

**ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА**

УДК 681.586.5

**ВИБРОАКУСТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ
АГРЕГАТОВ АВТОМОБИЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВОЛОКОННО-
ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ¹**

© 2026 г. Т. В. Гриценко^{a, b, *}, Г. Д. Мамыкин^{a, c}, А. А. Кустенков^{a, d}

^aПубличное акционерное общество «Московская городская телефонная сеть»,
Россия, 127030, Москва, Новослободская ул., 29, стр.2

^bМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Россия, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр.1

^cПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Россия, 614990, Пермь, Комсомольский просп., 29

^dМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1

*E-mail: chobantv@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.04.2026

После доработки 11.05.2026

Принята к публикации 18.06.2026

Исследована возможность вибро-акустического анализа агрегатов автомобиля с применением волоконно-оптических датчиков на основе интерферометра Маха-Цендера. Описан общий вид разработанной системы вибро-акустического мониторинга, а также предложены конструкция точечных датчиков и схема их установки в автомобиле для регистрации вибраций трансмиссии и подвески. Прототип системы установлен на новом легковом автомобиле, после чего автомобиль введен в рабочую эксплуатацию и проведен сбор данных о вибрации двигателя, коробки переключения передач и четырех точек подвески в процессе их штатной работы. Представлены результаты анализа первичного набора экспериментальных данных в спектральной области.

Ключевые слова: волоконная сенсорика, вибродиагностика, интерферометр Маха-Цендера, волоконный интерферометр, диагностика автомобиля

1. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день волоконно-оптические датчики (ВОД) различных воздействий широко распространены в научных исследованиях и различных прикладных применениях. Использование ВОД в промышленности развивается в связи

¹ Международная конференция «Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика 2026», Россия, Пермь, 26–28 мая 2026 г.

с развитием автоматизации контроля и управления системами, разработкой и внедрением новых технологических процессов [1]. К основным преимуществам ВОД по сравнению с другими типами сенсорных систем относятся пассивность (датчики полностью диэлектрические), малогабаритность, невосприимчивость к электромагнитной интерференции, способность работать в пожароопасных условиях и при повышенных температурах, высокая чувствительность, возможность уплотнения электрических и оптических сигналов, низкая стоимость компонент за счет высокого уровня развития рынка телекоммуникационных и оптоэлектронных компонентов [2]. Широкое распространение получили ВОД, позволяющие производить измерение виброакустических воздействий на объекты: применяются и активно развиваются как датчики распределенного типа (позволяющие производить обнаружение и анализ воздействий вдоль длинного кабеля с определенным разрешением), так и точечные датчики (которые позволяют проводить измерения и контролировать параметры в определенной точке объекта, как и большинство других типов неволоконных датчиков). Применение ВОД зачастую целесообразно в ситуациях, в которых использование электрических датчиков затруднительно, например, в агрессивной среде, при высоких или пониженных температурах [3] и в условиях электромагнитных помех, а также при контроле протяженных объектов [4], где экономически не обоснованно размещение большого количества электрических точечных датчиков. Также привлекательно использование ВОД в случаях, когда необходимо осуществлять неинвазивный мониторинг различных узлов и конструкций с помощью компактных и легких устройств с простым монтажом без подведения электричества к каждому измерительному блоку. Как правило, точечные ВОД акустических воздействий выступают в качестве тензодатчиков [5], локальных датчиков давления и температуры, инклинометров [6], а также могут быть применены в качестве акселерометров для оценки корректности работы различных конструкций и машинокомплексов. Известно про применение ВОД для виброакустического мониторинга различных подвижных механизмов и сложных устройств: подшипников, узлов станков, авиационных турбин [7] и ракетных двигателей [8–10].

С развитием автомобильной промышленности и ростом количества транспортных средств (ТС) на дорогах общего пользования появляется необходимость мониторинга состояния агрегатов автомобиля, связанная с требованиями к надежности, безопасности и эффективности эксплуатации ТС. Традиционные методы контроля технического состояния автомобиля основаны на плановых осмотрах и результатах

сервисной диагностики, а также на реагировании на уже проявившиеся признаки неисправностей, однако такой подход неэффективен для выявления медленно развивающихся и скрытых дефектов. В последние годы активно развиваются подходы condition monitoring [11] и predictive maintenance [12], которые направлены на обнаружение аномалий и прогнозирование отказов на основе анализа эксплуатационных данных. Это обеспечивает своевременное выявление ранних стадий деградации узлов, которые проявляются в изменении виброакустических характеристик работы системы. Методы вибродиагностики подвижных механизмов [13, 14] первоначально получили развитие в промышленной и авиационной сферах: начиная с 1970-х г. компании «Bently Nevada» (США) и «Brüel & Kjær» (Дания) разработали системы мониторинга состояния турбин, компрессоров и генераторов на основе анализа вибрационных сигналов. В 1980-е г. системы контроля технического состояния и выработки ресурса HUMS (Health and Usage Monitoring Systems) были впервые внедрены на вертолетах [15], что дало импульс развитию коммерческих решений от компаний «Stewart Hughes Ltd.» и «Smiths Aerospace» (Великобритания). В этот же период компании «SKF» (Швеция) и «SPM Instrument» (Швеция) начали активно развивать средства вибродиагностики подшипниковых узлов промышленного оборудования, методы которой оказались применимы и в автомобильной технике. Вместе с развитием бортовой электроники и методов обработки сигналов появился подход, при котором оценка состояния узлов производится непрерывно или периодически непосредственно в процессе эксплуатации транспортного средства: в 1996 г. в США была введена обязательная стандартизированная система бортовой диагностики OBD-II [16], а с 2001 г. аналогичный стандарт EOBD стал обязательным в Европе. Это позволило перейти от обслуживания по нормативному интервалу к обслуживанию по фактическому техническому состоянию, что особенно важно для ответственных и нагруженных агрегатов автомобиля.

Наиболее актуально данное применение для беспилотных транспортных средств: легковых и грузовых автомобилей. В пилотируемом транспортном средстве водитель зачастую обращает внимание на малейшие сбои и нарушения в его работе, предотвращая крупные поломки или оперативно обеспечивая меры по их устранению, тогда как в беспилотном транспорте, несмотря на большое количество датчиков протекания различных процессов, может быть пропущен потенциальный выход из строя того или иного узла ввиду отсутствия датчика для обнаружения такого эффекта или его недостаточной чувствительности. Особенно актуальна данная проблема для

промышленного или другого крупного транспортного оборудования, работа которого сопряжена с высокими нагрузками, а работы по восстановлению целостности конструкции являются крайне дорогостоящими как из-за стоимости комплектующих и высоких зарплат персонала, так и из-за затрат на внеплановые простои и задержки в работе.

Для обеспечения эксплуатационной надежности ТС непрерывному анализу и предиктивному мониторингу подлежат двигатель, трансмиссия и подвеска автомобиля, так как их техническое состояние непосредственно влияет на безопасность движения. При этом при решении задачи виброакустического мониторинга наиболее важно обеспечить широкий рабочий диапазон частот, высокую чувствительность, возможность классификации и локализации дефекта [11]. Для своевременного реагирования в ходе предсказания поломки требуется сбор объемных временных рядов, для чего необходимо учесть величину энергопотребления и ресурсоемкость системы мониторинга.

Поскольку сенсорные системы на основе точечных ВОД характеризуются широким диапазоном частот в сочетании с невысокой стоимостью относительно как точечных электрических, так и распределенных волоконно-оптических датчиков, а также отсутствием необходимости подведения электричества к точке снятия показаний, их использование имеет высокий потенциал для обеспечения непрерывного мониторинга узлов транспортных средств с целью обнаружения, классификации нарушений их работы и потенциально своевременного предупреждения возможных разрушений для повышения эффективности эксплуатации.

В качестве тестового объекта в рамках данной работы был выбран распространенный отечественный легковой автомобиль Lada Largus. В рамках исследования мониторингу подвергались основные агрегаты автомобиля: двигатель внутреннего сгорания (бензиновый), механическая коробка передач и подвеска – на каждую из этих 6 точек были установлены точечные ВОД виброакустических воздействий. Система была развернута на новом автомобиле перед его вводом в эксплуатацию для формирования набора данных, начиная с первых километров пробега транспортного средства, накопление данных велось в ходе использования автомобиля.

Выбранный легковой автомобиль выступил в качестве целесообразного полигона для верификации разработанных впервые методик создания специализированных ВОД для анализа агрегатов транспортных средств, сбора данных для дальнейшей оптимизации технологии их производства и монтажа. Кроме того,

данный тип транспорта обеспечил удобство, простоту и эффективность набора данных, поскольку, с одной стороны, он ежедневно активно эксплуатировался работниками ПАО МГТС в различных условиях (что обеспечивало вариабельность данных), а, с другой стороны, внимательно контролировался ими (что позволяло получить референсные данные о состоянии узлов).

Накопленный технологический опыт и результаты анализа собранных данных в рамках исследования позволят оптимизировать конструкцию ВОД и алгоритмы обработки для расширения применимости виброакустических датчиков для анализа состояния агрегатов различных транспортных средств и создания подходов к комплексному анализу и интеграции в системы контроля.

2. ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАХА-ЦЕНДЕРА ДЛЯ ВИБРО-АКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА МЕХАНИЗМОВ

Обобщенная структурно-функциональная схема ВОД представлена на рис. 1. Он состоит из компонент, которые можно подразделить на несколько ключевых узлов: блок источников излучения, сенсорная часть на основе оптического волокна, по которому излучение распространяется и изменяет свои параметры под влиянием вибрационных и акустических воздействий, блок приемников излучения, регистрирующих сигнал на выходе сенсорной части, устройство сбора данных, которое осуществляет преобразование электрических сигналов на выходе приемников излучения для их последующей обработки на устройстве обработки данных в соответствии с заданным алгоритмом, в роли которого может выступать, например, ПК.

Рис. 1. Структурно-функциональная схема ВОД

Распространенным типом ВОД вибро-акустических воздействий является волоконно-оптический интерферометр: Маха-Цендера (ИМЦ), Майкельсона (ИМ), Саньяка (ИС), Физо (ИФ), либо их комбинации. В отличие от рефлектометров, принцип действия которых основан на анализе обратно-рассеянного излучения, в интерферометре взаимодействуют и участвуют в формировании сигнала волны, проходящие по волокну в прямом направлении, что приводит к более высокому отношению сигнал/шум на выходе [17].

В основе регистрации вибро-акустических воздействий с помощью волоконно-

оптического интерферометра лежит тот факт, что внешнее воздействие приводит к изменению в течение времени разности фаз на его выходе. При распространении излучения по участку волокна длиной L оно приобретает следующий набег фазы:

$$\varphi = nkL, \quad (1)$$

где n — показатель преломления сердцевины волокна, k — волновое число в вакууме.

Дифференцируя формулу (1), выделим составляющие, приводящие к изменениям фазового набега:

$$\frac{d\varphi}{\varphi} = \frac{dL}{L} + \frac{dn}{n} + \frac{dk}{k}. \quad (2)$$

Из выражения (2) видно, что изменение фазового набега возникает из-за удлинения волокна dL при наличии акустического воздействия, сопутствующего изменения показателя преломления dn , а также из-за изменения волнового числа при изменениях длины волны источника излучения, то есть последнее слагаемое позволяет учитывать вклад шума, возникающего из-за флуктуаций длины волны источника излучения [18]. Наибольший вклад в дополнительный фазовый набег вносит именно изменение длины волокна dL , то есть первое слагаемое в выражении (2) является преобладающим.

Поскольку в интерференции участвуют два пучка излучения, каждый из них приобретает свой фазовый набег (φ_1 и φ_2), а после их объединения на выходе интерферометра формируется интерференционная картина, пропорциональная разности фаз $\Delta\varphi$:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\varphi), \quad (3)$$

где I_1 и I_2 — интенсивности двух пучков излучения; φ_1 и φ_2 — фазовые набегии двух пучков излучения; $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ — разности фаз излучения на выходе.

Изменения дополнительного фазового набега каждого из пучков в течение времени $d\varphi_{1,2}(t)$ приводят к тому, что изменяется разность фаз на выходе интерферометра $\Delta\varphi(t)$, из-за чего возникают изменения выходного сигнала волоконного интерферометра со временем (использовано допущение равномерности разделения излучения на два пучка: $I_1 = I_2 = I_{0,5}$):

$$I(t) = I[\Delta\varphi(t)] = 2I_{0,5} \left(1 + \cos(\Delta\varphi(t)) \right). \quad (4)$$

В зависимости от типа интерферометра они характеризуются особенностями чувствительности [19], в том числе (в определенных диапазонах частот) степенью влияния на выходной сигнал изменений состояния поляризации излучения, наличием

мертвых зон вдоль сенсорного волокна [20], а также требованиями к компонентной базе для обеспечения стабильной работы, что влияет на стоимость конечного устройства на основе ВОД.

Волоконный ИМЦ, схема и пример сигнала на выходе которого представлены на рис. 2, является распространенным двухлучевым интерферометром для создания как точечных, так и распределенных ВОД вибро-акустических воздействий. ИМЦ формируется на основе двух разветвителей, первый из которых разделяет излучение узкополосного лазерного источника на два пучка, распространяющихся по опорному и сенсорному плечам, а второй вновь объединяет эти пучки, что приводит к их интерференции. Для обеспечения возможности восстановления фазы сигнала интерференция может регистрироваться на выходе второго разветвителя несколькими приемниками излучения [21].

Рис. 2. Волоконный ИМЦ: а) схема; б) пример сигнала при наличии акустического воздействия

ИМЦ характеризуется простотой конструкции без дорогостоящих пассивных оптических компонент, высокой чувствительностью к воздействиям в широком диапазоне частот (от десятков Гц до сотен кГц), а также отсутствием мертвых зон вдоль его сенсора. Его сенсорная часть может быть компактно организована в виде достаточно миниатюрного устройства, обладающего малым весом. Благодаря указанным преимуществам ИМЦ был выбран как целевой интерферометр для разработки ВОД в составе системы вибро-акустического мониторинга механизмов.

ИМЦ может быть сформирован в двух вариантах конструкции: с одинаковыми или различающимися длинами опорного и сенсорного плеч (равноплечий или неравноплечий ИМЦ). Однако для достижения стабильного интерференционного сигнала в ИМЦ требуется соблюсти неравенство (5), а также предусмотреть стабилизацию сенсорного волокна относительно опорного для уменьшения влияния паразитных вибраций и изменения параметров окружающей среды (давления P , температуры T) на длину волокна (6), а, следовательно, и на выходной сигнал:

$$\Delta L < L_{\text{ког}} = \frac{c}{n\Delta\nu_{\text{ИИ}}}, \quad (5)$$

$$\Delta L(T^\circ, P) = \Delta L(t), \quad (6)$$

где ΔL – разность длины плеч ИМЦ, $L_{\text{ког}}$ – длина когерентности источника излучения, c

– скорость света, n – показатель преломления в волокне, $\Delta v_{\text{ИИ}}$ – ширина полосы источника излучения.

Применяемые в рамках исследования вибро-акустических воздействий ВОД состоят из равноплечих ИМЦ с сенсорным и опорным плечами длиной 1 м (различающимися не более чем на 1 см), они характеризуются восстановлением фазы по двум приемникам. Схема опико-электронной части системы мониторинга представлена на рис. 3.

Рис. 3. Схема опико-электронной части системы мониторинга автомобиля на основе ВОД

Черными непрерывными линиями показано оптическое волокно для организации подключения сенсорных элементов, красным цветом приведено сенсорное волокно, синим – опорное, а серой штриховой линией – электронный кабель. В качестве источника излучения (ИИ) применялся лазерный диод DFB, опрос сенсорных элементов ИМЦ1 – ИМЦ6 (синим показано опорное плечо, красным – сенсорное) осуществлялся 12 приемниками излучения (ПИ), после чего сигнал преобразовывался 16-разрядным аналого-цифровым преобразователем (АЦП) с 12 каналами, каждый из которых имел частоту дискретизации 6 кГц, а управление системой, сбор, синхронизация и хранение данных осуществлялись сервером, в качестве которого выступал ноутбук (ПК).

3. РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ЛЕГКОВОГО АВТОМОБИЛЯ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Схема системы мониторинга узлов автомобиля приведена на рис. 4, она состоит из следующих компонент.

1. Электронный блок, в состав которого входят источник и приемники излучения, а также АЦП и ноутбук, оснащенные источником бесперебойного питания, и модем сотовой связи для выгрузки данных в облачное хранилище и организации удаленного доступа к системе.
2. Сенсорные элементы – ВОД на основе ИМЦ, размещенные на узлах автомобиля.
3. Магистральный волоконно-оптический кабель с двумя оптическими распределительными коробками (ОРК) для объединения сенсорных элементов в общую сеть с электронным блоком.

Рис. 4. Состав системы мониторинга автомобиля на основе ВОД: **1–4** – сенсорные элементы подвески, **5** – сенсорный элемент коробки передач, **6** – сенсорный элемент двигателя, **7, 8** – ОРК, **9** – электронный блок, **10** – магистральный кабель

Для формирования сенсорного элемента на базе волоконного ИМЦ опорное и сенсорное плечи интерферометра были размещены в едином корпусе, поскольку это обеспечило компактность конструкции, эргономичность сенсорного элемента для облегчения процесса его монтажа и, при необходимости, быстрой замены, а также механическую защищенность конструкции. Также такой подход обеспечивает более высокую надежность локализации места снятия вибрации, поскольку волокна установлены в общей зоне с наибольшей величиной воздействия. Схема сенсорного элемента и общий вид его конструкции приведены на рис. 5. Корпус датчика разработан для эргономичного размещения на узлах автомобиля путем приклеивания на термостойкий силиконовый герметик, а также с применением прижимных пружин. Корпус изготовлен из PLA-пластика на 3D-принтере, после сбора осуществлялась герметизация швов силиконовым герметиком, что обеспечило устойчивость конструкции к агрессивным внешним факторам, в том числе, в ходе эксплуатации системы в зимний и весенний периоды года: защищенность компонент сенсора от механических повреждений и загрязнений в ходе эксплуатации.

Рис. 5. Сенсорный элемент на основе ИМЦ для вибро-акустического мониторинга механизмов: **а)** схема; **б)** общий вид (**1** – корпус с сенсорным оптическим волокном, **2** – крышка)

Частотная характеристика датчика определяется частотной характеристикой применяемого интерферометра. ИМЦ обеспечивает достаточно широкий частотный диапазон [20] работы системы вибродиагностики, достаточный для обнаружения дефектов работы агрегатов автомобиля, в частности, подшипников ступицы, стойки и

втулки стабилизатора, рулевых наконечников и тяги, шаровых опор, амортизаторов.

Для повышения эффективности регистрации вибро-акустических воздействий опорное плечо ИМЦ было стабилизировано относительно сенсорного путем его заливки в эпоксидную смолу. Таким образом, благодаря предложенной конструкции сенсорное и опорное плечи подвергаются температурным воздействиям, мало отличающимся друг от друга, а вибрационное воздействие на сенсорное плечо существенно выше по сравнению с воздействием на опорное плечо. Для обеспечения равенства длин плеч ИМЦ опорное и сенсорное плечи сформированы на основе разъемного соединения с помощью розеток, что также позволяет сохранить возможность компенсации неодинаковости коэффициента деления разветвителей. После регулировки контрастности интерференционного сигнала розетки также заливались эпоксидной смолой для фиксации и герметизации соединения.

Каждый сенсорный элемент имеет одно подводящее волокно (обеспечивающее ввод излучения источника в ИМЦ) и два отводящих волокна (передающие интерференционный сигнал на приемники излучения) с разъемом для обеспечения возможности быстрой замены сенсорного элемента при необходимости в рамках технического обслуживания. Магистральный волоконный кабель содержит 6 подводящих и 12 отводящих волокон, каждое из которых имеет разъем. Соединение сенсорных элементов и волокон кабеля осуществляется в специально разработанной компактной и герметичной ОРК. Магистральный кабель проложен в лотке электрической разводки под днищем автомобиля, а сенсорные элементы и ОРК закреплены на узлах автомобиля комбинированным способом, что обеспечило надежность их установки и защиту от различных воздействий (нагрева узлов, тряски, ударов камней и др.) в процессе движения автомобиля.

Питание системы осуществляется от автомобиля с применением интеграции на внутреннюю шину и с применением инвертора. Электронный блок имеет источник бесперебойного питания, заряжаемый при работе двигателя автомобиля. Для удобства эксплуатации автомобиля, обеспечения корректности сбора данных и работы всех оптико-электронных компонент в составе системы мониторинга на ПК установлено ПО на базе специально разработанного алгоритма синхронизации записи данных и автоматического выключения и автозапуска системы в зависимости от того, заведен или заглушен автомобиль. Водитель не участвует в эксплуатации системы, она работает автоматически в соответствии с настроенными циклами с учетом емкости ИБП. Данные копируются на внутреннем хранилище ноутбука, а также выгружаются в

облачное хранилище через канал сотовой связи для буферизации и последующей обработки.

4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОЛЕВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА

Для исследования уровня износа автомобиля и сбора массива данных для обучения алгоритма предиктивного обнаружения поломок необходимо накапливать измерения в течение длительного промежутка времени – до достижения автомобилем пробега порядка десятков тысяч километров. В данной статье представлены результаты анализа первичного набора данных длительностью несколько часов для демонстрации потенциала применимости разработанных ВОД для виброакустического мониторинга состояния ТС. Все приведенные сигналы получены в ходе обычной эксплуатации автомобиля, применяемого для разъездной работы в Москве и Московской области по асфальтированным и грунтовым дорогам. В связи с особенностями рабочего порядка эксплуатации выбранного автомобиля установить на нем видеокамеру или другие датчики сбора опорной информации не представилось возможным, поэтому в качестве маркера о том, перемещается автомобиль или нет, выступали данные, снимаемые с точек подвески. В ходе предварительных тестов было установлено, что во время движения автомобиля вибрация данных узлов сильнее по сравнению со случаем, когда он не перемещается.

На рис. 6 изображены спектрограммы сигналов, снятых с задней и передней точек подвески автомобиля. На спектрограммах наблюдаются увеличения мощности вибраций в диапазоне до 250 Гц и в области 1.5 кГц с 0 по 150 секунды и с 1200 по 3000 секунды, когда автомобиль находился в движении. Сигнал в промежутке времени с 150 по 1200 секунды характеризует работу узлов автомобиля, когда он не движется. Вследствие того, что на данном этапе экспериментальной апробации отсутствовала априорная информации о фактическом состоянии автомобиля (едет или стоит автомобиль, каковы скорость и траектория перемещения), сигнал с подвески применялся в качестве опорного. Введенный коэффициент вибрации ELF_m (7) выступал в качестве количественного критерия, служащего для определения факта перемещения автомобиля по дороге. Коэффициент определяется как отношение среднеквадратичной амплитуды в полосе 50–250 Гц, $RMS_{50-250 \text{ Гц}}$, к данной величине в полосе 10 – 50 Гц, $RMS_{10-50 \text{ Гц}}$:

$$ELF_m = \frac{RMS_{50-250 \text{ Гц}}}{RMS_{10-50 \text{ Гц}}}. \quad (7)$$

Рис. 6. Спектрограммы сигналов, зарегистрированных для точек подвески автомобиля: **а)** задняя точка подвески; **б)** передняя точка подвески

Таким образом, при значении коэффициента ELF_m , превышающем 2, автомобиль определяется как находящийся в процессе движения.

На рис. 7 приведены спектрограммы сигналов, снятых в эти временные промежутки с двигателя и коробки передач для анализа циклов работы этих агрегатов. Как видно, в сигнале датчиков работы двигателя с 0 по 150 секунды и с 1200 по 3000 секунды формируются множественные гармоники в диапазоне до 500 Гц с дрейфом частоты по мере увеличения оборотов двигателя, также происходит повышение мощности компонент спектра в области от 1 до 1.5 кГц, что характеризует его работу в процессе движения автомобиля. Дрейф частоты целесообразно характеризовать через анализ дисперсии $\sigma^2(f_p)$ пиковой частоты f_p , рассчитанной в скользящем окне 100 Гц. В моменты трогания и разгона (0–150 с) дисперсия пиковой частоты возрастает с 0.5 до 20 Гц². В данных промежутках времени аналогичные изменения сигнала характерны и для датчиков, установленных на коробке переключения передач. На спектрограмме сигнала, полученного с 1200 по 3000 секунды измерения с датчика, установленного на коробке переключения передач (рис. 7б), видно присутствие низких (до 200 Гц) частот работы двигателя (рис. 7а), что, вероятно, связано с тем, что коробка переключения передач и двигатель находятся в непосредственном контакте, из-за чего вибрации с корпуса двигателя передаются на корпус коробки. Также в спектре данного сигнала есть и отличающиеся от спектра двигателя компоненты в области около 700 и 1000 Гц без заметного пика частоты. Описанные компоненты характеризуют процессы, протекающие в трансмиссии автомобиля, и для их детального анализа требуется формирование обширного набора данных в разных условиях эксплуатации ТС.

Рис. 7. Спектрограмма сигналов, зарегистрированных для трансмиссии: **а)** двигатель; **б)** коробка переключения передач

Интересным представляется также проанализировать диапазон с 150 по 1200 секунды (рис. 8) – когда были проведены измерения цикла работы двигателя и коробки передач в режиме холостых оборотов. Как видно из рис. 8, с 330 по 1200 секунды наблюдается основная частота работы двигателя (около 14 Гц).

При этом в данном установившемся режиме дисперсия пика первой гармоники не превышает 0.5 Гц^2 . Зарегистрированное значение 14 Гц соответствует 840 об/мин – то есть типовому диапазону оборотов прогретого бензинового двигателя (который составляет от 600 до 1000 об/мин [22]).

Рис. 8. Спектрограмма сигналов, зарегистрированных для трансмиссии в режиме холостых оборотов: **а)** двигатель; **б)** коробка переключения передач

Также из рис. 8 видно различие режимов работы двигателя в интервалах времени с 150 по 330 секунды и с 330 по 1200 секунды. По спектрограмме сигнала, снятого с коробки передач, заметно изменение вибро-акустической характеристики этого агрегата в этих же диапазонах, из чего можно предположить, что с 150 по 330 секунды на коробке была установлена передача, но сцепление находилось в выжатом положении.

В ходе анализа сигнала с коробки передач для отделения ее собственных частот от вибраций, передающихся на нее от двигателя, вычислен коэффициент спектрального затухания $K_{сз}$ как отношение амплитуд гармоник двигателя (14 Гц и кратных) сигнала, снятого с коробки, к амплитудам гармоник сигнала, снятого с двигателя. $K_{сз}$ для частот менее 200 Гц составил $0.75\text{--}0.85$, что характеризует жесткое крепление. Однако $K_{сз} > 1.5$ для частотного диапазона $700\text{--}1000 \text{ Гц}$, что характеризует собственные зубцовые частоты коробки и указывает на локальный источник вибрации именно в трансмиссии. Амплитуда этих компонент в спектре коробки передач составила около 0.8 мм/с — по сравнению с 0.3 мм/с на двигателе.

При выжатом сцеплении сопротивление вращения вала двигателя меньше, соответственно, обороты двигателя могут увеличиваться, что мы и наблюдаем на рис. 8б: с 150 по 330 секунды при выжатом сцеплении частота оборотов двигателя составляла 900 об/мин , а с 330 по 1200 секунды она поменялась на 840 об/мин .

Таким образом, в работе экспериментально подтверждена применимость точечных ВОД на основе ИМЦ для организации системы вибро-акустического мониторинга состояния основных агрегатов ТС. Полученные сигналы позволяют сделать вывод о том, что разработанная конструкция датчика обеспечивает возможность регистрации типовых частот работы двигателя, коробки переключения передач и вибраций подвески в ходе работы автомобиля. Прототип разработанной системы мониторинга показал безотказную работу, он позволяет сформировать обширный набор данных для создания системы обнаружения отказов и предиктивного

мониторинга поломок агрегатов легковых автомобилей и других ТС. Полученный в ходе исследования опыт позволяет сформировать требования к конечному виду системы вибро-акустического мониторинга для создания решения, удобного для масштабирования на различные типы ТС и инженерные системы с подвижными механизмами для мониторинга их состояния в процессе работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Orlova M.V., Gritsenko T.V., Zhirnov A.A. *et al.* Instruments and Experimental Techniques. 2023. V. 66. №5. P. 832. <https://doi.org/10.1134/S0020441223050202>
2. Zhirnov A.A., Chesnokov G.Y., Stepanov K.V. *et al.* 2023. Sensors. V. 23. №10. P. 4978. <https://doi.org/10.3390/s23104978>
3. Chernutsky A.O., Khan R.I., Gritsenko T.V. *et al.* Instruments and Experimental Techniques. 2023. V. 66. № 5. P. 824. <https://doi.org/10.1134/S002044122305007X>
4. Zhirnov A.A., Gritsenko T.V., Stepanov K.V. *et al.* Sensors. 2022. V. 22. №7. P. 2772. <https://doi.org/10.3390/s22072772>
5. Ягодников Д. А. и др. Конструкции из композиционных материалов. 2024. Т. 2. № 174. С. 47-57. https://doi.org/10.52190/2073-2562_2024_2_47
6. Kozii R. R., Gritsenko T.V., Khan R.I. *et al.* IEEE Xplore Proc.of 2024 International Conference Laser Optics (ICLO). 2024. P. 1-1. <https://doi.org/10.1109/ICLO59702.2024.10624462>
7. Choban T.V., Zhirnov A.A., Stepanov K.V. *et al.* IEEE Xplore Proc. 2022 International Conference Laser Optics (ICLO). 2022. P. 1-1. <https://doi.org/10.1109/ICLO54117.2022.9839951>
8. Gritsenko T.V., Ilgovskaya N.V., Baryshev A.N. *et al.* IEEE Xplore Proc. of 2024 International Conference Laser Optics (ICLO). 2024. P. 1-1. <https://doi.org/10.1109/ICLO59702.2024.10624236>
9. Гриценко Т.В., Жирнов А.А., Чернуцкий А.О. и др. Фотон-экспресс. 2023. Т. 6. № 190. С. 310. <https://doi.org/10.24412/2308-6920-2023-6-286-287>
10. Zhirnov A.A., Stepanov K. V., Sazonkin S. G. *et al.* Sensors. 2021. Vol. 21. № 23. P. 7836. <https://doi.org/10.3390/s21237836>
11. Schmidt J.F. Vehicle condition monitoring: anomalous vibration detection with accelerometers : Dissertation / J. F. Schmidt ; Universität Osnabrück. — Osnabrück, 2023
12. Jain M., Vasdev D., Pal K., Sharma V. Computational Intelligence. 2022. V. 36. № 6. P. 1990. <https://doi.org/10.1111/coin.12553>

13. *Donazzi A., Facchinetti A., Mazzoleni M.A.* Applied Sciences. 2022. V. 12. №. 3. P. 972.
[https://doi.org/ 10.3390/app12030972](https://doi.org/10.3390/app12030972)
14. *Mongia C., Goyal D., Sehgal S.* Materials Today: Proceedings. 2021. V. 46. P. 10890.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.095>
15. *Mauricio A.* MATEC Web of Conferences. 2020. V. 314. P. 02008.
<https://doi.org/10.1051/mateconf/202031402008>
16. *Shinde B.J., Kore S.S., Tripse S.S.* International Research Journal of Engineering and Technology. 2016. V. 3, №. 3. P. 1532
17. *Stepanov K.V., Gritsenko T.V., Khan R.I. et al.* Sensors. 2025. V. 25. №24 P. 7543.
<https://doi.org/10.3390/s25247543>
18. *Chernutsky A.O., Gritsenko T.V., Zhirnov A.A. et al.* 2024 International Conference Laser Optics (ICLO). IEEE. 2024. P. 245. [https://doi.org/ 10.1109/ICLO59702.2024.10624476](https://doi.org/10.1109/ICLO59702.2024.10624476)
19. *Gritsenko T.V., Dyakova N.V., Zhirnov A.A. et al.* Instruments and Experimental Techniques. 2023. V. 66. №5. P. 788. <https://doi.org/10.31857/S0032816223050105>
20. *Гриценко Т.В.* Распределенный волоконно-оптический датчик акустических воздействий на основе двойного встречного интерферометра Саньяка со спектральным разделением каналов: дис. ... канд. тех. наук.: 2.2.6. М. 2025. 220 с
21. *Hu Y., Chen Y., Song Q. et al.* J. Lightw. Technol. 2021. V. 39. № 21. P. 6928.
<https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3105299>
22. *Карнаухов В.Н.* Вестник Курганской ГСХА. 2016. Т. 17. №1. С. 59.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Структурно-функциональная схема ВОД

Рис. 2. Волоконный ИМЦ: **а)** схема; **б)** пример сигнала при наличии акустического воздействия

Рис. 3. Схема оптико-электронной части системы мониторинга автомобиля на основе ВОД

Рис. 4. Состав системы мониторинга автомобиля на основе ВОД: **1–4** – сенсорные элементы подвески, **5** – сенсорный элемент коробки передач, **6** – сенсорный элемент двигателя, **7, 8** – ОРК, **9** – электронный блок, **10** – магистральный кабель

Рис. 5. Сенсорный элемент на основе ИМЦ для вибро-акустического мониторинга механизмов: **а)** схема; **б)** общий вид (**1** – корпус с сенсорным оптическим волокном, **2** – крышка)

Рис. 6. Спектрограммы сигналов, зарегистрированных для точек подвески автомобиля: **а)** задняя точка подвески; **б)** передняя точка подвески

Рис. 7. Спектрограмма сигналов, зарегистрированных для трансмиссии: **а)** двигатель; **б)** коробка переключения передач

Рис. 8. Спектрограмма сигналов, зарегистрированных для трансмиссии в режиме холостых оборотов: **а)** двигатель; **б)** коробка переключения передач

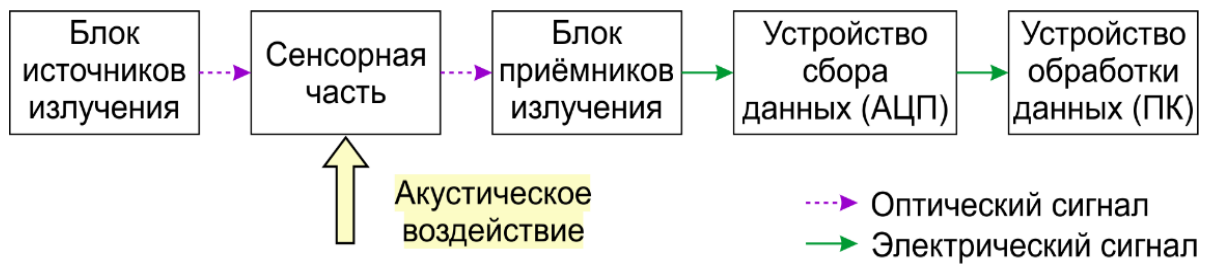
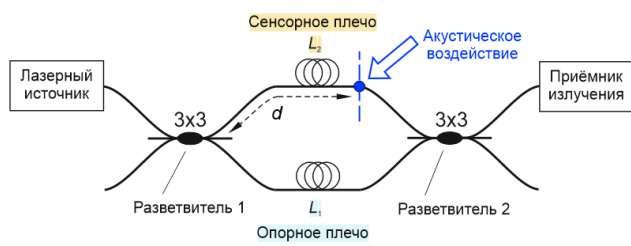
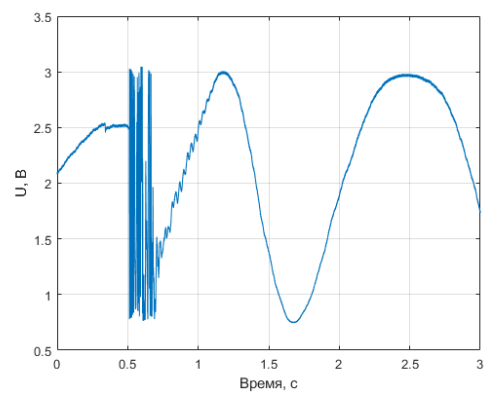


Рис. 1.



а)



б)

Рис. 2.

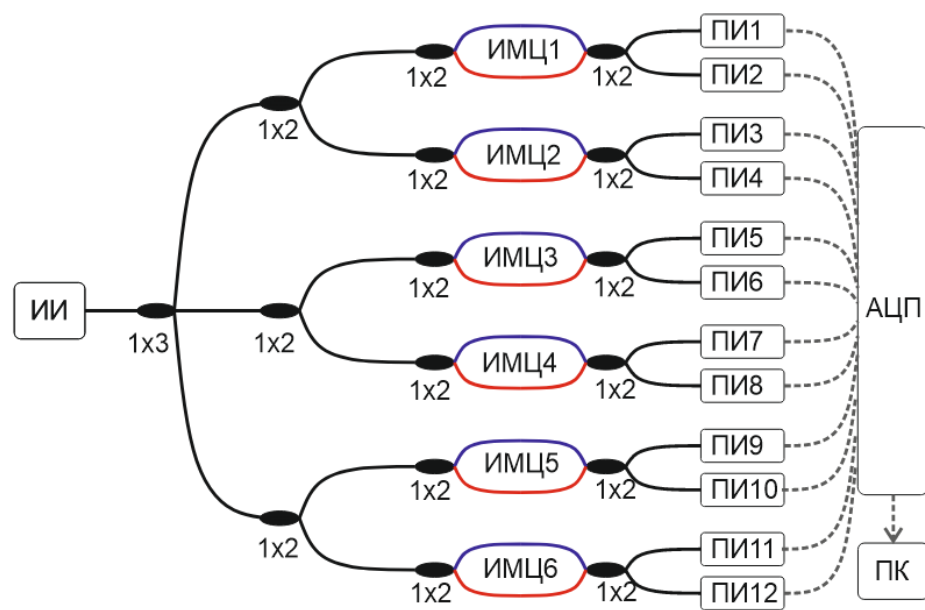


Рис. 3.

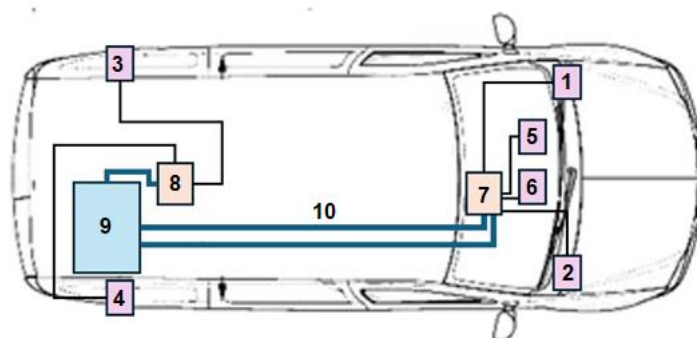
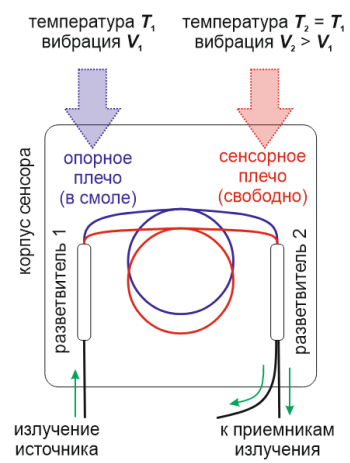
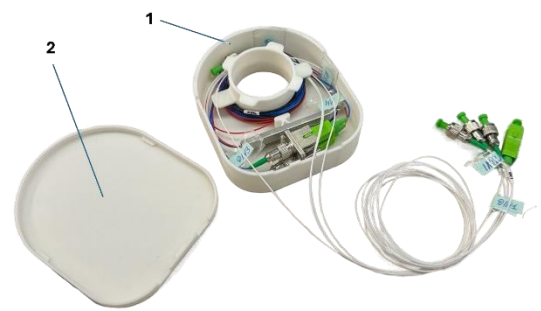


Рис. 4.



а)



б)

Рис. 5.

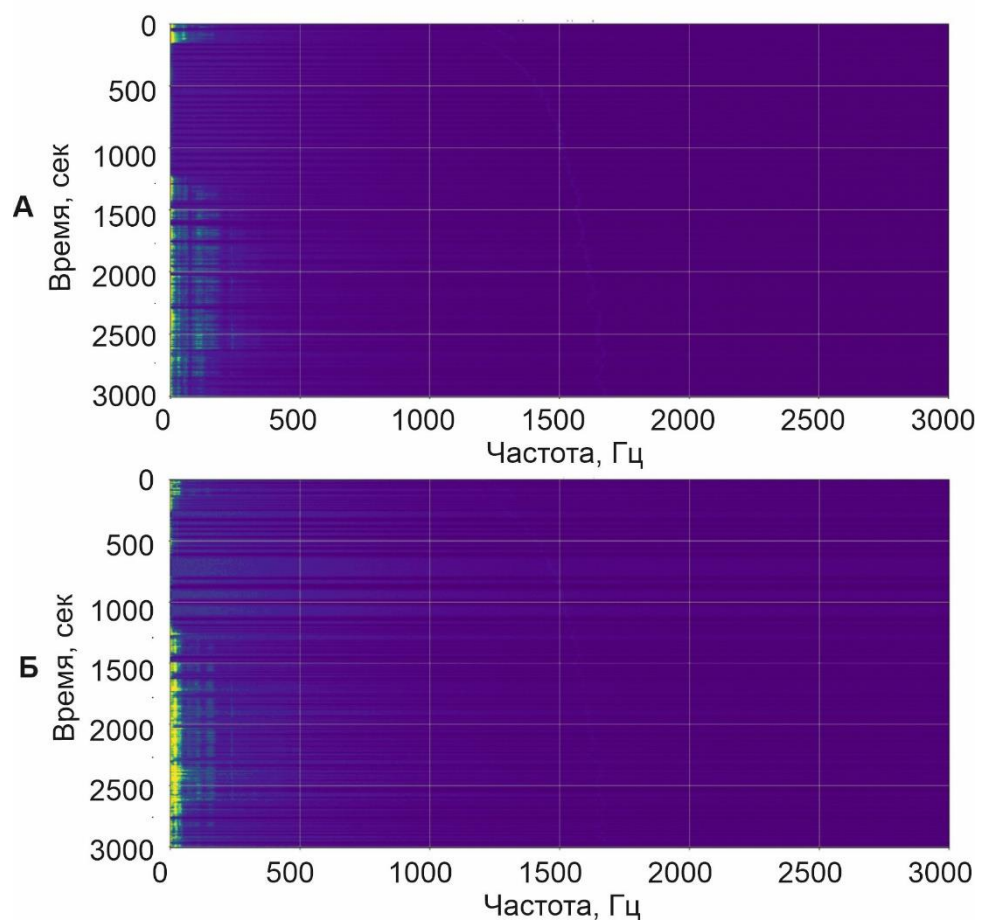


Рис. 6.

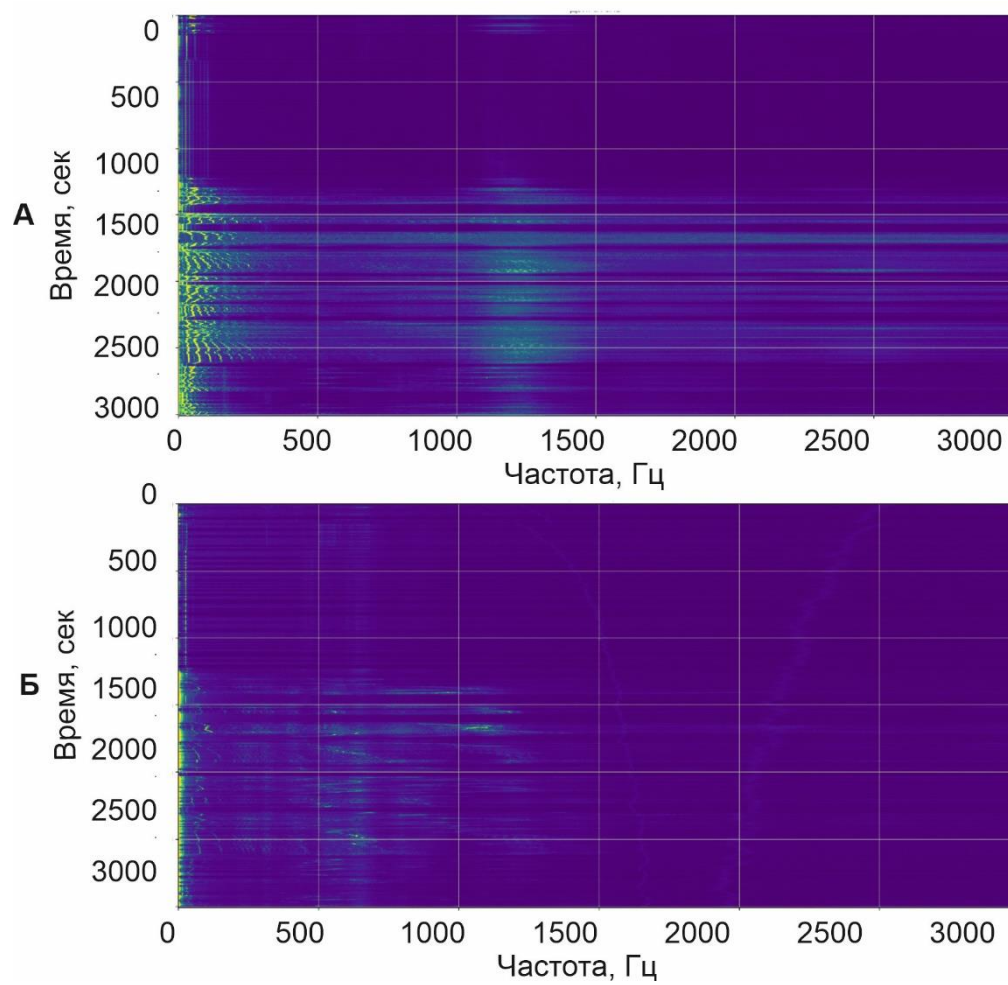


Рис. 7.

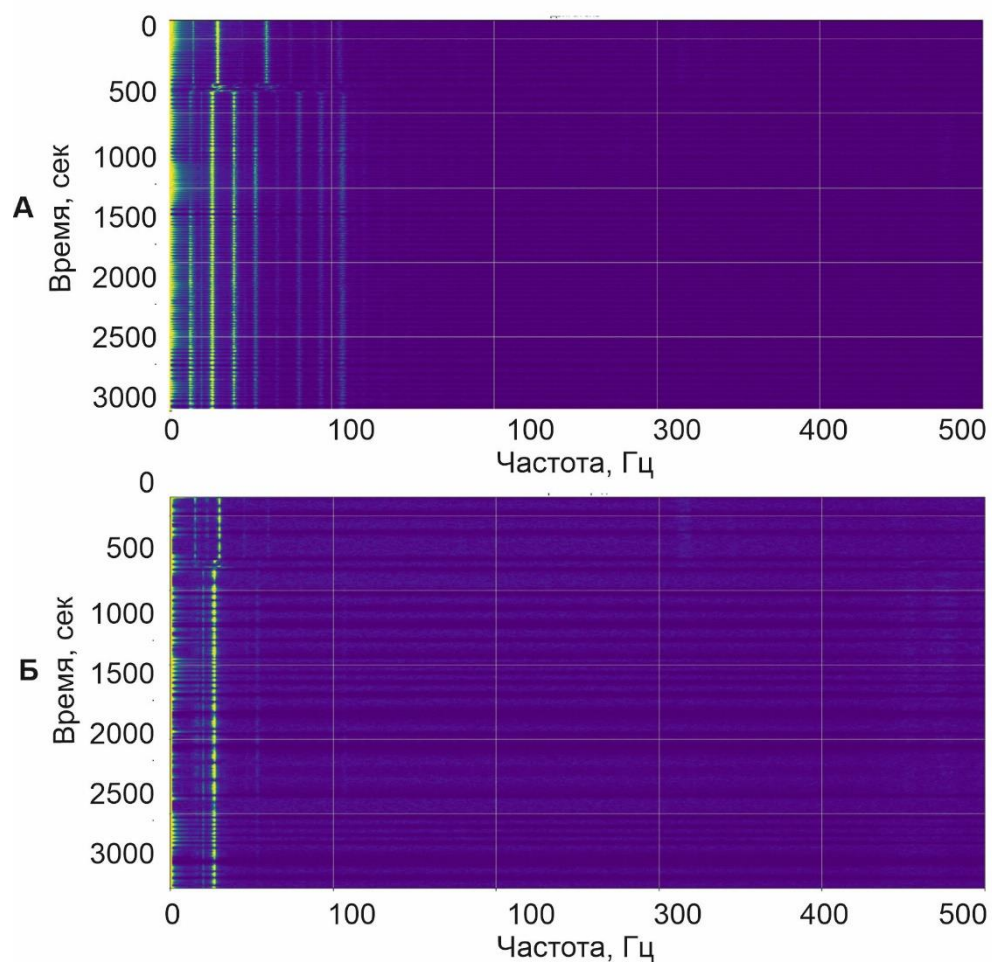


Рис. 8.

