо-Диалог».
20. Кравчук, И. М. Разработка методов вычисления нормальных высот по результатам спутниковых измерений в инженерно-геодезических работах : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук : 25.00.32 / Кравчук Иван Михайлович. – М. 2006. – 24 с.
21. Мамедбеков С. Н., Омаров А. О., Раджабов Р. Г. Моделирование перевода геодезических координат точек с поверхности эллипсоида на плоскость в

- конформной проекции Гаусса-Крюгера // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. Том 42 , №3 , С. 110–118.
22. ГОСТ Р 51794 – 2001 Глобальные навигационные спутниковые системы. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек – М. : Стандартиформ, 2009. – 21 с.
23. 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.
24. MPU-9250 Product Specification / InvenSense Inc. 2014. – 42 с.
25. Маринушкин П. С., Бахтина В. А., Подшивалов И. А., Стукач О. В. Вопросы разработки инерциальных пешеходных навигационных систем на основе МЭМС-датчиков // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 06, С. 157–173.
26. В. В. Матвеев. Инженерный анализ погрешностей бесплатформенной инерциальной навигационной системы // Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. Вып. 9. Ч. 2, С. 251–256.
27. Руководство по эксплуатации: Контроллер универсальный МК19.2 - ООО «НПФ Вектор»- Москва 2015. — 48 с.
28. Встраиваемые высокопроизводительные цифровые системы управления / А. С. Анучин, Д.И. Алямкин, А. В. Дроздов [и др.]; под ред. В. Ф. Козаченко – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 270 с.
29. Инерциальные навигационные системы : учеб. пособие / В. И. Соловьев, П. Г. Шабалов. — Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 72 с.

30. А. С. Конаков, В. В. Шаврин, В. И. Тисленко, А. А. Савин. Сравнительный анализ среднеквадратической погрешности определения координат объекта в бесплатформенной инерциальной навигационной системе при использовании различных алгоритмов нелинейной фильтрации // Доклады ТУСУРа, № 1 (25), часть 1, июнь 2012, С. 5–9.
31. An effecient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays / Sebastian O.H. Madgwick, 2010. — 32 с.
32. Теория движения автомобиля/ Тарасик В. П. — СПб. БХВ-Петербург, 2006. — 478 с.: ил.
33. Теория автомобилей и двигателей : Учеб. Пособие / В. П. Тарасик, М.П. Бренч. — Мн.: Новое знание, 2004. – 400 с.: ил.
34. Двигатели внутреннего сгорания: В 3 кн. Кн.1. Теория рабочих процессов: Учебник / В. Н. Луканин, К. А. Морозов, А. С. Хачиян и др.; Под ред. В. Н. Луканина. — М.: Высш.шк., 1995. — 368 с.
35. Двигатели внутреннего сгорания: В 3 кн. Кн. 2. Динамика и конструирование: Учебник / В. Н. Луканин, И. В. Алексеев, М. Г. Шатров и др.; Под ред. В. Н. Луканина. — М.: Высш. шк., 1995. — 319 с.
36. Двигатели внутреннего сгорания: В 3 кн. Кн. 3. Компьютерный практикум: Учебник / В. Н. Луканин, М. Г. Шатров, А. Ю. Труш и др.; Под ред. В. Н. Луканина. — М.: Высш. шк., 1995. — 256с.
37. Теория и конструкция автомобиля / В. А. Иларионов, М. М. Морин, Я. Е. Фаробин и др. — М.: Машиностроение, 1992. — 416 с.
38. Электромобиль / В. А. Щетина, Ю. Я. Морговский, Б. И. Центер и др. — Л.: Машиностроение. — 253 с.
39. Electric and Hybrid Vehicles/ Iqbal Husain — CRC Press, 2011 г. — 524 с.
40. Hybrid Electric Vehicle System Modeling and Control / Wei Liu — John Wiley & Sons Ltd, 2017 . — 584 с.

41. Анучин А. С. Системы управления электропривода: учебник для вузов. — М.: издательский дом МЭИ, 2015. — 373 с.:ил.
42. Datasheet. 125V heavy transportation module/  
<http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/125v-tran-modules/documents>.
43. А. С. Анучин; М. Ф. Козаченко; М. М. Лашкевич; В. Н. Остриров; А. М. Русаков. Состояние и перспективы развития электротрансмиссия для электрического и гибридного транспорта на 2015г // Сборник докладов научно – технической конференции «Актуальные вопросы и перспективы развития электромашиностроение». 3 декабря 2015 года, С. 43-50.
44. Ильинский Н. Ф. Основы электропривода: Учеб. пособие для вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Издательство МЭИ, 2003. — 224 с.; ил.
45. Флоренцев С. Н., Макаров Л. Н., Менухов В. Экономичный экологичный городской гибридный автобус // Электронные компоненты. 2008. № 12, С. 24-39.
46. Ключев, В. И. Теория электропривода: учеб. для вузов / Ключев В. И. — М.: Энергоатомиздат, 2001. — 704 с.:ил.
47. B. Wallace, M. Rockwood, R. Goubran, F. Knoefel, S. Marshall, M. Porter. Measurement of vehicle acceleration in studies of older drivers from GPS position and OBDII velocity sensors // 2015 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA) Proceedings, 2015, pp. 391-396.
48. Yong-xiang Zhang. A Method of Resolving Gyro Zero Drift in Electronic Stabilization System // Computer and Automation Engineering, 2009. ICCAE '09. International Conference on, DOI: 10.1109/ICCAE.2009.42
49. Лашкевич, М. М. Разработка системы управления для электротрансмиссии с тяговыми вентильно-индукторными двигателями : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата

технических наук : 05.09.03 / Кравчук Иван Михайлович. — М. 2013. — 20 с.

50. Kan Zhou, Andrej Ivanco, Zoran Filipi. Finite-Element-Based Computationally Efficient Scalable Electric Machine Model Suitable for Electrified Powertrain Simulation and Optimization // IEEE Transactions on Industry Applications, 2015.
51. Abdul Waheed, Katja Buss. Modeling and validation of a three-dimensional thermoelectric model of a 50 Ah lithium-iron-phosphate battery cell at three different ambient temperatures in the New European Driving Cycle (NEDC) // AmE 2016 - Automotive meets Electronics; 7th GMM-Symposium, 2016.
52. Georgios Fontaras, Vicente Franco, Panagiota Dilara, Giorgio Martini, Urbano Manfredi. Development and review of Euro 5 passenger car emission factors based on experimental results over various driving cycles // Science of The Total Environment, 2014.
53. Котиев Г. О., Харитонов С. А., Нагайцев М. В. Метод расчета динамических характеристик транспортного средства с гибридной трансмиссией, построенной по схеме GM // Журнал автомобильных инженеров, №3, 2011, С. 14-19.
54. Котиев Г. О., Харитонов С. А., Нагайцев М. В. Метод расчета динамических характеристик транспортного средства с гибридной трансмиссией TSH // Журнал автомобильных инженеров, №6, 2010, С. 20-25.
55. Виноградов А. Б., Гнездов Н. Е., Коротков А. А., Журавлев С. В. Комплект тягового электрооборудования карьерного самосвала грузоподъемностью 240 тонн // XVI международная конференция "электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты", 2016, С. 152-155.



56. 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).
57. 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).