

На правах рукописи

Маковей Александру

**АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В ИММОБИЛАЙЗЕРАХ
АВТОМОБИЛЬНЫХ ОХРАННЫХ СИСТЕМ**

Специальность 2.3.1

Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва - 2024

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: **Никифоров Виталий Меркурьевич**,
доктор технических наук, профессор,
начальник отдела, Ученый секретарь НТС,
заведующий аспирантурой АО «НПЦАП»
имени академика Н.А. Пилюгина»

Косинский Михаил Юрьевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры управления и интеллектуальных
технологий ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский университет «МЭИ»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»

Защита состоится « 4 » февраля 2025 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.331.14, созданного на базе 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 24.2.331.14.

Автореферат разослан « » _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.331.14
кандидат технических наук, доцент

Муратов Игорь Валентинович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В результате санкций, введенных западными странами, практически полностью прекратились поставки новых автомобилей зарубежных производителей и запасных частей к ним. Это вызвало рост количества угонов во многом с целью последующего разбора автомобилей на запасные части. Надежной защитой от угона является профессиональная установка дополнительного противоугонного оборудования – автомобильных охранных комплексов. В изменившихся условиях потребовались новые разработки в области защиты от угона, а также адаптация старых разработок и идей к современным реалиям.

Охранные комплексы являются сложными информационно-автоматическими системами, препятствующими угону и защищающие автомобиль от разбойного нападения. Перспективными исполнительными устройствами комплексов, блокирующими электрические цепи автомобиля при угоне, являются микроиммобилайзеры – электронные реле, дистанционно управляемые кодовым сигналом через электропроводку постоянного тока. Этот способ дистанционной передачи сигнала носит название Power Line Communication (PLC).

Специфика применения PLC в автомобилях раскрыта в работах I. Stievano, F. Canavero, P. Tanguy, F. Nouvel, J. Cortes, V. Degardin и других зарубежных авторов. В работах Васюкова С.А., Мурзина И.А. обоснован и развит способ импульсной цифровой передачи управляющего сигнала по электропроводке автомобиля. Следует отметить, что предложенные ранее алгоритмы в полной мере не обеспечивали надежный прием сигнала в условиях импульсных помех в электропроводке.

При разбойном нападении микроиммобилайзеры являются исполнительными элементами системы автоматического управления плавного торможения автомобиля. Они импульсно прерывают работу двигателя, вплоть до полной остановки автомобиля. Если злоумышленники отбирают ключи и брелки, после высадки владельца в целях его безопасности угнанный автомобиль должен отъехать на некоторое расстояние. Это возможно, если блокировка происходит не сразу, как начинается движение, а при достижении определенной, предустановленной пороговой скорости. Такой алгоритм предполагает наличие в составе иммобилайзера автономного датчика движения. При жестких ценовых ограничениях на реализацию, функцию датчика движения выполняет МЭМС-акселерометр.

Известны алгоритмы, в которых с помощью акселерометра определялась не скорость движения, а приращения скорости на коротких промежутках. Для вычисления скорости, а именно она нужна для алгоритма работы иммобилайзера, требуется достоверно определять моменты начала и остановки движения, что лучше сделать с применением методов машинного обучения, учитывающих индивидуальный спектральный состав ускорений вибраций и движения конкретного автомобиля.

Актуальны две научно-технических проблемы:

- разработка улучшенных алгоритмов импульсной цифровой передачи через электропроводку, обеспечивающих надежный прием сигнала в условиях помех;
- разработка новых алгоритмов определения скорости автомобиля по ускорению МЭМС-акселерометра с применением статистической обработки сигнала и

алгоритмов машинного обучения.

Объектом исследования являются иммобилайзеры охранных систем с функцией автономного определения скорости и управляемые по электропроводке постоянного тока автомобиля в условиях сложной помеховой обстановки.

Целью работы является разработка алгоритмов импульсной передачи сигнала по электропроводке постоянного тока, алгоритмов определения параметров движения с использованием методов машинного обучения и создание на основе новых алгоритмов иммобилайзеров автомобильных охранных систем.

Задачи исследования:

1. Разработка алгоритма определения вектора информативных параметров путем статистической обработки ускорения автомобиля с целью использования вектора при обучении и тестирования моделей классификации состояний движение/покой.

2. Разработка и анализ алгоритмов классификации состояний движение/покой автомобиля по сигналу акселерометра, удовлетворяющих критерию реализуемости на микроконтроллерах с ограниченными ресурсами.

3. Разработка алгоритма определения скорости автомобиля по ускорению произвольно ориентированного МЭМС-акселерометра.

4. Экспериментальное определение статистических характеристик шумов, помех и наводок в цепях постоянного тока автомобиля и разработка улучшенных алгоритмов импульсной передачи управляющих сигналов, применение которых обеспечивает надежное функционирование иммобилайзеров.

5. Проверка работоспособности и эффективности улучшенных алгоритмов с использованием методов моделирования и натурного эксперимента.

Соответствие паспорту научной специальности. Диссертация соответствует паспорту специальности 2.3.1 «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки)». Полученные в ней результаты соответствуют паспорту специальности по п.4 «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта».

Научная новизна:

1. Разработан алгоритм классификации состояний движение/покой автомобиля по вектору информативных параметров, полученных статистической обработкой ускорений 3-осевого МЭМС-акселерометра, использующий настраиваемую по результатам тестовой поездки модель машинного обучения, фильтрацию предсказанного сигнала модифицированным медианным фильтром и отличающийся повышенной вероятностью предсказания состояний в условиях нестационарных помех от вибраций двигателя и неровностей дорожного полотна.

2. Предложен алгоритм вычисления скорости по ускорениям 3-осевого МЭМС-акселерометра, произвольно ориентированного относительно осей координат автомобиля, с использованием результатов предсказания состояний движение/покой моделью машинного обучения, компенсацией переменного уклона дорожного полотна при движении автомобиля и отличающийся повышенной точностью определения скорости на непродолжительных временных интервалах движения.

3. Разработан синхронный алгоритм кодирования/декодирования при импульсной передаче сигнала по бортовой сети постоянного тока, использующий результаты статистических распределений межимпульсных временных интервалов помех и отличающийся от известных асинхронных алгоритмов повышенной вероятностью приема кодовых пакетов при воздействии нестационарных импульсных помех в электропроводке автомобиля.

Практическая значимость:

1. Разработан комплекс программ для определения типа и параметров модели машинного обучения, обеспечивающей достоверную классификацию состояний движение/покой автомобиля.

2. Разработано программное обеспечение, позволяющее определять скорость движения автомобиля по сигналу единственного, произвольно ориентированного МЭМС-акселерометра.

3. Разработано оборудование и программное обеспечение для измерения импульсных шумов в цепях питания автомобиля, которое может быть использовано для настройки параметров алгоритмов импульсной передачи сигнала.

4. Разработана технологическая карта, включающая последовательность действий и комплекс программ по получению и обработке экспериментальных данных ускорений тестовой поездки с целью формирования исполнительного файла программы микроконтроллера иммобилайзера.

Достоверность и обоснованность результатов подтверждены корректным использованием теоретических положений математики, физики, механики, совпадением теоретических расчетов и экспериментальных данных, опытом использования алгоритмов в иммобилайзерах автомобильных охранных систем.

Внедрение результатов работы. Предложенные алгоритмы и технологическая карта реализованы и использованы при разработке оборудования и пакета программ для производства опытных партий автомобильных микроиммобилайзеров, что подтверждено актом внедрения фирмы Мэдрик Ринг ЛТД.

Методы исследований. Научные результаты диссертации получены с применением методов теории вероятности и математической статистики, машинного обучения, цифровой фильтрации и математического моделирования.

Положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Статистические характеристики ускорений автомобилей с заведенным двигателем в неподвижном и движущемся состоянии, позволяющие путем ранжирования сформировать сокращенный вектор информативных параметров для алгоритмов классификации состояний движение/покой.

2. Результаты выбора частоты дискретизации ускорения, размеров скользящего окна и модели машинного обучения, обеспечивающие повышенную (0,95-0,99) вероятность и минимальное время классификации состояний движение/покой по сигналам произвольно ориентированного акселерометра.

3. Алгоритм модифицированного медианного фильтра, позволяющий в десятки раз уменьшить количество ложно отрицательных исходов при классификации состояний движение/покой моделями машинного обучения.

4. Алгоритм определения скорости по сигналам МЭМС-акселерометра, позволяющий с повышенной точностью вычислять скорость автомобиля при дви-

жении по дорожному полотну с изменяющимся профилем на кратковременных временных участках.

5. Синхронный алгоритм кодирования битов нуля и единицы, обеспечивающий при импульсной передаче повышенную (до 0,97) вероятность декодирования пакета ослабленного в электропроводке сигнала при воздействии импульсных шумов, помех и наводок.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: международных IEEE конференциях ICIEAM (г. Сочи, 2021, 2022 гг.), международных IEEE конференциях RusAutoCon (г. Сочи, 2020, 2021, 2023 гг.), международной IEEE конференции SmartIndustryCon (г. Сочи, 2024 г.), Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (г. Москва, 2023 г.).

Структура и объем работы: диссертация состоит из введения, пяти глав, приложения, списка литературы из 87 наименований. Материал изложен на 204 страницах с 77 рисунками и 45 таблицами в тексте.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, формулируется цель исследований, показаны научная новизна и практическая значимость работы, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 носит обзорно-аналитический характер. Рассмотрены алгоритмы взаимодействия иммобилайзера (ИММ) с главным модулем (ГМ) сигнализации. ГМ может передавать в линию +12 В кодовые пакеты импульсов. ИММ берет питание с линии +12 В, с этой же линии выделяет кодовый сигнал управления, декодирует его и выполняет команду на размыкание или замыкание ключа (К), который разрывает электрическую цепь автомобиля, препятствуя угону. В штатном режиме владелец снимает сигнализацию с охраны, затем происходит процедура радиообмена «запрос-ответ» между ГМ и брелком-меткой владельца (М) и, при его успешности, ГМ передает по линии +12 В команду, разрешающую поездку. Ключ К остается замкнутым, алгоритм измерения скорости не активируется и метка больше не опрашивается.

При попытке угона под угрозой применения силы, владелец отдает злоумышленнику ключи, но не отдает метку. Автомобиль уезжает, так как ключ К замкнут. ГМ после закрытия двери иницирует радиообмен с меткой и, не обнаружив ее, передает на ИММ кодовый сигнал, запрещающий поездку. ИММ активирует алгоритм измерения скорости и, при достижении порога $v_{\text{пор}}$ (настраивается от 10 до 30 км/час), импульсно размыкает ключ. После остановки ключ замыкается и позволяет опять запустить двигатель. Происходит имитация неисправности – запустить двигатель можно, но далеко уехать нельзя.

Возможна ситуация, когда у владельца отбирают метку и мобильный телефон. При наличии метки у злоумышленника автомобиль уезжает. Владелец с любого телефона, позвонив на сим-карту ГМ, передает на ИММ сигнал, запрещающий поездку. Для соблюдения условий безопасного торможения (автомобиль может двигаться на большой скорости), противоугонный режим включается не сразу. Датчик движения иммобилайзера должен зафиксировать момент остановки автомобиля, а уже затем, при достижении $v_{\text{пор}}$ блокировать двига-

тель. Не важно, включится ли режим защиты от угона при чуть меньшей или большей $v_{\text{пор}}$ скорости, поэтому точности измерения в $\pm 20\%$ вполне достаточно.

Анализ литературных источников показал, что известные алгоритмы передачи по электропроводке одиночными и сдвоенными импульсами, не обеспечивают близкую к 100% вероятность декодирования пакета сигнала в условиях естественных и искусственно поставленных помех.

Существующие работы по расчету скорости основаны на прямом интегрировании сигнала ускорения, без учета смены состояний движение/покой автомобиля. Такие алгоритмы, не имея информации факте начала движения, позволяют рассчитывать лишь приращение скорости, что неприемлемо для иммобилайзеров. Работы зарубежных авторов по изменению состояний движение/покой относятся в большинстве к исследованию физической активности человека. Они не учитывают сложный спектральный состав ускорений вибраций от двигателя и дорожного полотна, в силу этого не позволяют классифицировать состояния движение/покой и реализовать алгоритм измерения скорости.

Во второй главе проведен анализ сигнала ускорения на временных промежутках движения и покоя при установке акселерометра LMS303DLHS на двух автомобилях, как под капотом, так и в салоне. Акселерометр измерял проекции ускорения $a_{y1}(i, \chi)$, $a_{y2}(i, \chi)$, $a_{y3}(i, \chi)$ с частотой 400 Гц, по которым вычислялось полное ускорение $a_y(i, \chi) = \sqrt{a_{y1}^2(i) + a_{y2}^2(i) + a_{y3}^2(i)}$. Признак $\chi = 0$ при отсутствии движения (двигатель на холостом ходу), и $\chi = 1$ при его наличии.

На Рис. 1 приведен пример ускорения для автомобиля №1 с акселерометром под капотом (а – признак χ ; б – необработанное полное ускорение a_y , в – ускорение \bar{a}_y , усредненное в скользящем окне из 100 отсчетов).

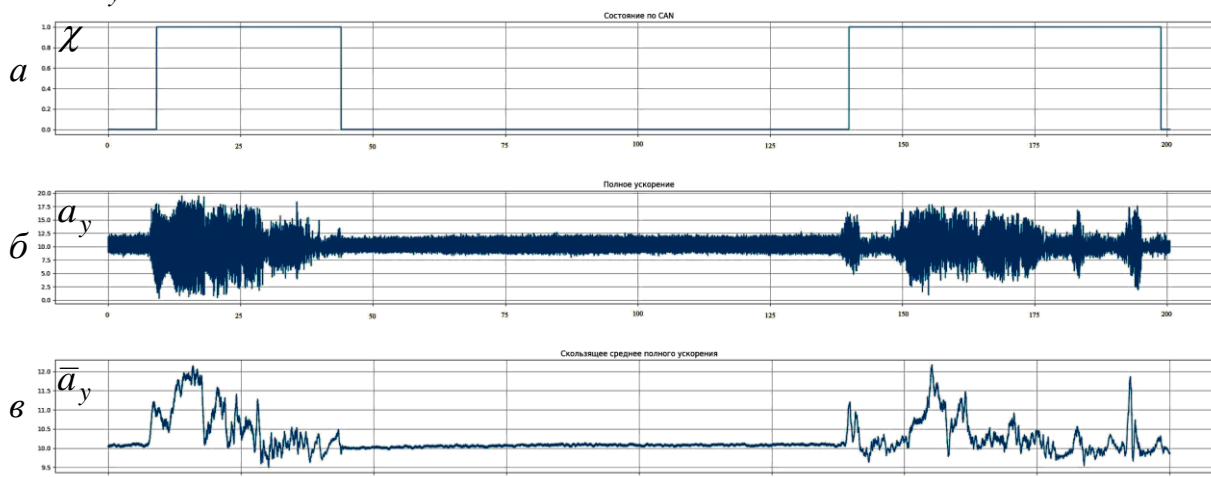


Рис. 1. Реализация ускорения для автомобиля №1

Анализ ускорения показывает, что размах (от пика до пика) шумовой составляющей, вызванной вибрациями двигателя и реакцией подвески на дорогу, сугубо индивидуален в зависимости от состояния движение/покой, мест монтажа акселерометра и марки автомобиля. Например, в случае установки акселерометра под капотом размах шумовой дорожки составляет $\Delta a_y \approx 3,5 \text{ м/с}^2$ (покой)

и $\Delta a_y \approx 6 \div 7 \text{ м/с}^2$ (движение). При расположении тестовой платы в салоне в состоянии покоя $\Delta a_y \approx 0,5 \text{ м/с}^2$, то есть отличается в семь раз от ускорения под капотом. Основная гармоника частоты ускорений вибраций при работе на холостом ходу (покой) составляет около 10 Гц, зависит от марки автомобиля, а при движении частота возрастает в 4-5 раз. Вибрации в покое для разных автомобилей $\Delta a_y \approx 3,5 \text{ м/с}^2$ и $\Delta a_y \approx 6 \text{ м/с}^2$ также отличны. Можно утверждать, что спектральный состав ускорения, измеряемого акселерометром, существенно отличается от автомобиля к автомобилю. Уровень вибраций может значительно превышать ускорение движения. Это обосновывает применение алгоритмов машинной классификации, когда параметры модели индивидуально настраиваются статистической обработкой ускорений тестовой поездки конкретного автомобиля. На вход алгоритма классификации подается набор признаков, имеющих существенное отличие при движении и покое автомобиля. Эти признаки назовем информативными. Выходом алгоритма является признак движения χ .

Для получения вектора информативных признаков для текущего i -го отсчета ускорения сформировано скользящее окно из l элементов от $a_y(i-l+1, \chi)$ и до $a_y(i, \chi)$. Введено понятие статуса всего окна путем подсчета количества элементов N_i со статусом $\chi = 0$. Если количество $N_i \geq l/2$, то статус окна принят $\chi = 0$, в противном случае $\chi = 1$.

После сортировки элементов массива i -го окна и статистической обработки выделены параметры, из которых предложено сформировать полный входной вектор модели классификации. Его элементами являются временные ряды: минимальных $\text{Min}_i(\chi)$, максимальных $\text{Max}_i(\chi)$ и средних статистических $\text{Mean}_i(\chi)$ значений; размаха $\text{Range}_i(\chi)$; медиан $\text{Median}_i(\chi)$; процентилей $\text{Pr}10_i(\chi)$, $\text{Pr}25_i(\chi)$, $\text{Pr}75_i(\chi)$, $\text{Pr}90_i(\chi)$; межквартильных интервалов $\text{IQR}_i(\chi)$; стандартных отклонений $\text{Std}_i(\chi)$ и коэффициентов межосевой корреляции $r_{y_1 y_2 i}(\chi)$, $r_{y_1 y_3 i}(\chi)$, $r_{y_2 y_3 i}(\chi)$. Из каждого ряда выделены два подряда, соответствующие отсутствию ($\chi = 0$) и наличию движения ($\chi = 1$).

Для каждого параметра построены ящичные диаграммы, по которым возможно оценить степень информативности. Чем больше зазор между состояниями покоя и движения, тем более информативным является параметр, и тем лучше он подойдет для алгоритма классификации. На Рис. 2 приведены примеры ящичных диаграмм, полученных в результате обработки выборки для автомобиля №2 при расположении акселерометра в салоне. Коэффициент корреляции $r_{y_1 y_2}$ Y1-Y2 (Рис. 2, а) и Max (Рис. 2, б), имеющие явно выраженный зазор между состояниями State0 (покой, двигатель на х.х.) и State1 (движение) можно отнести к информативным, а Mean (Рис. 3, в) – к неинформативным.

В Таблице 1 приведены данные по информативности для разных автомобилей и расположений акселерометра. Здесь параметр информативен (+), неинформативен (-), скорее информативен (+-), скорее неинформативен (-+).

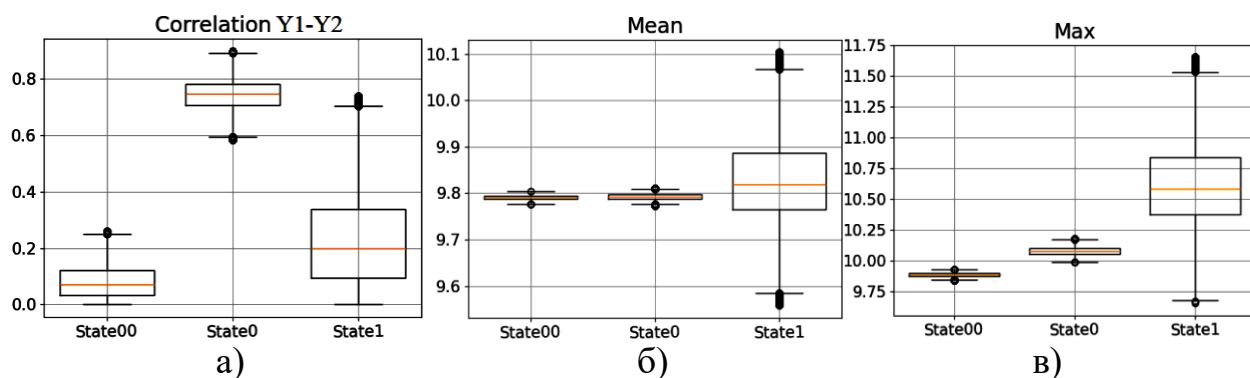


Рис. 2. Примеры ящичных диаграмм

Анализ показал, что один и тот же параметр может быть информативен в одних условиях, и неинформативен в других. В целях упрощения реализации алгоритма классификации, предложено формировать путем ранжирования сокращенный вектор из 3-х наиболее информативных параметров.

Таблица 1.

Параметр	r_{y1y2}	r_{y1y3}	r_{y2y3}	IQR	Max	Mean	Min
Авт. №1, п/кап.	+	+	+	—+	—+	—	+-
Авт. №1, сал.	+	+	+	+	+	—	+
Авт. №2, п/кап.	—	—	—	+	+	—	+
Авт. №2, сал.	—	—	—	+	+	—	+
Параметр	Pr_{10}	Pr_{25}	Median	Pr_{75}	Pr_{90}	Range	Std
Авт. №1, п/кап.	—+	—	—	—	—	+-	—+
Авт. №1, сал.	+-	—	—	+-	+-	+	+
Авт. №2, п/кап.	+	—	—	+-	+	+	+-
Авт. №2, сал.	+	—+	—	+	+	+	+

Ящичные диаграммы обладают хорошей наглядностью, но их трудно формализовать для выделения информативных параметров. Для автоматического ранжирования параметров и формирования сокращенного входного вектора рассмотрено применение шести методов ранжирования: Bhattacharyya, ROC, CatBoostClassifier, Entropy, Gini, t-test. Лучшее совпадение с ящичными диаграммами дали первые три метода, предложено в дальнейшем использовать именно их для выбора и настройки конкретного алгоритма классификации.

В главе 3 предложена структурная схема алгоритма вычисления скорости (Рис. 3) по сигналу произвольно ориентированного акселерометра, включающая ветвь алгоритма машинного обучения для классификации состояний. В результате аналитического обзора предложены четыре относительно простых в реализации алгоритма машинного обучения: метод опорных векторов, деревья решений, перцептрон, регрессия. К ним добавлены два относительно сложных в реализации алгоритма: рекуррентные нейронные сети и многослойные сети пря-

мого распространения. Введено понятие ложно положительных FP (false positive) и ложно отрицательных FN (false negative) ошибок классификации первого, второго и третьего рода (Рис. 4). Доказано, что для вычисления скорости движения наиболее неблагоприятна ошибка FN1, когда алгоритм предсказывает отсутствие движения, при его реальном наличии (состояние TP-true positive). Даже если ошибка FN1 кратковременна, в момент t_5 алгоритм вычисления скорости прекращает работу. А в момент t_6 вычисление начинается вновь, полагая начальную скорость равной нулю, хотя истинная скорость может быть очень большой.

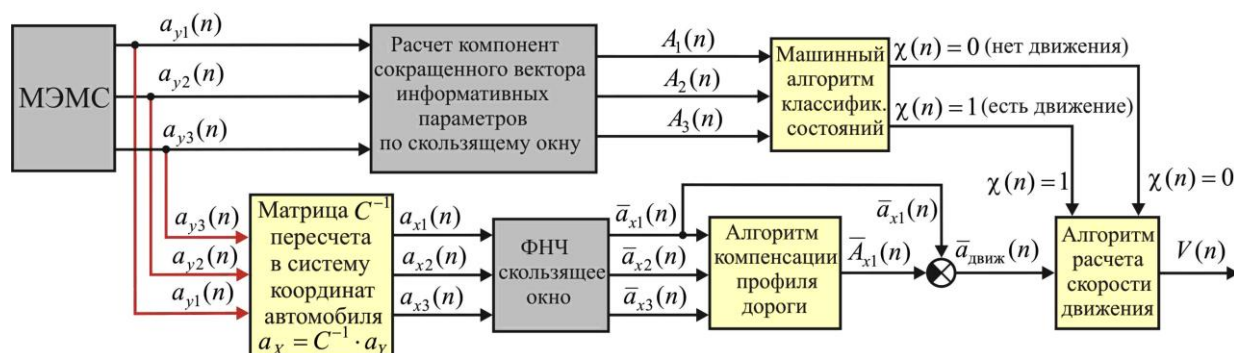


Рис. 3. Структурная схема алгоритма определения скорости автомобиля

Ошибки FN2 и FN3 в конце и начале истинного движения влияют в гораздо меньшей мере, так как скорость автомобиля или уже, или еще мала. Ошибки всех родов типа FP на вычислении скорости не сказываются вообще, так как ускорение движения на участках TN (true negative) равно нулю.



Рис. 4. Ошибки классификации: состояния – истинное (а); предсказанное (б)

В итоге, для оценки точности классификации предложена модифицированная метрика Recall_mod, отличающаяся от обычной метрики введением коэффициента $k < 1$ и позволяющая в полной мере учитывать влияние ложно отрицательных исходов различного рода:

$$\text{Recall_mod} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN1} + k \cdot (\text{FN2} + \text{FN3})} \quad (1)$$

Результаты работы разных алгоритмов показали, что большинство ошибок классификации имеют длительность менее секунды, поэтому их количество может быть уменьшено за счет применения цифровых фильтров. Рассматривались относительно простые в реализации фильтры: медианный и Савицкого-Голея. В стандартном медианном фильтре при размере скользящего окна, например, в 100 отсчетов, и предсказанному состоянию, равному 1, счетчик фильтра увеличивает

свое состояние на 1; если предсказанный сигнал 0, счетчик уменьшает состояние на 1. Максимальное значение счетчика не превышает 100, а минимальное не опускается ниже 0. Если число в счетчике ниже порога 50, предсказанное текущее состояние на выходе фильтра принимается 0, иначе 1.

Предложен модифицированный медианный фильтр с большим темпом нарастания состояния счетчика (например, 2) и меньшим темпом убывания (например, 0,5). Медианный фильтр с размером окна $T_{\text{окна}}$ удаляет ошибки всех видов, протяженностью менее $T_{\text{окна}}/2$, а предложенный модифицированный отфильтровывает ложно отрицательные исходы, длительностью менее $T_{\text{окна}}$.

Реализуемость алгоритма при работе в реальном времени зависит от частоты f дискретизации ускорения и размера скользящего окна. Проведены исследования точности классификации в зависимости от этих параметров для отмеченных ранее четырех относительно простых алгоритмов. Пример зависимостей для автомобиля №2 при расположении акселерометра в салоне показан на Рис. 5. Анализ результатов показал, что при частотах ниже 25 Гц наблюдается снижение точности, поэтому в дальнейшем для всех моделей предложена частота 50 Гц и размер окна 100. Более предсказуемо для всех исследованных случаев вели себя алгоритмы опорных векторов и регрессии, поэтому их применение при классификации предпочтительно.

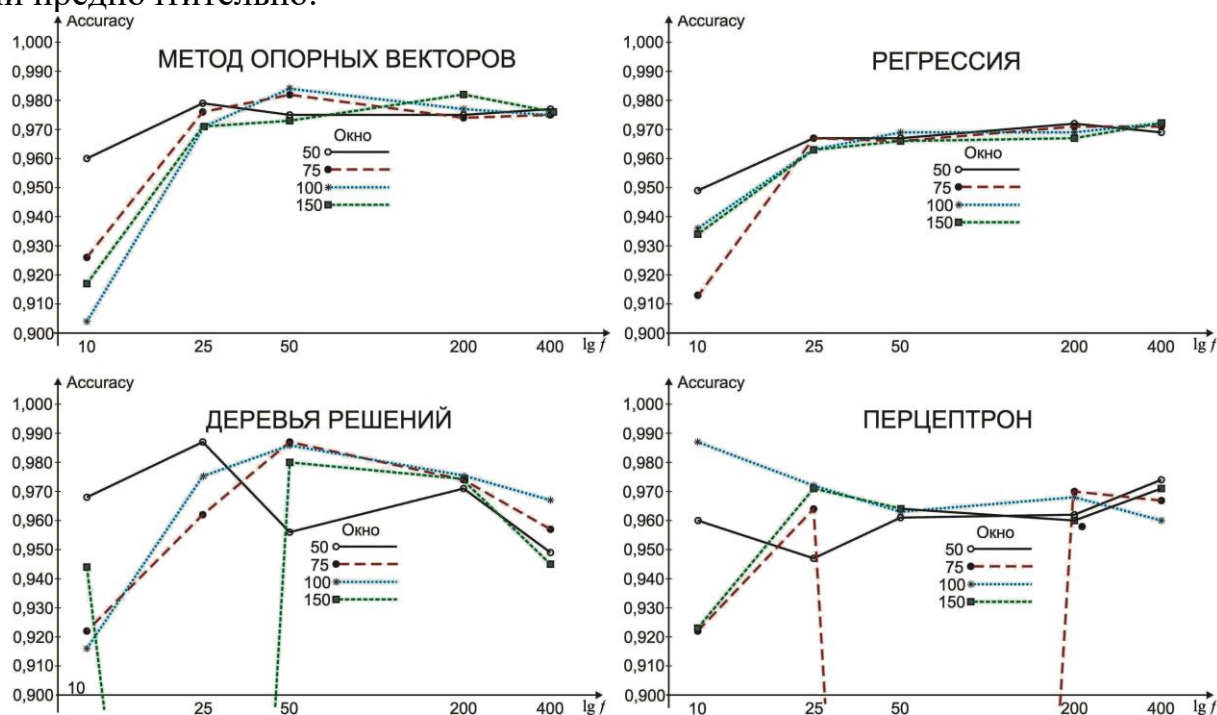


Рис. 5. Точность в функции частоты дискретизации f и размера окна

Проведена оценка скорости работы алгоритмов, путем сопоставления времен обучения и предсказания на одинаковых выборках. Большие (от 10 до 250 раз) времена, по сравнению с другими алгоритмами, показал метод опорных векторов. По остальным алгоритмам времена сопоставимы и уменьшаются со снижением частоты и размера окна. Путем обработки данных тестовых поездок подтверждена невозможность создания универсального алгоритма классификации. Обученная на выборке одного объекта модель, при тестировании на других объ-

ектах показывала низкую (0,3-0,5) точность классификации.

Приведены результаты тестирования шести алгоритмов классификации на 4-х разных выборках, полных и сокращенных векторах признаков при отсутствии фильтрации, медианном фильтре, модифицированном медианном фильтре и фильтре Савицкого-Голея. Показано, что точность классификации по метрике Recall_mod практически для всех алгоритмов с фильтрами Савицкого-Голея и модифицированным медианным, для разных объектов и условий находится в пределах 0,92-0,99. Число ошибок FN1 за тестовые 15-минутные поездки было в пределах от 0 до 2, что считается приемлемым результатом.

Предложен алгоритм выбора модели машинного обучения (Рис. 6). Он включает блоки ранжирования и подготовки обучающих и тестовых массивов для трех наборов сокращенных векторов (Рис. 6, а). Блок выбора оптимальной модели (Рис. 6, б) показан на примере обработки данных обучающего и тестового массива для сокращенного вектора №1. И наконец, на Рис. 6, в приведен блок выбора оптимальной пары: алгоритма машинного обучения и сокращенного вектора информативных параметров. Оптимальность находится по минимуму ошибок типа FN1 при классификации тестовой выборки различными алгоритмами с разными сокращенными векторами. При равенстве FN1 предпочтение отдается паре с наилучшим значением метрики Recall_mod, а при прочих равных с лучшей точностью по метрике Accuracy.

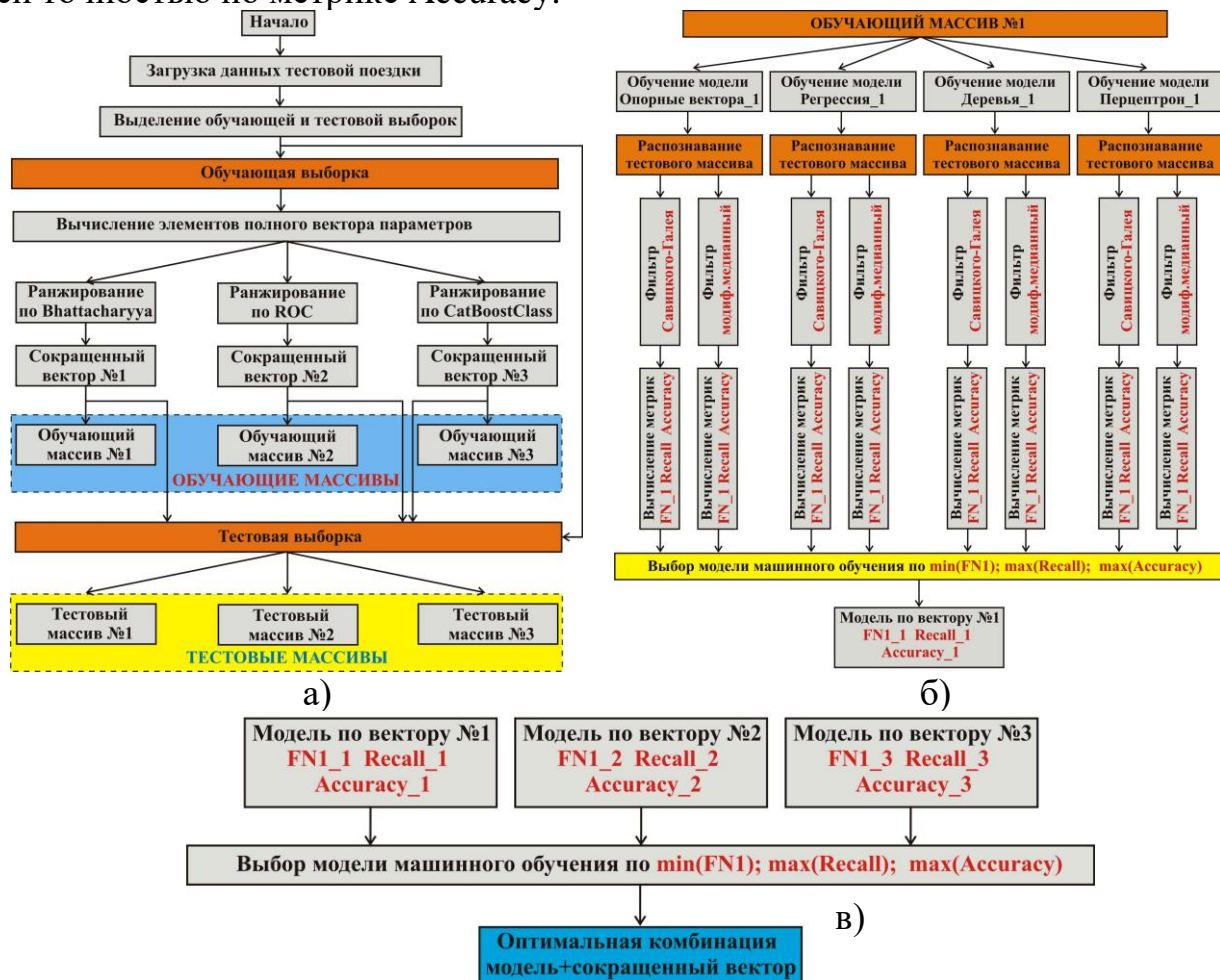


Рис. 6. Блок схема алгоритма выбора модели машинного обучения

В главе 4 раскрыт алгоритм (Рис. 3) вычисления скорости по сигналу МЭМС-акселерометра. Пусть $\bar{a}_Y = [\bar{a}_{y1} \bar{a}_{y2} \bar{a}_{y3}]^T$ и $\bar{a}_X = [\bar{a}_{x1} \bar{a}_{x2} \bar{a}_{x3}]^T$ векторы ускорений в осях акселерометра ($OY_1Y_2Y_3$) и автомобиля ($OX_1X_2X_3$), усредненные в скользящем окне. Для приближенного вычисления скорости необходимо знать ускорение $\bar{a}_{x1}(t)$ по продольной оси автомобиля, а его можно вычислить при известной матрице пересчета C , связывающая векторы ускорений $\bar{a}_Y = C \cdot \bar{a}_X$. Так как акселерометр ориентирован относительно осей автомобиля произвольно, вычисление компонент матрицы C , являющихся функциями углов Эйлера между системами координат, возможно только по экспериментальным данным. Предложен алгоритм вычисления компонент матрицы C (Рис. 7, а) по ускорениям акселерометра неподвижного автомобиля при горизонтальном $a_{y1(1)}, a_{y2(1)}, a_{y3(1)}$ и наклонном $a_{y1(2)}, a_{y2(2)}, a_{y3(2)}$ положениях. Здесь α - известный угол наклона продольной оси к горизонту.

Расчет скорости (Рис. 7, б) для каждого участка отдельно начинается в момент смены статуса движения $\chi(n)$ из 0 в 1, когда начальная скорость $v_{x1}(0) = 0$.

Скорость $v(t) = \int_0^t \bar{a}_{\text{движ}}(t) dt = \int_0^t (\bar{a}_{x1}(t) - \bar{A}_{x1}(t)) dt$ рассчитывается интегрированием ускорения движения $\bar{a}_{\text{движ}}(t)$, равного разности ускорения $\bar{a}_{x1}(t)$ по продольной оси автомобиля и статического ускорения $\bar{A}_{x1}(t)$ от наклона продольной оси к горизонту (наклон дорожного полотна).

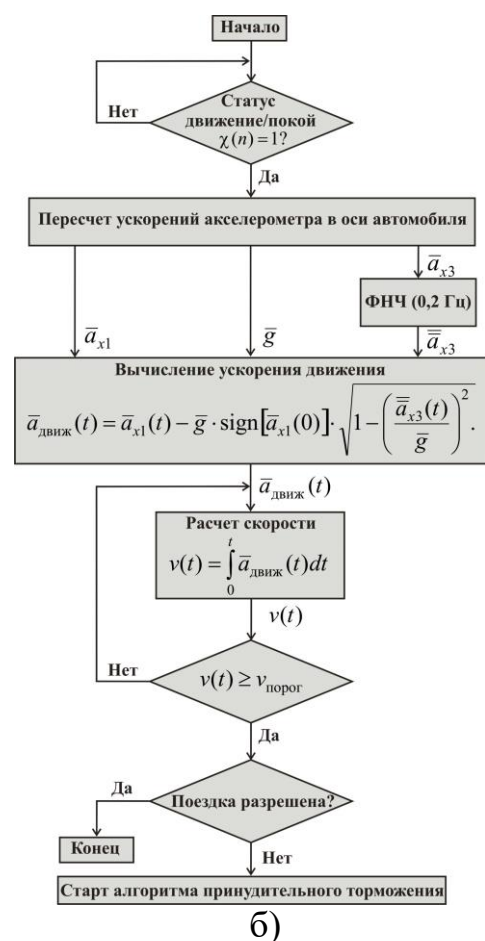
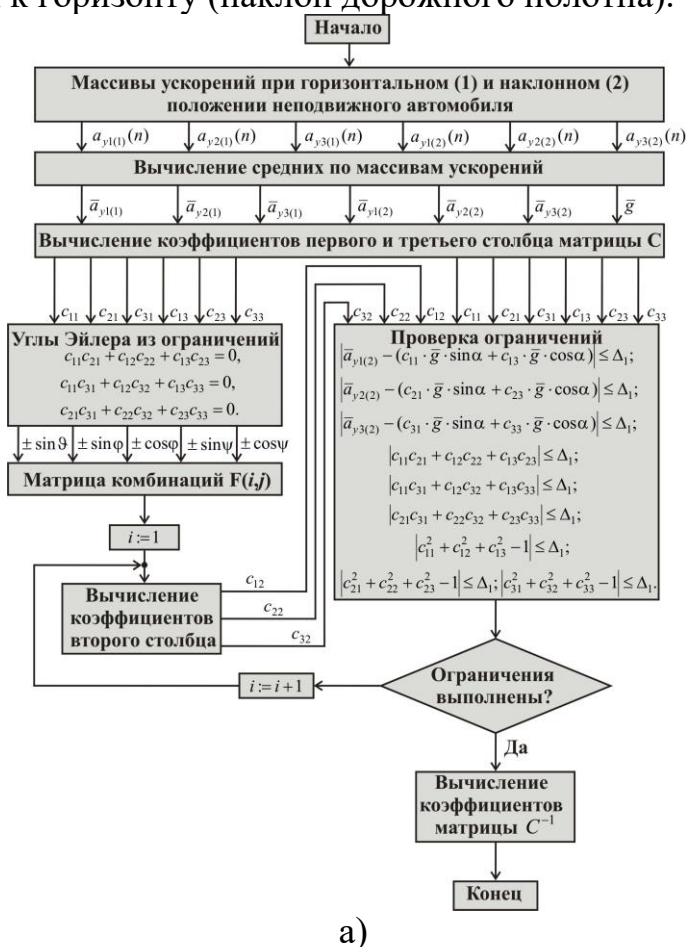


Рис. 7. Блок схемы алгоритмов вычисления: а - матрицы C ; б - скорости

В простейшем случае можно принять, что во время движения профиль дороги не меняется и $\bar{A}_{x1}(t) = \bar{A}_{x1}(0) = -\bar{g} \cdot \sin \alpha(0) = const$, где $\bar{A}_{x1}(0)$ - статическое ускорение, соответствующее углу наклона $\alpha(0)$ в конце участка покоя. Но такой подход при изменении профиля ведет к накоплению ошибки, и скорость в конце в момент перехода сигнала статуса $\chi(n)$ из 1 в 0 будет ненулевой. Выделение $\bar{A}_{x1}(t) = \bar{g} \cdot \sin \alpha(t)$ из сигнала продольного ускорения $\bar{a}_{x1}(t)$ путем низкочастотной фильтрации малоперспективно, так как скорости изменения наклона $\alpha(t)$ и ускорения движения одного порядка. В работе предложено вычислять сигнал $\bar{A}_{x1}(t) = \bar{g} \cdot \sin \alpha(t)$ через ускорение \bar{a}_{x3} по вертикальной оси X_3 автомобиля. Это обосновано тем, что при движении среднее перемещение и средняя скорость по оси X_3 равны нулю, а лишь присутствуют колебания ускорения от неровностей дороги и реакции подвески. Среднее ускорение по оси X_3 $\bar{\bar{a}}_{x3}(t) = \bar{g} \cdot \cos \alpha(t)$ пропорционально $\cos \alpha(t)$ и тогда

$$\bar{A}_{x1}(t) = -g \cdot \text{sign}[\bar{a}_{x1}(0)] \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\bar{\bar{a}}_{x3}(t)}{\bar{g}} \right)^2}. \quad (2)$$

На Рис. 8 приведен пример тестовой поездки с расчетом скорости по участкам и применением алгоритма компенсации дорожного полотна по (2) - нижний график, и по $\bar{A}_{x1}(0)$ - второй снизу график.

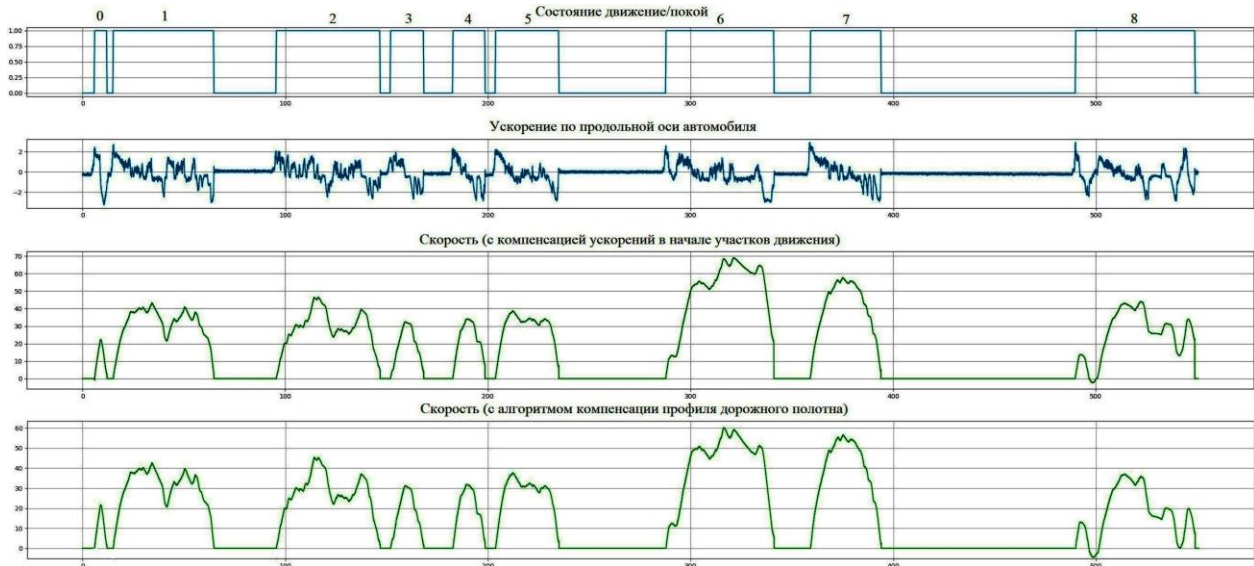


Рис. 8. Скорость движения по участкам

Так как измерение истинной скорости движения не представлялось возможным, качество работы алгоритма оценивалось по остаточной скорости в конце участка движения, которая теоретически должна была быть нулевой. В Таблице 2 представлены данные (в км/час) максимальных и остаточных скоростей по участкам движения с компенсацией профиля по $\bar{A}_{x1}(0)$ (числитель) и $\bar{A}_{x1}(t)$ (знаменатель).

Таблица 2.

№ участка	0	1	2	3	4	5	6	7	8
V_{\max}	22,3/21,6	43,4/42,7	46,5/45,4	32,4/31,3	34,1/31,9	38,7/37,7	69,1/60,2	57,7/56,6	44,0/37,0
$V_{\text{ост}}$	2,2/0,9	2,7/1,1	4,5/1,5	4,1/1,6	7,3/2,2	7,4/3,6	20,9/5,2	7,1/2,7	22,6/7,7
$\frac{V_{\text{ост}}}{V_{\max}}, \%$	9,9/4,2	6,3/2,6	9,7/3,3	12,8/5,1	21,3/6,9	19,2/9,6	30,2/8,6	12,3/4,8	51,5/20,8

Применение алгоритма компенсации $\bar{A}_{x1}(t)$ позволило уменьшить остаточную скорость в среднем в 2,6 раза.

Предложена технологическая карта выпуска иммобилайзера, включающая последовательность действий по монтажу, калибровке, сбору данных и программированию иммобилайзера.

В пятой главе проведен аналитический обзор публикаций по исследованию временных и статистических характеристик импульсных шумов в электропроводке автомобилей. В результате обзора, а также с использованием экспериментальных исследований, установлено, что вероятность появления последовательных импульсов помех с интервалом между импульсами менее 6 мкс мала. На этом свойстве базируется известный алгоритм (Рис. 9) кодирования 0 и 1 при передаче кодовых пакетов по электропроводке автомобиля. Интервал в 80 мкс между двойными импульсами с расстоянием в 6 мкс соответствует передаче логического 0, а 120 мкс – логической 1. Алгоритм впервые предложен Мурзиным И.А. и получил развитие в работах автора диссертации при исследовании цифровой передачи с искусственно поставленными помехами.

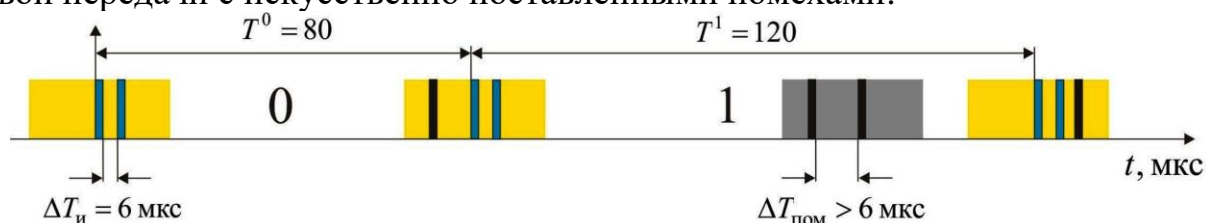


Рис. 9. Асинхронный алгоритм кодирования 0 и 1 сдвоенными импульсами

Помехозащищенность алгоритма основана на низкой вероятности появления сдвоенного импульса помехи в окне валидации. Недостаток алгоритма связан с его асинхронностью, когда время каждого последующего бита отсчитывается с момента принятия предыдущего бита. Если какой-либо бит послышки принят неправильно, например, при попадании сдвоенного импульса помехи в окно валидации 0 при передаче 1, это нарушает прием всех последующих бит. Реализация алгоритма на микроконтроллере с внутренним RC-генератором требовала расширенное (30 мкс) окно валидации, чтобы не пропустить полезный сигнал при изменении температуры окружающей среды. Увеличенный размер окна повышал вероятность попадания в него сдвоенного импульса помехи и снижению вероятности приема пакета.

Предложен новый синхронный алгоритм (Рис. 10), в котором за счет кварцевой стабилизации в три раза (до 10 мкс) уменьшен размер окна.

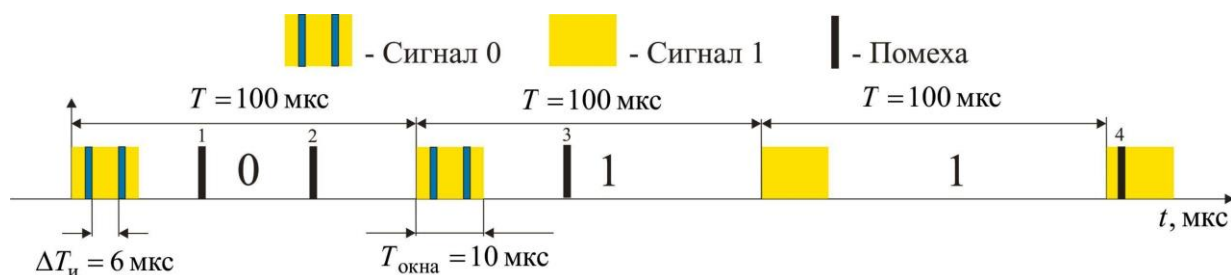


Рис. 10. Синхронный алгоритм кодирования 0 и 1 сдвоенными импульсами

Биты 0 и 1 кодировались одним и тем же интервалом в 100 мкс, что позволило ввести синхронизацию приема. Логический 0 передавался наличием сдвоенного импульса сигнала в окне валидации, а логическая 1 – отсутствием сдвоенного сигнала. Синхронный алгоритм позволяет исправлять ошибки при передаче 64-битных пакетов, что было невозможно в асинхронном алгоритме.

Для теоретической оценки вероятности приема пакета была предложено использовать выражение

$$p = (p_{\text{бит}})^n = \left(1 - \frac{T_{\text{окна}}}{T} \cdot m_{100} \cdot p(\Delta t \leq 6)\right)^n, \quad (3)$$

где $n = 64$ - число бит в пакете; $p_{\text{бит}}$ - вероятность приема бита; m_{100} - среднее статистическое значение количества импульсов помех в 100 мкс интервале; $p(\Delta t \leq 6)$ - вероятность появления сдвоенного импульса помехи (m_{100} и $p(\Delta t \leq 6)$ - экспериментальные данные, зависящие от марки автомобиля, места измерения сигнала и порогового напряжения компаратора приемника импульсного сигнала).

Адекватность оценки (3) была подтверждена совпадением с результатами программного декодирования пакетов сигнала с наложенным шумом.

В Таблице 3 приведены сравнительные данные вероятностей приема при программном декодировании пакетов сигнала с наложенным шумом для синхронного и асинхронного (в скобках) алгоритмов. Данные приведены при передаче пакетов сигнала по электропроводке трех автомобилей, в условиях, когда было включено зажигание или двигатель работал на холостом ходу. Приемник сигнала работал на четырех разных пороговых уровнях.

Таблица 3.

Порог, В/условия		0,2	0,3	0,4	0,5
Ниссан	Зажигание	0,99(0,99)	0,98(0,98)	0,99(0,99)	0,99(0,99)
	Двигатель	0,97(0,95)	0,99(0,99)	1,00(1,00)	1,00(1,00)
Опель	Зажигание	0,97(0,90)	1,00(1,00)	1,00(1,00)	1,00(1,00)
	Двигатель	0,76(0,42)	0,93(0,56)	0,98(0,74)	1,00(0,98)
Фольксваген	Зажигание	1,00(1,00)	1,00(1,00)	1,00(1,00)	1,00(1,00)
	Двигатель	0,97(0,86)	0,98(0,95)	1,00(0,98)	1,00(0,99)

Существенное (до 30%) улучшение приема наблюдалось (выделено серым) при работающем двигателе (большой уровень импульсных помех) и низком пороге компаратора приемника, что особо важно при выделении ослабленного полезного сигнала на фоне помех.

Проведена оценка вычислительных затрат на реализацию предложенных алгоритмов. Обосновано использование микроконтроллеров STM32L413xx с максимальной частотой работы процессорного ядра 80 МГц, наличием всех необходимых ресурсов и удовлетворяющих ценовым ограничениям.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Обоснован индивидуальный подход к вычислению состояний движение/покой автомобиля, основанный на алгоритмах машинного обучения. Предложено формировать параметры входного вектора для алгоритма машинного обучения путем статистической обработки сигналов ускорений скользящего окна. Для упрощения реализации алгоритма предложено ранжировать параметры, выделяя три наиболее информативных. Обоснован выбор алгоритмов ранжирования Бхаттачарья, ROC и CatBoostClassifier.

2. Введено понятие ложно положительных и отрицательных ошибок первого, второго и третьего рода при классификации состояний движение/покой. Доказано преобладающее влияние ложно отрицательных ошибок первого рода при определении скорости. Предложен алгоритм работы модифицированного медианного фильтра, минимизирующего ложно отрицательные исходы.

Предложена модифицированная метрика Recall_mod для оценки точности двоичной классификации состояний движение/покой, позволяющая наилучшим образом учесть влияние ложно отрицательных ошибок.

Обоснован выбор минимально допустимой частоты квантования сигнала ускорения и размера скользящего окна, достаточных для обеспечения требуемой точности классификации и времени распознавания. Доказана невозможность разработки универсального алгоритма классификации для любых марок автомобилей и мест крепления акселерометра.

3. Показано, что точности классификации по метрике Recall_mod и число ложно отрицательных исходов первого рода при использовании модифицированного медианного фильтра для относительно простых (опорные вектора, регрессия, деревья решений, перцептрон) и относительно сложных (многослойная и рекуррентная нейронные сети) моделей сопоставимы. Это обосновывает применение относительно простых в реализации алгоритмов машинного обучения в условиях ограничений на вычислительные ресурсы микроконтроллера иммобилайзера.

4. Предложен алгоритм выбора оптимальной пары: разновидности модели машинного обучения и компонент сокращенного входного вектора. Он содержит блоки сбора данных, формирования полного и сокращенного, путем ранжирования, входного вектора, обучения/тестирования, фильтрации и блок оптимизации по минимуму ложно отрицательных ошибок первого рода и метрике Recall_mod.

5. Предложен оригинальный алгоритм пересчета ускорений акселерометра в ускорения по осям автомобиля, использующий экспериментальные данные акселерометра при нахождении неподвижного автомобиля на горизонтальной и наклонной поверхностях. Разработан алгоритм определения скорости автомобиля на кратковременных временных участках. Вычисление скорости проводится путем интегрирования ускорения по продольной оси автомобиля с учетом

состояний движение/покой и с применением алгоритма компенсации профиля дорожного полотна.

6. Предложен синхронный алгоритм цифровой передачи сдвоенными импульсами с уменьшенным окном валидации и коррекцией ошибок, позволяющий улучшить до 30% вероятность декодирования пакета управляющего сигнала при низких порогах компаратора приемника. Приведены рекомендации по выбору типа микроконтроллера приемлемого ценового диапазона, с наличием всех необходимых ресурсов, периферийных устройств и обеспечивающего возможность реализации предложенных алгоритмов.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Васюков С.А., Маковей А., Мисеюк О.И. Прямая цифровая передача управляющих сигналов через бортовую сеть постоянного тока автомобиля // Датчики и системы. 2022. №4. С. 20-27 (0,68 п.л. / 0,5 п.л.).

2. Васюков С.А., Красовский А.Б., Маковей А. Определение движения автомобиля по сигналам МЭМС-акселерометра // Датчики и системы. 2024. №2. С. 62-69 (0,68 п.л. / 0,5 п.л.).

3. Васюков С.А., Кабаков В.А., Маковей А. Определение движения автомобиля по сигналу МЭМС-акселерометра с применением методов машинного обучения // Приборы. 2024. №2. С. 6-13 (0,68 п.л. / 0,5 п.л.).

4. Krasovsky A.B., Vasyukov S.A., Macovey A. Measurement and Analysis of Impulsive Noise in Vehicular Power Lines // Proceedings of IEEE International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Soshi; Russian Federation. 2020. P. 410-415 (0,53 п.л. / 0,35 п.л.).

5. Vasyukov S.A., Macovey A., Tronnikov A.I. Algorithms for Direct Digital Transmission of Control Signals Through the Vehicle's On-Board DC Network // Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Soshi; Russian Federation. 2021. P. 850-855 (0,53 п.л. / 0,35 п.л.).

6. Vasyukov S.A., Macovey A., Tronnikov A.I. Impulsive Noise from the Optional Equipment on In-Vehicle Power Lines // Proceedings of IEEE International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Soshi; Russian Federation. 2021. P. 238-243 (0,53 п.л. / 0,35 п.л.).

7. Vasyukov S.A., Macovey A. Multifunctional Shock, Tilt and Motion Sensor Based on MEMS Accelerometer Network // Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Soshi; Russian Federation. 2022. P. 936-941 (0,53 п.л. / 0,35 п.л.).

8. Vasyukov S.A., Macovey A. Algorithms for Processing the Information Signal of the Shock Sensor Car Security System Network // Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Soshi; Russian Federation. 2022. P. 942- 947 (0,53 п.л. / 0,35 п.л.).

9. Vasyukov S.A., Krasovsky A.B., Macovey A. Statistical Analysis of Accelerations in Car Movement // Proceedings of IEEE International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Soshi; Russian Federation. 2023. P. 105-110 (0,53 п.л. / 0,35 п.л.).

10. Vasyukov S.A., Kabakov B.A., Macovey A. Application of Machine Learning Methods to Determine the Movement of a Car Using a MEMS Accelerometer Signal // Proceedings of International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon), Soshi; Russian Federation. 2024. P. 92-97 (0,53 п.л. / 0,35 п.л.).

11. Васюков С.А., Кабаков В.А., Маковей А. Датчик скорости автомобиля на основе МЭМС-акселерометра // Будущее машиностроения России: сб. тр. XVI Всерос. конф. молодых ученых и специалистов. Москва, 2024. С. 401-410 (0,87 п.л. / 0,4 п.л.).