

Мурзин Ильшат Айдарович

**РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОННЫХ РЕЛЕ С УПРАВЛЕНИЕМ ПО
БОРТОВОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА АВТОМОБИЛЯ**

Специальность 05.13.05 –
«Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва - 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель: **Васюков Сергей Александрович**,
доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры электротехники и промышленной
электроники МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Бусурин Владимир Игоревич**,
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры систем автоматического и
интеллектуального управления Московского
авиационного института

Дебелов Владимир Валентинович,
кандидат технических наук, заведующий
отделом математического моделирования
систем управления кузовной электроникой
и комфортом государственного научного
центра Российской Федерации ФГУП «НАМИ»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Уфимский государственный
авиационный технический университет»

Защита состоится «21» апреля 2020 г. в 14 час. 30 мин. на заседании
диссертационного совета Д212.141.02 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу:
105005, Москва, Госпитальный пер., 10, ауд. 613м.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и
на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения,
просьба направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, МГТУ
им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д212.141.02.

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь

диссертационного совета Д212.141.02

кандидат технических наук, доцент



Муратов Игорь Валентинович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современные автомобили оснащены охранными комплексами, предотвращающими несанкционированный доступ и угон. Реле, входящие в состав противоугонного оборудования, разрывают электрические цепи автомобиля, препятствуя угону. Они могут работать как в режиме блокировки, так и в составе систем управления, например в системе плавного торможения угнанного автомобиля. Реле должны быть установлены скрытно, предпочтительно в подкапотном пространстве автомобиля, и управляться дистанционно по команде главного модуля комплекса. Дистанционное управление по радиоканалу затруднительно, так как металлический капот и перегородка моторного отсека экранируют радиосигнал. И поэтому, перспективным является разработка беспроводных электронных реле, управляемых по бортовой сети постоянного тока автомобиля.

Технология управления по линиям питания PLC (Power Line Communication) успешно применяется в домашних сетях переменного тока. Специфика ее применения в автомобилях раскрыта в работах I. Stievano, F. Canavero, P. Tanguy, F. Nouvel, J. Cortes, M. Cedra, M. Lienard, M. Carrion, V. Degardin, L. Guerrieri, P. Bisaglia, M. Mohammadi, L. Lampe, A. Schiffer, C. Buccella, V. De Santis и других зарубежных авторов, а публикации отечественных авторов практически отсутствуют. Разработанные для высокоскоростной связи PLC-модемы рассматриваются как замена выделенных проводных шин автомобиля, используют сложные методы модуляции и кодирования на основе мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM), требуют больших аппаратных, программных и стоимостных затрат и, как следствие, не нашли применения в автомобилях. Для электронных реле, являющихся дополнительным оборудованием автомобиля, основными требованиями является низкая себестоимость и малые габариты, что делает невозможным применение связи по OFDM. Приемлемый выход основан на использовании прямой цифровой передачи сигнала.

Беспроводные электронные реле успешно применялись на протяжении более чем 20 лет, их использование актуально и в настоящее время. Но усложнение электрооборудования современных автомобилей, появление новых источников импульсных помех в электропроводке привело к нарушениям работоспособности реле и, как следствие, к отказу от использования. Таким образом, разработка беспроводных электронных реле, использующих прямую цифровую передачу сигнала по штатной электропроводке автомобиля и обеспечивающих работоспособность на любых современных автомобилях, является актуальной научно-технической задачей.

Целью диссертационной работы является разработка и анализ методов и алгоритмов прямой цифровой передачи управляющих сигналов по бортовой сети постоянного тока автомобиля и создание на их основе электронных реле, как элементов скрытого дистанционного управления в автомобильных охранных комплексах.

Для достижения поставленной цели в диссертации решаются следующие задачи:

1. Аналитический обзор методов и моделей передачи сигналов по штатной электропроводке автомобиля и обоснование применения метода прямой цифровой передачи при управлении электронными беспроводными реле автомобильных охранных комплексов.

2. Рациональный выбор параметров и элементов передатчика и приемника импульсного сигнала для организации системы связи на основе прямой цифровой передачи.

3. Разработка электрической модели проводки автомобиля в виде комплекса взаимосвязанных потребителей энергии, соединенных отрезками проводки через распределительные узлы, с целью анализа основных факторов, влияющих на передачу и прием импульсного сигнала.

4. Аналитический обзор и классификация источников импульсных помех в электропроводке автомобиля, исследование их амплитудных, временных и частотных характеристик с целью разработки методов выделения полезного сигнала на фоне шумов и импульсных помех.

5. Разработка новых алгоритмов кодирования и декодирования, обеспечивающих работоспособность беспроводных электронных реле в условиях нестационарных импульсных помех.

6. Проверка работоспособности предложенных алгоритмов с использованием методов математического моделирования, полунатурных испытаний в лабораторных условиях и экспериментальных исследований беспроводных реле в составе автомобильного охранного комплекса.

7. Техническая реализация беспроводных реле и подтверждение их работоспособности при установках на современных автомобилях различных марок.

Научная новизна:

1. Разработана электрическая модель в виде комплекса взаимосвязанных источников и потребителей энергии, соединенных проводами бортовой сети, обеспечивающая анализ факторов, влияющих на передачу и прием импульсного сигнала.

2. Предложена классификация импульсных шумов в электропроводке автомобиля по широкому спектру признаков, позволяющая с единых методических позиций проводить систематизацию, осуществлять сравнительный анализ амплитудных, частотных и временных характеристик шумов.

3. Разработаны программно-аппаратные средства измерения импульсных шумов в диапазоне частот прямой цифровой передачи сигнала, предложены алгоритмы обработки для получения статистических параметров шумов и интегральных функций распределения вероятности межимпульсных временных интервалов.

4. Предложены и проанализированы алгоритмы кодирования и декодирования пакетов импульсных сигналов, использующие плавающий порог компаратора приемника, и позволяющие выделять управляющие сигналы на приемной части электронных реле при совместном воздействии импульсных помех от электронных блоков автомобиля и подключаемого дополнительного оборудования.

5. Разработана методика автоматизированного выбора порогов компаратора приемника, обеспечивающая декодирование сигнала на фоне нестационарных импульсных помех.

6. Предложены усовершенствованные схемы электронных реле, управляемых по бортовой сети постоянного тока и обеспечивающих повышенную стойкость автомобиля к угону.

Практическая значимость:

1. Разработана Multisim-модель, состоящая из передатчика, электропроводки и приемника, позволяющая проводить анализ факторов, влияющих на характеристики передаваемого импульсного сигнала, и формировать рекомендации по выбору мест подключения передатчика и электронных реле. Предложенная модель может быть использована в процессе обучения монтажников дополнительного оборудования автомобилей.

2. Разработан и технически реализован программно-аппаратный комплекс по измерению и обработке импульсных шумов в электропроводке автомобиля. Комплекс может быть использован для исследования шумовых характеристик бортовой сети современных автомобилей и в процессе монтажа электронных блокировочных и сервисных реле.

3. Разработано программное обеспечение и тестовое оборудование, используемое монтажниками для выбора мест подключения электронных реле. Оборудование позволяет определить точки электропроводки автомобиля, подключение к которым позволяет гарантировать прием и декодирование сигнала электронным реле при различных режимах эксплуатации автомобиля.

4. Разработаны электрические схемы и программы для микроконтроллеров электронных реле, что позволило создать серийную партию блокировочных и сервисных реле для автомобильных охранных комплексов.

Методы исследования. Основные научные результаты получены с использованием методов теории электрических цепей, теории автоматического управления, теории вероятности, математического моделирования, аналоговой и цифровой схемотехники.

Апробация работы.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на 6 научно-технических конференциях, в том числе: на международных IEEE конференциях EIConRus (г. Зеленоград, 2019 г.), ICIEAM (г. Сочи, 2019 г.), SIBCON (г. Томск, 2019 г.), RusAutoCon (г. Сочи, 2019 г.), на 77-й Международной научно-методической и научно-исследовательской конференции (МАДИ, г. Москва, 2019 г.), на Международной научно-практической конференции «Воздействие научно-технической революции на характер связи науки с производством» (г. Челябинск, 2017 г.).

Внедрение результатов работы.

Результаты исследований по теме диссертационной работы, подтвержденные актом внедрения, реализованы при создании серийных партий беспроводных электронных реле и тестового оборудования автомобильных охранных комплексов фирмы Мэджик Ринг ЛТД.

Публикации по теме диссертации.

Основные результаты диссертации изложены в 11 печатных работах общим объемом 6,1 печатных листов, включая 6 научных статей в рецензируемых журналах из Перечня ВАК РФ; 4 статей в сборниках докладов международных IEEE конференций, индексируемых в наукометрических базах Scopus и Web of Science; одной статьи, проиндексированной в РИНЦ.

Структура работы: диссертация состоит из введения, пяти глав, приложения, списка литературы из 77 наименований. Материал изложен на 193 страницах с 99 рисунком и 35 таблицами в тексте.

На защиту выносятся следующие положения и результаты:

1. Электрическая модель штатной проводки автомобиля в виде комплекса подключаемых потребителей энергии, позволяющая на качественном уровне анализировать процессы передачи и приема импульсного сигнала.

2. Результаты анализа импульсных шумов в электропроводке автомобиля, на основе которых разработаны новые алгоритмы кодирования и декодирования пакетов управляющих сигналов, обеспечивающие работоспособность электронных реле при воздействии импульсных помех от электронных блоков автомобиля и подключаемого дополнительного оборудования.

3. Двухуровневая методика автоматизированного выбора порогов компаратора приемника, обеспечивающая декодирование сигнала на фоне нестационарных импульсных помех.

4. Результаты разработки электронного реле, управляемого по бортовой сети постоянного тока автомобиля и обеспечивающего повышенную стойкость автомобиля к угону.

Во введении обосновывается актуальность темы исследований, формулируется цель исследований, показаны научная новизна и практическая значимость работы, приводятся основные положения, выносимые на защиту. Здесь же проведен обзор содержания диссертации по разделам.

Глава 1 посвящена аналитическому обзору электронных беспроводных реле, а также существующих методов и моделей передачи сигнала по бортовой сети автомобиля.

Линии питания +12 В распространены по всему автомобилю и в условном виде пунктиром показаны на Рис. 1.

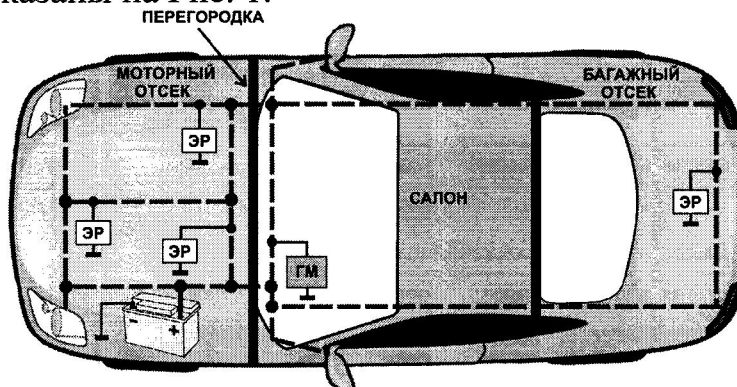


Рис. 1. Условная схема расположения главного модуля (ГМ) и электронных реле (ЭР) в автомобиле

Главный модуль (ГМ) сигнализации всегда монтируется в салоне автомобиля. Он управляет электронными реле (ЭР), которые могут располагаться в любом месте автомобиля, но на практике они монтируются, в основном, в моторном отсеке (МО). Монтаж ЭР должен быть скрытым, чтобы их было трудно обнаружить и нейтрализовать, и поэтому ЭР должны быть малогабаритными. Питание ГМ и ЭР идет от ближайшей к ним линии +12 В, по этой же линии передается управляющий сигнал.

Существующие методы передачи и разработанные зарубежные автомобильные PLC-модемы предполагают постановку задачи (Рис. 2) по обеспечению высокоскоростной двухсторонней связи при отсутствии каких-либо ограничений на техническую реализацию и цену продукции.

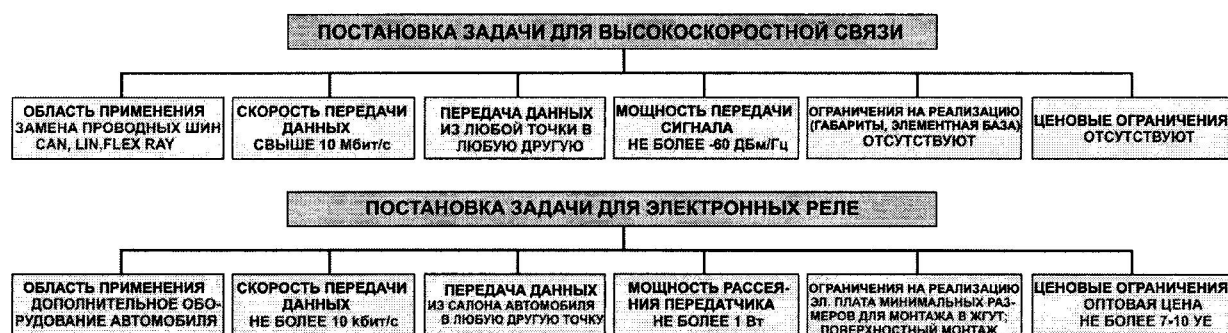


Рис. 2. Постановка задачи для высокоскоростной связи и для ЭР

Исследования зарубежных авторов показывают, что частотные характеристики бортовой сети, Рис. 3, в диапазоне 1 – 100 МГц имеют существенное ослабление (от -10 до -80 Дб) и множественные провалы. Расположение провалов случайным образом изменяется как от путей распространения сигнала, так и от подключающихся и отключающихся в разное время электронных блоков автомобиля. В условиях существенной неравномерности частотной характеристики электропроводки высокоскоростная связь обеспечивалась применением модулированной передачи OFDM. Для реализации системы связи различными зарубежными авторами предложены детерминированные модели бортовой сети или в виде совокупности неоднородных длинных линий, или в виде «черного ящика», параметры которого для каждого канала передачи данных формировались по экспериментальным измерениям.

Постановка задачи для электронных реле (Рис. 2) имеет существенные отличия и предполагает жесткие ценовые и габаритные ограничения. Этим ограничениям не удовлетворяет программно-аппаратная реализация реле не только по OFDM, но даже при использовании промышленных трансиверов с одночастотной модуляцией. Альтернативный подход предполагает использование прямой цифровой передачи сигнала.

Микропроцессор (МП) главного модуля, Рис. 4, формирует управляющий сигнал в виде пакета коротких (около 1 мкс) импульсов, временной интервал между которыми изменяется при передаче логического нуля и единицы. Соединительные провода учтены их сопротивлением и индуктивностью. Ввиду конечного внутреннего сопротивления аккумулятора и проводки, при замыкании транзистором

VT линии +12 В на «землю», импульсные «провалы» напряжения, повторяющие кодовую посылку, распространяются по всей бортовой сети. Электронное реле выделяет импульсные «провалы» с помощью встроенного в микропроцессор компаратора, декодирует их и исполняет соответствующие команды.

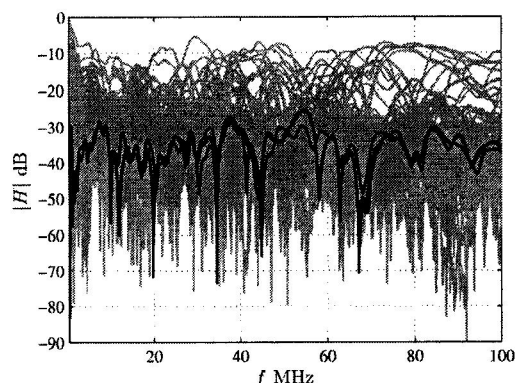


Рис. 3. Частотные характеристики 106 каналов

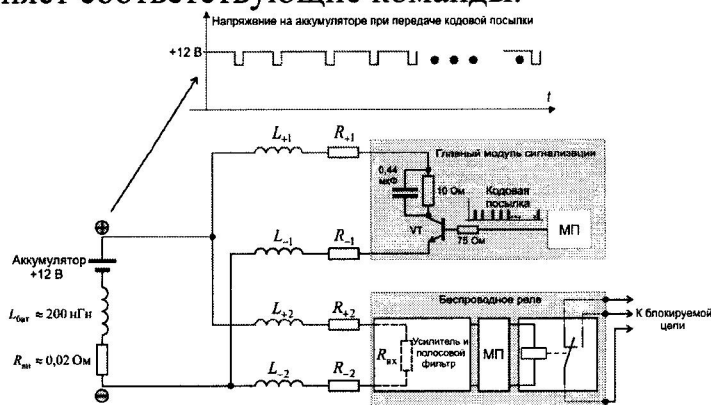


Рис. 4. Упрощенная модель цифровой передачи сигнала

Учитывая сказанное, и была сформулирована постановка задачи диссертационного исследования. Она включает четыре взаимосвязанные задачи, решаемые в последующих главах диссертации: разработка модели электропроводки; изучение свойств импульсных шумов; построение алгоритмов, способных выделять импульсный сигнал на фоне шумов; техническая реализация реле.

Во второй главе разработана электрическая модель в виде комплекса подключаемых источников и потребителей энергии, связанных отрезками проводки через распределительные узлы.

Построение универсальной модели, количественно отображающей процессы в их электропроводках, вряд ли возможно ввиду разнообразия марок автомобилей. Задачей являлось построение на примере типового автомобиля детерминированной электрической модели, позволяющей на качественном уровне анализировать процессы распространения импульсных сигналов.

К задачам, решаемым с помощью модели, относятся: настройка параметров передатчика сигнала и электронного реле; анализ переходных процессов при распространении импульсного сигнала; анализ факторов, влияющих на амплитуду и форму сигнала в различных точках бортовой сети; выбор мест подключения передатчика и электронных реле, и т.п.

Структура электрической модели схематично показана на Рис. 5 и содержит набор подмоделей низшего уровня, объединенных через модель бортовой сети.



Рис. 5. Структура электрической модели

Модель аккумулятора. Внутреннее сопротивление аккумулятора, измеренное при различных токах нагрузки, составило приблизительно 0,02 Ом. Впервые показано, что основным параметром, влияющим на амплитуду импульсного сигнала в электропроводке, является внутренняя индуктивность аккумулятора L_{BH} , экспериментальная оценка которой в диапазоне частот 1 – 4 МГц составила 100 – 200 нГн.

Индуктивность и сопротивление проводки оценивались для медного провода диаметром 1,5 мм. Расчетные погонные значения составили 1,5 мкГн/м и 0,013 Ом/м соответственно. Экспериментальные исследования в лабораторных условиях показали величину погонной индуктивности 1,0 мкГн/м и 0,5 мкГн/м, если провода образовывали витую пару. Сравнение частотных характеристик проводки, измеренных на автомобиле, с результатами моделирования, подтвердило правильность предположения о замене участков проводки соответствующими индуктивностями и сопротивлениями.

Передатчик сигнала был представлен Multisim-моделью, Рис. 6, а, адекватность которой была подтверждена экспериментально на автомобиле.

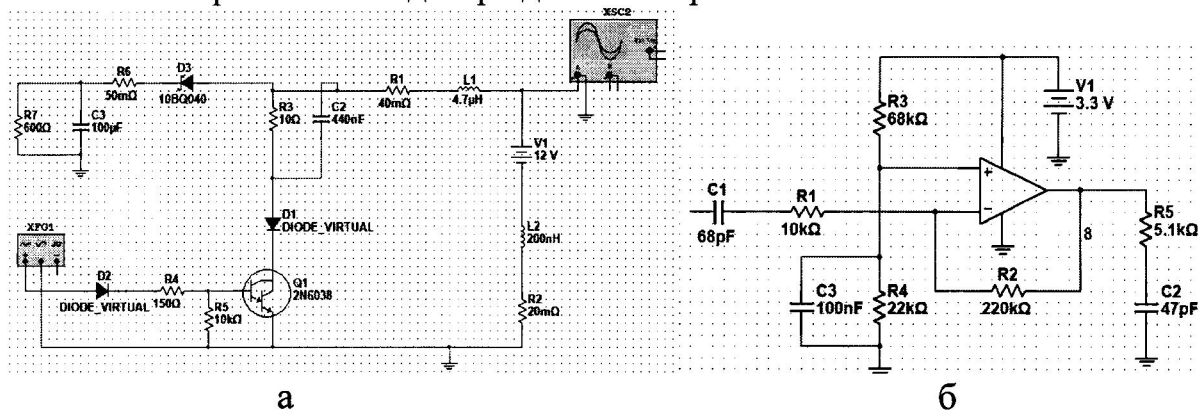


Рис. 6. Multisim-модели передатчика (а) и приемника (б) сигнала

Моделирование показало, что тип транзистора и длительность управляющего импульса практически не влияют на амплитуду сигнала в проводке, но, исходя из энергетических ограничений, длительность импульса не должна превышать 1-2 мкс. Наличие конденсатора С2 необходимо, так как он стабилизирует форму импульса и определяет его амплитуду в момент включения транзистора. Изменение значений R3-С2 в диапазоне (10-100 Ом, 100-500 нФ) практически не влияет на амплитуду импульса, но их сочетание, определяющее постоянную времени $\tau = R3 \cdot C2$, следует учитывать при выборе интервала следования импульсов.

Проведена оценка влияния величины сопротивлений подключаемых потребителей и мест их расположения по отношению к передатчику и аккумулятору.

Приемник сигнала содержит входной фильтр, задачей которого является пропускание импульсного сигнала при сохранении его амплитуды и ослабление как низкочастотных, так и высокочастотных импульсных помех. Задача относится к реализации согласованного фильтра, но в условиях нестационарных помех и ценовых ограничений реализация такого фильтра затруднительна и поэтому

обосновано применение полосового фильтра второго порядка, Рис. 6, б, с полосой пропускания 50-350 кГц.

R-L-C модели штатных электронных блоков (блоки управления двигателем, электрооборудованием, электромоторы, катушки зажигания...) формировались на основе анализа литературных источников или экспертно оценивались по токам потребления. Длины отрезков проводки, соединяющих блоки, экспертно оценивались по монтажным схемам автомобиля.

Разработанная функциональная схема электропроводки, Рис. 7, объединяет более 80 блоков автомобиля, связанных через четыре проводные шины: постоянный плюс, аксессуары (ACC), зажигание (ON), работающий двигатель (ST)) и замок зажигания (ЗЖГ).

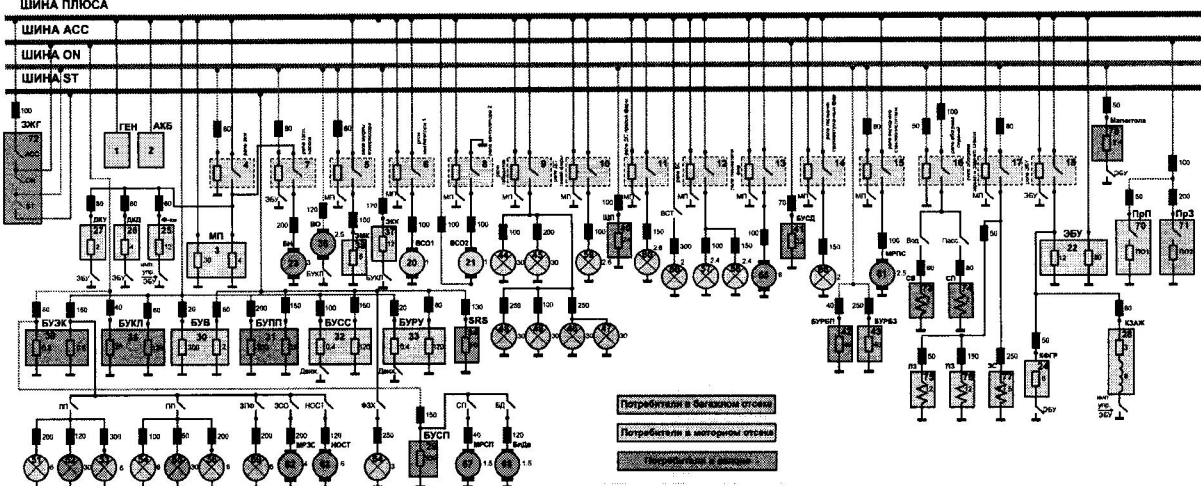


Рис. 7. Функциональная схема бортовой сети постоянного тока

На основе функциональной схемы сформирована Multisim-модель и проведена ее верификация, сопоставлением амплитуд импульсов в различных точках проводки (Таблица 1), полученных по модели и непосредственно в автомобиле.

Таблица 1.

Результаты верификации Multisim-модели

Место подключения передатчика	Контрольная точка	Амплитуда [В], эксп. (мод.)
АКБ	АКБ (все режимы)	0,90 (0,85)
Замок зажигания	АКБ (заж. и магнитола)	0,09 (0,12)
Прикуриватель в багажнике	Прикуриватель в салоне	4,0 (3,0)
Замок зажигания	Прикуриватель в багажнике (заж. и магнитола)	0,24 (0,42)
Прикуриватель в салоне	АКБ (двигатель заведен)	0,03 (0,05)

Глава 3 посвящена исследованию импульсных шумов в электропроводке. В результате аналитического обзора зарубежных источников отмечена необходимость статистической обработки результатов измерений, чтобы выявить общие свойства шумов различных автомобилей. Показано, что в проводке в основном наблюдаются шумы в виде одиночных импульсов треугольной формы (вероятность появления менее 1%), шумы в виде пакетов из нескольких подряд идущих импульсов (до 14 %) и в виде одиночных импульсов, форма которых – затухающая синусоида (около 85%). Амплитуды наблюдаемых импульсов зависят от источника происхождения,

точки измерения и изменяются от нескольких милливольт до единиц вольт. Собственные частоты импульсов в виде затухающих синусоид - от сотен килогерц до десятков мегагерц. Как обобщение аналитического обзора, впервые предложена классификация импульсных шумов по широкому спектру признаков, Рис. 8.

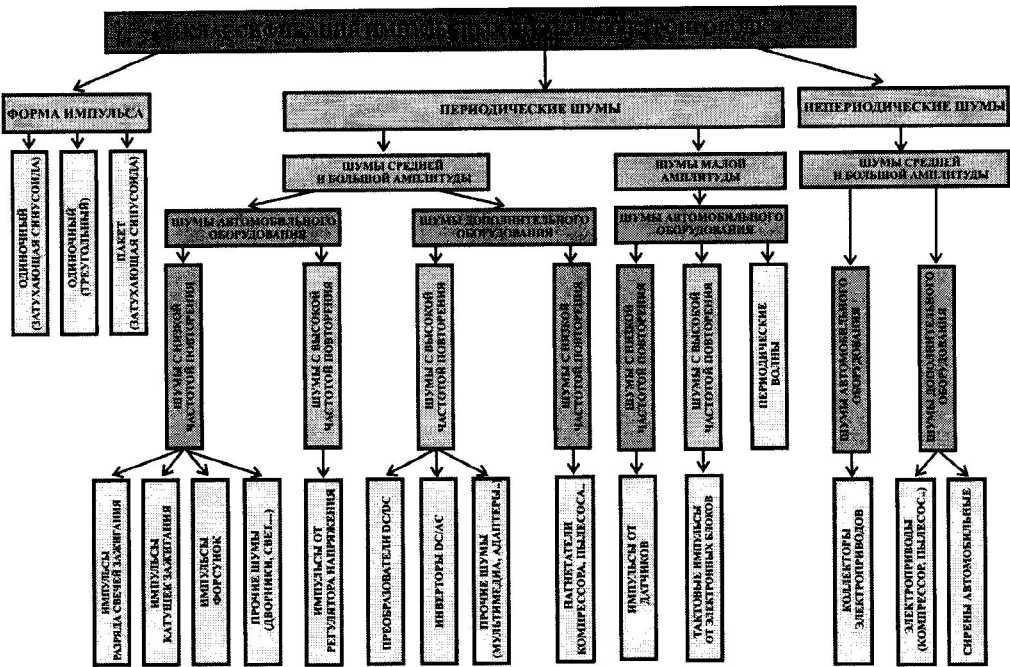


Рис. 8. Классификация импульсных шумов в электропроводке автомобиля

Обосновано временное ограничение на передачу кода (не более 100 мс) и предельное среднее время передачи бита (не более 100 мкс). На основе энергетических ограничений (мощность, рассеиваемая на электронной плате при передаче импульса 0,3 Вт; допустимая средняя мощность рассеивания – менее 1 Вт) обоснована максимальная частота следования импульсов в 40 кГц. Так как шумы нарушают импульсную кодовую посылку, их исследование должно быть привязано к конкретному алгоритму кодирования. В качестве «базового» предложен алгоритм №1, Рис. 9, в котором логический ноль передавался интервалом 80 мкс, единица – 120 мкс, а импульс считался принятым, если он попадал в окно валидации, шириной 30 мкс. Если хотя бы один бит принимается неправильно, то пропадает вся посылка.

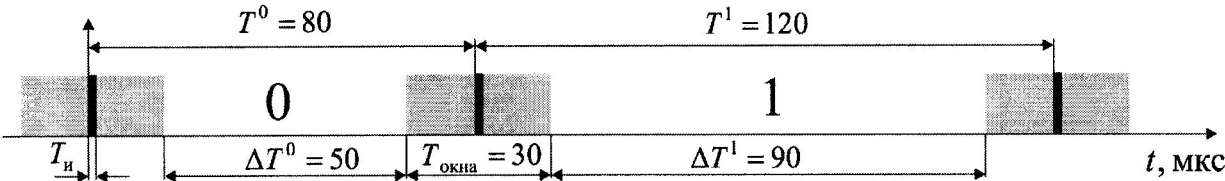


Рис. 9. Базовый алгоритм при передаче импульсного сигнала

Так как большая часть энергетического спектра импульсного сигнала расположена в относительно низкочастотном (до 1 МГц) диапазоне, впервые был поставлен ряд экспериментов по расширенному исследованию шумов именно этого диапазона частот.

Экспериментальные данные получены на трех автомобилях. С выхода фильтра импульсные шумы подаются на внутренний компаратор микроконтроллера

тестовой платы STM32F3DISCOVERY. Пороговые уровни компаратора $U_{\text{пор}} = 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$ В устанавливались программно, а 10-секундные реализации шумов записывались в память персонального компьютера.

В Таблице 2 представлены математические ожидания и среднеквадратические отклонения (в скобках) количества импульсов помех в 100 мкс интервалах (среднее время передачи бита). Отмечено, что в большинстве интервалов (более 90%) импульсы помех отсутствуют, а вероятность появления более трех импульсов стремится к нулю.

Таблица 2.

Статистические параметры шумов

Порог, В/условия			0,2	0,3	0,4	0,5
Ниссан	Включено зажигание	№1	0,05(0,23)	0,01(0,13)	0,021(0,18)	0,022(0,17)
		№2	0,05(0,23)	0,009(0,12)	0,023(0,18)	0,022(0,17)
	Включен двигатель	№3	0,11(0,47)	0,08(0,36)	0,05(0,22)	0,006(0,08)
		№4	0,11(0,46)	0,08(0,36)	0,05(0,22)	0,007(0,08)
Опель	Включено зажигание	№1	0,12(0,44)	0,01(0,11)	0,01(0,11)	0,07(0,30)
		№2	0,11(0,42)	0,01(0,12)	0,01(0,10)	0,04(0,21)
	Включен двигатель	№3	0,54(0,97)	0,16(0,54)	0,11(0,39)	0,07(0,28)
		№4	0,45(0,93)	0,16(0,54)	0,10(0,38)	0,06(0,28)
Фольксваген	Включено зажигание	№1	0,18(0,63)	0,15(0,56)	0,12(0,47)	0,09(0,40)
		№2	0,17(0,61)	0,14(0,54)	0,11(0,46)	0,10(0,43)
	Включен двигатель	№3	1,22(1,42)	0,30(0,73)	0,19(0,56)	0,15(0,49)
		№4	0,87(1,24)	0,30(0,84)	0,21(0,63)	0,15(0,49)

Особое внимание уделено статистическим распределениям межимпульсных временных интервалов (IAT). Обозначим $n_t(m)$ - количество временных интервалов длиной ровно в m – микросекунд между последовательными импульсами помехи. Пусть k , мкс, максимальный временной интервал между импульсами, зафиксированный в реализации. Вычислим относительные частоты $p_t(l)$ появления интервала в l , мкс в общем количестве интервалов N_t , и на их основе построим интегральные функции распределения вероятности $F(l)$

$$p_t(l) = \frac{n_t(l)}{N_t}; l = 1 \div k; F(l) = P(\Delta t < l) = \sum_{i=1}^l p_t(i).$$

$F(l)$ показывает для каждого l вероятность того, что временные интервалы Δt между последовательными импульсами не превысят l , мкс. В качестве примера, на Рис. 10 показаны функции распределения для автомобиля Фольксваген при работающем двигателе (аналогичные функции распределения получены для трех автомобилей при разных режимах работы).

Видно, что вероятность появления в 10-секундной реализации импульсов помех с интервалом менее 11 мкс составляет 53% при пороге 0,2 В и уменьшается до 22% с увеличением порога. В то же время, вероятность появления последовательных импульсов с интервалом менее 6 мкс ничтожно мала.

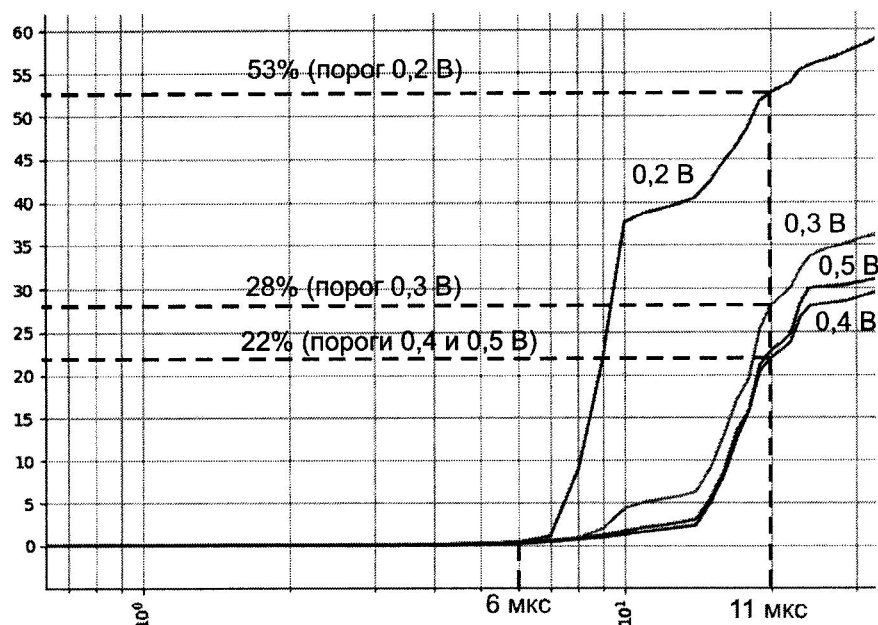


Рис. 10. IAT для Фольксвагена

В Таблице 3 показаны вероятности появления интервалов менее 6 мкс между последовательными импульсами при включении зажигания, при работающем двигателе и четырех порогах компаратора. Вероятности, особенно с увеличением порога, малы. Это свойство, впервые полученное для автомобильных шумов, легло в основу разработки нового алгоритма кодирования.

Таблица 3.

Вероятности (в %) появления интервала менее 6 мкс

Порог, В/условия		0,2	0,3	0,4	0,5
Ниссан	Заж.	12	13	4	1
	Двиг.	0,5	0,3	0	0
Опель	Заж.	30	0,7	0,7	0
	Двиг.	20	26	16	4
Фолькс.	Заж.	0	0	0	0
	Двиг.	0,5	0,5	0,5	0,5

В этой главе также приведены статистические данные по шумам от дополнительного оборудования (инвертора, автомобильных сирен, пылесоса), подключение которого негативно влияет на прием сигнала.

В главе 4 предложены и исследованы алгоритмы кодирования и декодирования пакетов импульсных сигналов.

Рассмотрим помехоустойчивость базового алгоритма (алгоритм №1). Допустим, что во время передачи импульсов сигнала, Рис. 11, присутствуют импульсные помехи (на рисунке они пронумерованы). Импульсы помехи №№1, 2, 4, 5, 8 алгоритмически игнорируются, как не попадающие в окно валидации. Импульс №3 попадает в окно и воспринимается как импульс полезного сигнала. Сам полезный импульс, идущий следом, алгоритмически игнорируется.

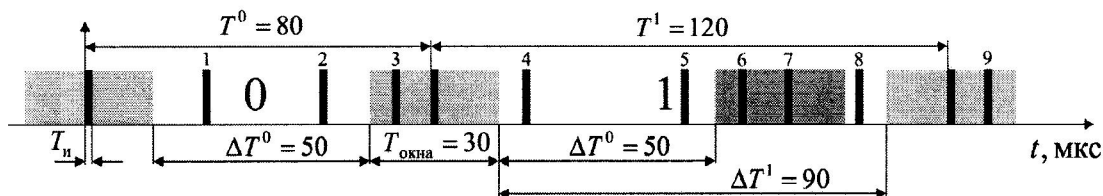


Рис. 11. Помехоустойчивость алгоритма №1

Этот случай не нарушает бит нуля. Просто происходит смещение начала отсчета для определения следующего бита. Допустим, что последующий передаваемый бит – логическая единица. Критическим является появление импульсов помех №№6, 7. Они попадают в окно логического нуля (хотя передается 1), и бит воспринимается как логический ноль, что портит пакет.

Проведем расчетную оценку вероятности приема пакета. Пусть m_{100} – математическое ожидание появления импульса помехи в интервале 100 мкс (Таблица 2). При длительности интервала валидации 30 мкс, то математическое ожидание попадания импульса помехи в этот интервал уменьшится соразмерно отношению длительности интервала и времени передачи бита и составит $m = \frac{30}{100} \cdot m_{100} = 0,3 \cdot m_{100}$. Таким образом, вероятность приема бита можно оценить через вероятность непадания импульса в интервал валидации нуля, которая будет равна

$$p_{\text{бит}} = 1 - 0,3 \cdot m_{100}.$$

В качестве примера рассмотрим тестовый 64-битный пакет $(38E2D296D44E805E)_{16}$ (соответствует одному из реально передаваемых пакетов). Пакет состоит из 35 логических нулей и 29 логических единиц. Тогда вероятность того, что ни один из 29 интервалов передачи единицы не будет нарушен, можно оценить как

$$p = (p_{\text{бит}})^{29} = (1 - 0,3 \cdot m_{100})^{29}.$$

В Таблице 4 приведены результаты расчетной вероятности приема пакета.

Далее более достоверной оценки экспериментальные односекундные реализации шума программно смешивались с непрерывно идущими, одинаковыми 160-ю пакетами сигнала. Итоговые файлы программно декодировались по алгоритму №1, и подсчитывалась вероятность принятых пакетов (Таблица 4, в скобках). Вероятность декодирования по алгоритму №1 низка, особенно для случая работающего двигателя.

Таблица 4.

Вероятности приема пакета по алгоритму №1

Порог, В/условия		0,2	0,3	0,4	0,5
Ниссан	Заж.	0,59(0,34)	0,88(0,89)	0,82(0,89)	0,82(0,87)
	Двиг.	0,38(0,19)	0,49(0,17)	0,64(0,26)	0,95(0,87)
Опель	Заж.	0,29(0,53)	0,52(0,88)	0,73(0,91)	0,62(0,86)
	Двиг.	0,01(0)	0,22(0,06)	0,39(0,11)	0,56(0,17)
Фольксв.	Заж.	0,52(0,35)	0,56(0,28)	0,45(0,34)	0,70(0,42)
	Двиг.	0(0)	0,06(0)	0,15(0,02)	0,26(0,04)

Предложен алгоритм №2, Рис. 12, в котором при тех же интервалах нуля и единицы информация передавалась сдвоенными импульсами, с промежутком в 6 мкс между ними. Такой промежуток времени был обоснован, исходя из статистических распределений межимпульсных интервалов, полученных в главе 3.

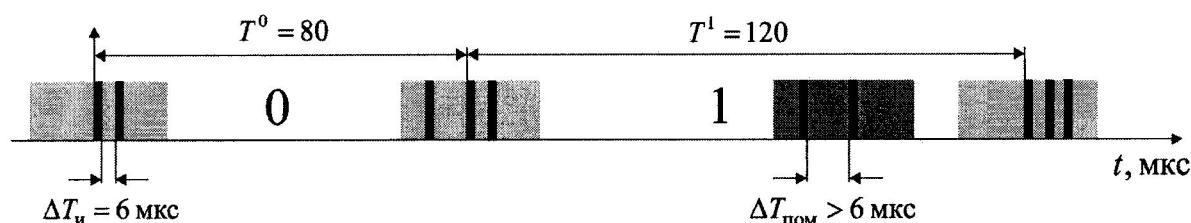


Рис. 12. Помехоустойчивость алгоритма №2

Так как в соответствии с распределением IAT (Таблица 3), вероятность появления последовательных импульсов с интервалом в 6 и менее мкс мала, то при попадании таких помех в интервал валидации они не воспринимаются как сигнал и не портят бит. Вероятности приема по алгоритму №2, полученные программным декодированием сигнала с наложенными импульсными шумами, показаны в Таблице 5. Они значительно выше, а при четырехкратном повторе пакета (Таблица 5, в скобках) вероятность приема близка к 1.

Таблица 5.

Вероятности приема пакета по алгоритму №2					
Порог, В/условия		0,2	0,3	0,4	0,5
Ниссан	Заж.	0,99 (1)	0,98 (1)	0,99 (1)	0,99 (1)
	Двиг.	0,95 (1)	0,99 (1)	1 (1)	1 (1)
Опель	Заж.	0,90 (1)	1 (1)	1 (1)	1 (1)
	Двиг.	0,42(0,89)	0,56(0,96)	0,74 (1)	0,98 (1)
Фольксв.	Заж.	1 (1)	1 (1)	1 (1)	1 (1)
	Двиг.	0,86 (1)	0,95 (1)	0,98 (1)	0,99 (1)

Приведены данные программного декодирования при одновременном воздействии импульсных шумов автомобиля и дополнительного оборудования, что также подтвердило эффективность алгоритма №2.

Глава 5 посвящена вопросам технической реализации и экспериментальным исследованиям беспроводных реле на автомобиле. Разработана техническая документация, содержащая принципиальные схемы, программы микроконтроллеров и конструкции блокировочных и сервисных беспроводных реле, что позволило изготовить серийную партию реле. На Рис. 13, а показана плата главного модуля, различные варианты исполнения беспроводных реле (Рис. 13, б) и тестовое реле с встроенными светодиодами (Рис. 13, в).

Экспериментальная установка включала главный модуль автосигнализации, который подключался к линии питания +12 В на входной клемме замка зажигания. Беспроводное реле подключалось непосредственно на клеммы аккумулятора. Первоначально и главный модуль, и беспроводное реле программировались по алгоритму №1. При нажатии на брелок сигнализации, в проводку передавался 64-

битный пакет, который повторялся 15 раз. В реле были запрограммированы 4 уровня компаратора (0.2, 0.3, 0.4, 0.5 В), которые программно менялись каждые 26 мс. Таким образом, на каждом уровне компаратора реле могло принять 3-4 кодовые посылки.

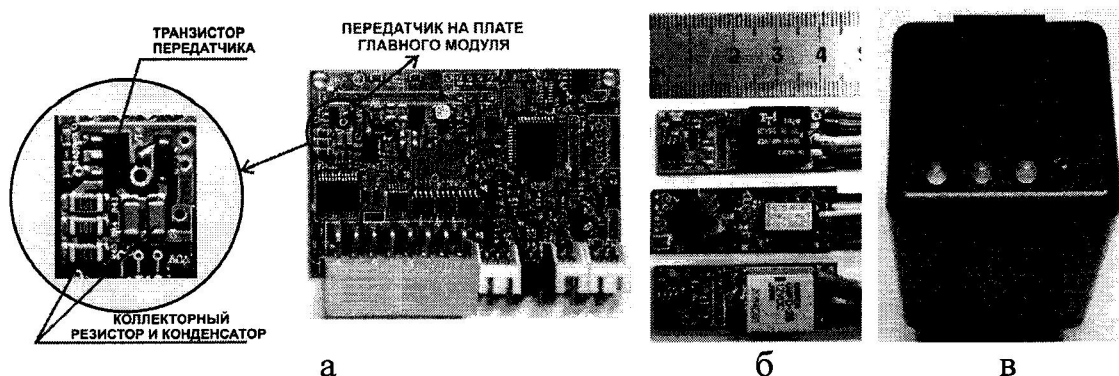


Рис. 13. Платы главного модуля (а); электронных реле (б); тестового реле (в)

Беспроводное реле принимало пакеты, а затем числом вспышек светодиода показывало, сколько пакетов из 15 переданных удалось декодировать. Таким образом, самым успешным случаем считалось наличие 15 вспышек светодиода. Были проведены две серии испытаний, в каждой из которых было 20 нажатий на брелок. Первая серия проводилась при включенном зажигании, вторая – при работающем на холостом ходу двигателе. При включенном зажигании среднее число принятых пакетов при каждом нажатии на брелок составило 5.8, что соответствует 38.7% от числа переданных пакетов. При включенном двигателе среднее число принятых пакетов составило 2.6 (17.3%).

Следующий эксперимент повторял предыдущий, только к аккумулятору дополнительно подключалась сирена сигнализации, создающая дополнительные импульсные помехи в электропроводке. При включенном зажигании было принято 2.3% пакетов, а при включенном двигателе 0%. То есть можно считать, что пакеты при наличии помех от дополнительного оборудования не принимались вообще.

Затем и главный модуль, и беспроводное реле программировались по алгоритму №2 и эксперимент повторялся. В Таблице 6 сведены данные эксперимента по двум алгоритмам. Так как прием считается успешным, если декодирован хотя бы один пакет из 15-ти переданных, то алгоритм №2 обеспечивает прием сигнала с вероятностью 100% даже при включении дополнительного оборудования. Разработана двухэтапная методика настройки порогов компаратора. Кратко суть методики состоит в следующем. На первом этапе используется тестовое реле (Рис. 13, в), которое подключается к проводке в точку предполагаемого монтажа беспроводного реле и линейкой светодиодов показывает уровень импульсного сигнала.

Таблица 6.

Вероятность (в %) принятых пакетов по алгоритмам №1 и №2		
Условия эксперимента	Включено зажигание	Включен двигатель
Сирена отключена	38.7 (98.3)	17.3 (96.7)
Сирена включена	2.3 (82.3)	0 (54.7)

Если уровень слабый, то находится точка с большим уровнем. На втором этапе в выбранную точку подключается беспроводное реле. Передатчик переводится в тестовый режим, при котором в проводку на 16 уровнях компаратора последовательно передаются пакеты сигнала. Реле автоматически находит и записывает в память 4 уровня компаратора на которых число принятых пакетов было наибольшим. Именно на этих уровнях и работает реле в дальнейшем.

Основные результаты диссертации

1. На основе проведенных аналитических обзоров обоснованы преимущества электронных реле, управляемых по штатной электропроводке постоянного тока и использующих прямую цифровую передачу сигнала.

2. Разработаны подмодели системы связи и на основе совокупности теоретических исследований, моделирования и экспериментов обоснованы их параметры.

3. Предложена обобщенная функциональная схема электропроводки в виде совокупности подмоделей, соединенных отрезками электропроводки через замок зажигания с четырьмя шинами постоянного тока. На основе структурной схемы разработана Multisim-модель проводки, позволяющая на качественном уровне анализировать процессы передачи и приема импульсных сигналов. Проведена серия экспериментов, доказывающих адекватность модели.

4. Предложена многоуровневая, многоаспектная классификация импульсных шумов, являющаяся основой для исследований шумовых характеристик проводки современных автомобилей.

5. На основе экспериментальных исследований реализаций импульсных шумов, получены математические ожидания, среднеквадратические отклонения и интегральные функции распределения вероятности межимпульсных интервалов шумов в проводке от штатных электронных блоков автомобиля и от подключаемого дополнительного оборудования. Установлено наличие пороговых значений компаратора, при которых вероятность появления двух последовательных импульсов помехи с интервалом следования менее 6 мкс, мала (ниже 1%).

6. Обоснованы энергетические, временные и частотные ограничения при передаче импульсных сигналов по электропроводке автомобиля. Предложены алгоритмы кодирования-декодирования импульсных пакетов, проведен анализ их помехозащищенности и вероятности приема сигнала на основе расчетов и программного декодирования. Обосновано применение алгоритма с передачей сигнала сдвоенными импульсами с расстоянием между ними 6 мкс, что показало вероятность декодирования близкую к 100%.

7. Предложена двухэтапная методика выбора пороговых значений компаратора реле.

8. Разработана техническая документация для производства электронных реле, изготовлена серийная партия и проведены экспериментальные исследования образцов. Результаты экспериментальных исследований подтвердили основные научные положения диссертации.

Публикации по теме диссертации

Научные статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Васюков С.А., Мурзин И.А. Электронные реле автомобильных охранных сигнализаций, управляемые по силовой электропроводке автомобиля // Приборы. 2018. № 11. С. 27-37 (0,68 п.л. / 0,5 п.л.).

2. Васюков С.А., Мурзин И.А. Методы и устройства передачи цифровых управляющих сигналов по силовой электропроводке автомобиля // Электроника и электрооборудование транспорта. 2019. №2. С. 5-9 (0,4 п.л. / 0,3 п.л.).

3. Васюков С.А., Мурзин И.А., Мисеюк О.И. Моделирование штатной силовой электропроводки автомобиля при передаче по ней импульсных управляющих сигналов // Электроника и электрооборудование транспорта. 2019. №4. С. 2-5 (0,35 п.л. / 0,25 п.л.).

4. Васюков С.А., Мурзин И.А., Мисеюк О.И. Управление электронными реле автомобильных сигнализаций по силовой электропроводке в условиях импульсных помех // Датчики и Системы. 2019. № 6. С. 35-40 (0,42 п.л. / 0,25 п.л.).

5. Васюков С.А., Мисеюк О.И., Мурзин И.А. Применение 3-осевых MEMS-акселерометров для измерения ударных воздействий в автомобильных системах контроля и управления доступом // Приборы. 2018. №4. С. 5-13 (0,56 п.л. / 0,35 п.л.).

6. Васюков С.А., Мурзин И.А., Мисеюк О.И. Применение емкостных датчиков касания в системах контроля и управления доступом // Приборы. 2018. № 5. С. 9-15 (0,43 п.л. / 0,25 п.л.).

Работы, опубликованные в других изданиях

7. Васюков С.А., Мурзин И.А. Применение маломощных высокочастотных трансиверов с индикатором мощности принятого сигнала в системе контроля доступом // Машиностроение и компьютерные технологии. Электрон. журн. 2017. № 8. С. 12-29 (1,1 п.л. / 0,8 п.л.).

8. Vasyukov S., Murzin I. Methods and Devices for Transmitting Digital Control Signals over Car Power Wiring // Proceedings of IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), Saint Petersburg and Moscow; Russian Federation. 2019. P. 1501-1506 (0,53 п.л. / 0,35 п.л.).

9. Krasovsky A., Vasyukov S., Murzin I. The Use of Power Line Communication Technology for Electronic Relays of Car Alarms // Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Soshi; Russian Federation. 2019. P. 91-96 (0,53 п.л. / 0,35 п.л.).

10. Krasovsky A., Vasyukov S., Murzin I. Measurement and Analysis of Impulsive Noise on Car Power Lines // Proceedings of IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Tomsk; Russian Federation. 2019. P. 46-51. (0,55 п.л. / 0,35 п.л.).

11. Krasovsky A., Vasyukov S., Murzin I. Electrical Model of the Car Power Wiring for Transmission of Pulse Control Signals Through it // Proceedings of IEEE International Russian Automation Conference (RUSAUTOCON), Sochi; Russian Federation. 2019. P. 19-24. (0,54