

УДК 629.423.24

**ОБЩЕЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ПРЕДИКТИВНОЙ
СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ НОВОГО ЭЛЕКТРОПОЕЗДА ЭС2Г «ЛАСТОЧКА»
И ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ**

Ададуров А.С.

кандидат технических наук

*Акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский
институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»)
129626, Россия, Москва, 3-я Мытищинская д.10.*

Федорова В.И.

кандидат технических наук

*Научный информационно-аналитический центр
Акционерного общества «Всероссийский научно-исследовательский
институт железнодорожного транспорта» (НИАЦ АО «ВНИИЖТ»)
196128, г. Санкт-Петербург, ул. Благодатная, д. 10.*

Бойко А.М.

кандидат физико-математических наук

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)
194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26*

**GENERAL PRINCIPLES OF BUILDING A PREDICTIVE DIAGNOSTIC SYSTEM FOR THE NEW
ELECTRIC TRAIN ES2G "LASTOCHKA" AND THE FIRST EXPERIMENTAL DATA**

A. S. Adadurov, Cand. Sci. (Eng.)

*JSC "Scientific Research Institute of Railway Transport".
129626, Russia, Moscow, 3-rd Mytishchinskaya d. 10*

V.I. Fedorova, Cand. Sci. (Eng.)

*JSC "Scientific Research Institute of Railway Transport"
Data-Analysis Research Center (JSC VNIIZHT NIAC).
196128, St. Petersburg, Blagodatnaya str., 10.*

A. M. Boiko, Cand. Sci. (Physical and Mathematical)

*Federal State Budgetary Institution of Science A.F. Ioffe
Institute of Physics and Technology of
the Russian Academy of Sciences (A.F. Ioffe Institute)
194021, St. Petersburg, Polytechnic str., 26*

АННОТАЦИЯ

Разработка новых цифровых сервисов и устройств дает возможность выполнять удаленный мониторинг узлов и агрегатов электропоездов, исключение человеческого фактора, что позволит предотвратить сходы, связанные с отказом отдельных деталей, обеспечит контроль общей вибрационной надежности, который является важнейшей эксплуатационной характеристикой. Актуальность данного вопроса отображается так же в рамках программы развития Цифровая железная дорога ОАО «РЖД». В настоящее время существует определенный задел у НИАЦ АО «ВНИИЖТ» в данном вопросе, а именно есть опыт в сфере изготовления систем диагностики и мониторинга (АС КРСПС, БУК, ПАУК «НЕВА-2») [1, 2], который будет применен для разработки электропоезда ЭС2Г «Ласточка» поколения GOA 4. Улучшение показателей надежности, экономичности, маневренности и ремонтпригодности электропоездов являются актуальными на сегодняшний день.

ABSTRACT

The development of new digital services and devices makes it possible to perform remote monitoring of units and assemblies of electric trains, which will prevent derailments associated with failure of separate parts and ensure control of overall vibration reliability, which is the most important performance characteristic. The relevance of this issue is also reflected within the framework of the Digital Railway development program of the OAO RZD (Russian Railways). Today, a certain groundwork has been carried out within the R&D Center AO All-Russian Scientific and Research Institute of Railway Transport in this matter, namely there is an experience in the sphere of diagnostics systems manufacturing (ASKRSPS (special rolling stock automated control system), BUK, hardware and software system "PAUK NEVA-2") which shall be used for development of "Diagnostic system of technical condition of high-speed electric trains". Improvement of reliability, efficiency, maneuverability and serviceability of electric trains are of current importance.

Ключевые слова: диагностическая система, подвижной состав, железнодорожный путь, комплексный диагностический центр, электропоезд, предиктивная диагностика.

Keywords: diagnostic system, rolling stock, railway track, integrated diagnostic center, electric train, predictive diagnostics.

Введение. На сегодняшний день вопросы улучшения показателей надежности, экономичности, маневренности и ремонтпригодности электропоездов ЭС2Г «Ласточка» являются актуальными. Не менее важными вопросами является продление срока службы узлов и деталей и расширение допустимых режимов эксплуатации. В условиях длительной эксплуатации и широкого диапазона изменения режимов на первый план выходят задачи предотвращения сходов, поломок в пути следования, связанных с отказом отдельных деталей и узлов электропоездов ЭС2Г «Ласточка», обеспечения вибрационного состояния узлов и агрегатов электропоезда, позволяющего устойчивую и надежную эксплуатацию во всем диапазоне режимов, разработки методов и средств диагностики, позволяющих организовать обслуживание и ремонт оборудования по техническому состоянию.

Общая вибрационная надежность узлов и агрегатов является важнейшей эксплуатационной характеристикой. Низкий и стабильный уровень вибрации, отсутствие резонансных и автоколебательных явлений во всем диапазоне режимов гарантируют не только долговечность узлов и агрегатов, но и возможность своевременной диагностики и устранения возникающих дефектов в момент их зарождения. В последние годы в промышленно развитых странах вопросам технической диагностики и, в частности, вопросам

вибрационной диагностики оборудования электропоездов уделяется повышенное внимание. Это объясняется, с одной стороны, необходимостью контроля отработавших расчетный ресурс узлов и агрегатов, а также обоснованием сроков межремонтного периода, с другой стороны - стремлением к снижению ущерба от внеплановых простоев и внезапных сходов по причине отказа технических средств [3].

В настоящее время на сети железных дорог реализованы системы комплексной диагностики, установленные в электропоезда такие как: КОМПАКС®-ЭКСПРЕСС-ТРЗ, данная система значительно сокращает время полного диагностирования подвижного состава, в части колесно-моторных блоков, токоприемников, тормозной системы, цепей управления [4]; Информационно-измерительная система «ИНФОТРАНС – Ласточка», данная система осуществляет контроль геометрии пути и рельсов, видеоконтроль верхнего строения пути [5].

Обратимся к статистическим данным об отказах электропоездов ЭС2Г «Ласточка» с внедренных средств диагностики происходит сокращение отказов из года в год, что отображено на рисунке 1, причиной которым являются регулярные исследования в части усовершенствования существующих систем диагностики, что приводит к положительной динамике.

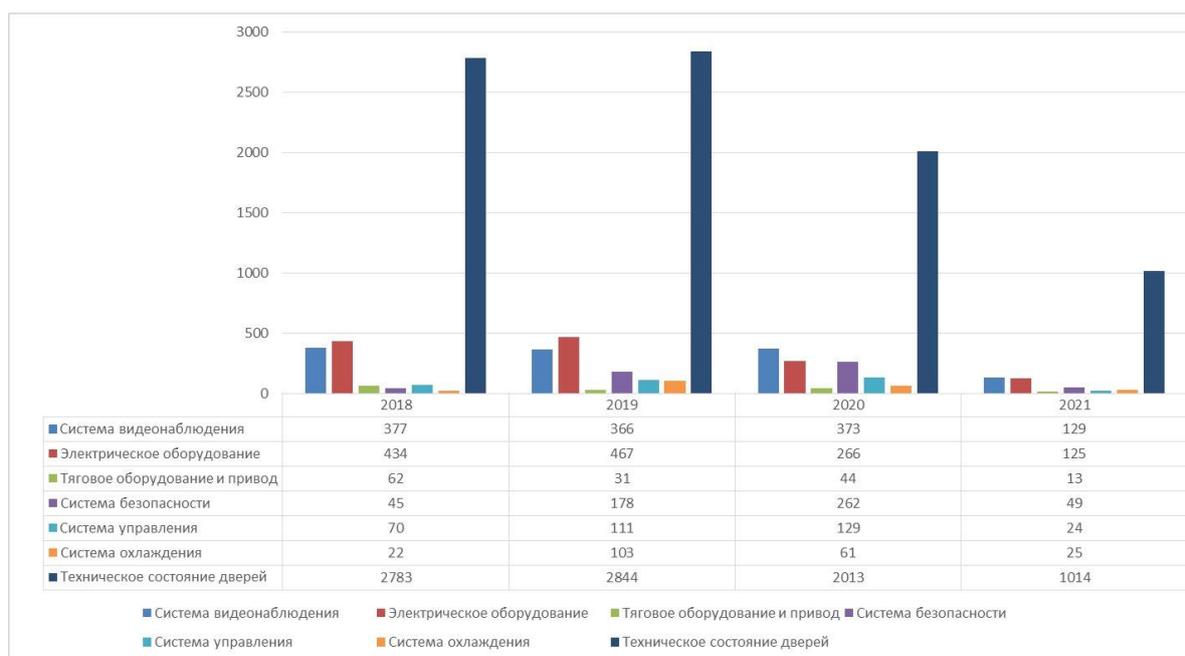


Рисунок 1 - Статистика отказов по системам диагностики в период с 2018 по 2021 г.

Однако, количество отказов указывает на то, что действующие системы диагностики и мониторинга имеют ряд недостатков, такие как:

- сбор информации осуществляется по различным узлам в отдельности и не соотносится с состоянием электропоезда состава в целом;
- анализ периодичности отказов и причин отказов невозможен ввиду разрозненности полученных данных;
- отсутствует возможность оценки остаточного ресурса узлов электропоезда;
- диагностика не может осуществляться в режиме реального времени;
- применяемые системы и методы диагностики зачастую снижают надежность единицы подвижного состава и приводят к её отказу;
- отсутствует прямой доступ заинтересованных научных институтов к применяемым бортовым системам в виду их иностранного производства;
- сбор информации осуществляется по различным узлам в отдельности и не соотносится с состоянием электропоезда состава в целом;
- анализ периодичности отказов и причин отказов невозможен ввиду разрозненности полученных данных;

В данном исследовании будут освещены пути решения указанных выше недостатков, основными задачами являются: разработка системы предиктивной системы диагностики электропоезда ЭС2Г «Ласточка» и проведена предварительная оценка по сбору данных на Московском центральном кольце.

Разрабатываемый функционал предиктивной системы для электропоезда ЭС2Г «Ласточка». В рамках создания нового электропоезда ЭС2Г «Ласточка» (GOA 4 по МЭК

62290-1), который начнет свою эксплуатацию на Московском центральном кольце (далее – МЦК) уже в 2022 году, специалистами АО «ВНИИЖТ» совместно с АНО «Сколково», ООО «Уральские локомотивы», НПО САУТ и АО «НИИАС» по заказу ОАО «РЖД» разрабатывается предиктивная система диагностики его технического состояния.

Предиктивная система диагностики (далее - ПСД) предназначена для установки на электропоезд ЭС2Г «Ласточка» с асинхронным тяговым приводом и представляет собой программно-аппаратный комплекс мониторинга и диагностики технического состояния оборудования электропоезда, контроля динамических показателей хода. На рисунке 2 представлена функциональная блок-схема ПСД, где:

БАМ-НС - бортовой аналитический модуль - нейронная сеть;

БДПП - блок диагностики подвагонного пространства;

БКП - блок комфорта пассажиров;

БПЛ - блок преобразования линий;

ВСРПД - высокоскоростной радиоканал передачи данных;

ИВМ - информационно-вычислительный модуль;

МПСУиД - многопроцессорная система управления и диагностики;

ПАБ-КДПСД - программно-аппаратный блок - концентратор датчиков предиктивной системы диагностики;

ХДПСД - хранилище данных предиктивной системы диагностики;

ИЕРЕ датчик - пьезоэлектрические датчики ускорения.

Принцип действия каждого блока более подробно будет описан ниже в статье.

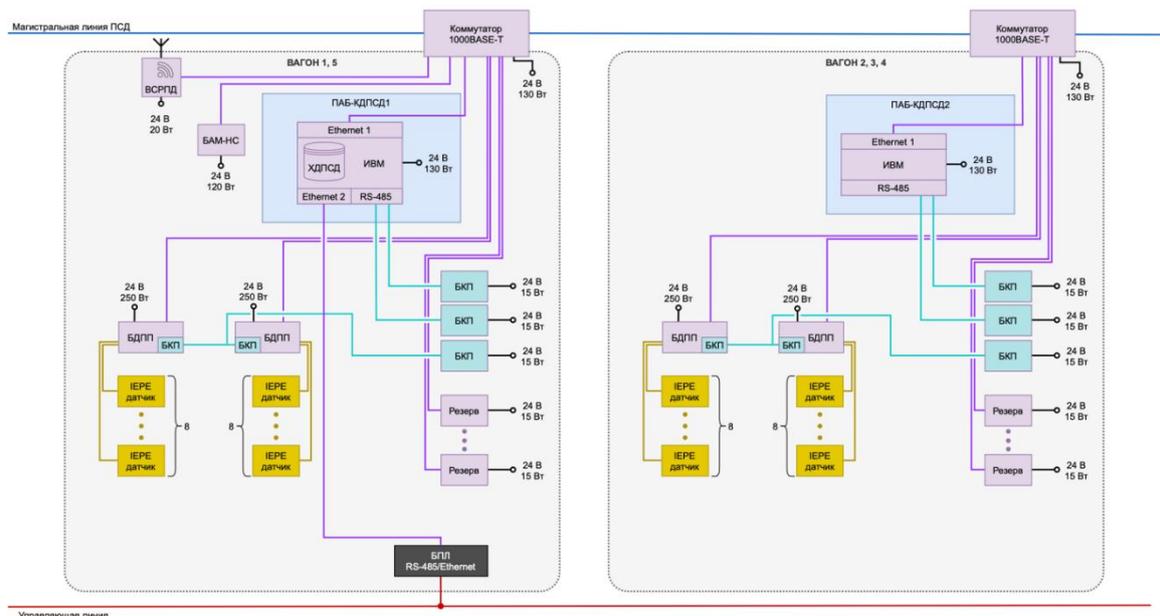


Рисунок 2 – Функциональная блок-схема предиктивной системы диагностики электропоезда ЭС2Г «Ласточка»

На сегодняшний день ПСД предназначена для аналитической обработки данных диагностируемого оборудования электропоезда и выдаче машинисту-оператору информации, необходимой для принятия решений разного рода при эксплуатации электропоездов на МЦК.

Проектируемая ПСД является составной частью комплексного проекта эксплуатации электропоездов ЭС2Г на МЦК в автоматическом режиме в соответствии с 4-м уровнем автоматизации (GoA 4 по МЭК 62290-1).

Внедрение ПСД позволит повысить уровень безопасности движения при эксплуатации электропоезда за счет прогнозного подхода к оценке состояния его узлов и агрегатов, а основой системы станет цифровой двойник, обучаемый на основе нейронной сети, который обеспечит раннее обнаружение развития дефектов, неполадок и поиск предотказных состояний на стадии их формирования, а также увеличение достоверности диагноза технического состояния оборудования и подсистем электропоезда и прогноза их ресурса (безаварийной работы). Также с помощью данных от ПСД можно оценивать контроль качества выполнения ремонтных работ, прогнозировать снижение затрат, связанных с возможными

авариями и простоями поезда. ПСД будет обеспечивать реализацию следующих функций:

- автоматический сбор данных от датчиков подсистем, узлов, оборудования, входящих в состав бортовой части ПСД;
- сбор и обработку цифровых и аналоговых сигналов датчиков технического состояния по каждому вагону электропоезда «Ласточки»;
- измерение, регистрация динамических показателей сил, возникающих при движении вертикальных и поперечных ускорений с координатной привязкой;
- централизованный сбор данных по электропоезду;
- сбор и агрегацию сигналов от МПСУиД, необходимых для принятия решений ПСД;
- информационное обеспечение машиниста-оператора, диспетчера, причастных служб.

Предварительные результаты поездных испытаний. В сентябре 2021 года на МЦК специалисты АО «ВНИИЖТ» установили тестовую версию оборудования ПСД для получения первых экспериментальных данных (рисунок 3).

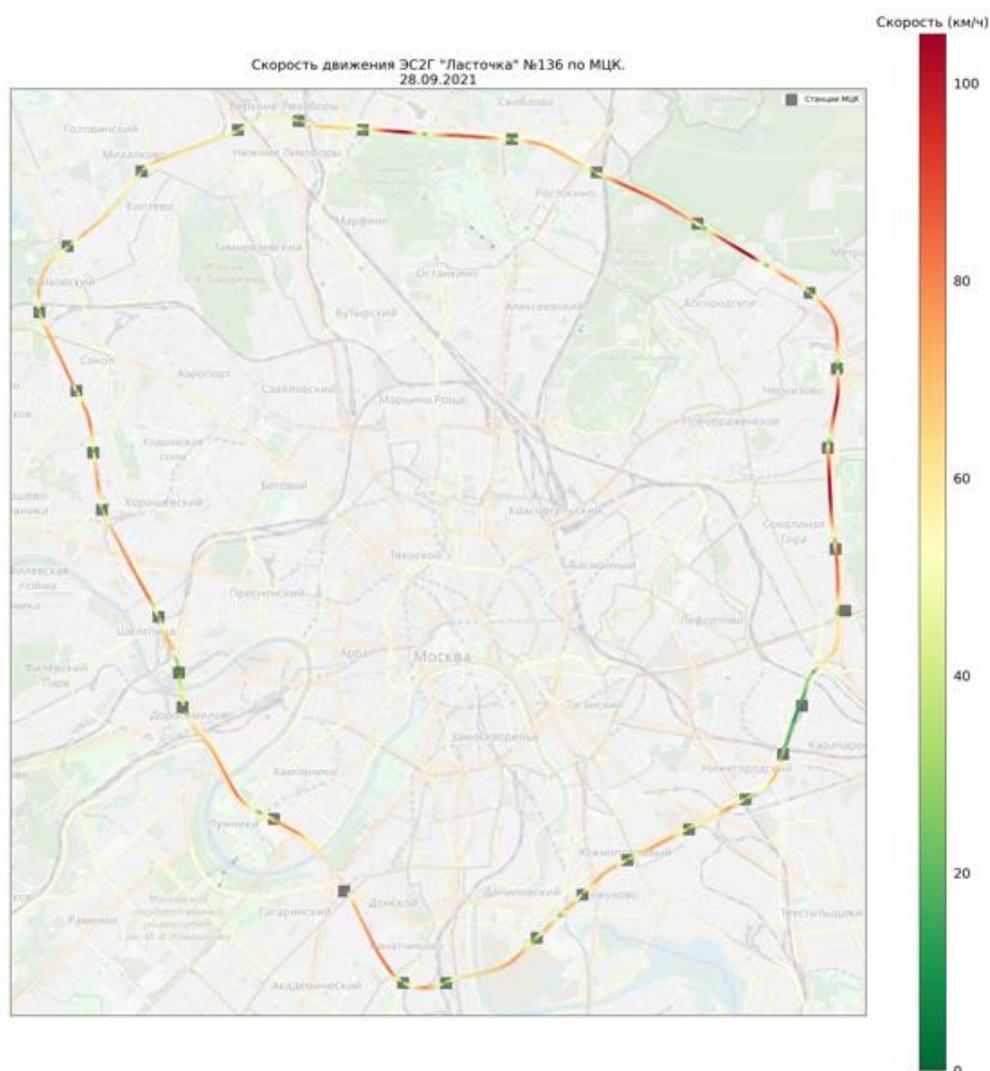


Рисунок 3 – Нанесенная на карту «легенда» передвижения ЭС2Г «Ласточка»

Блок комфорта пассажиров с встроенным цифровым акселерометром (рис. 4), был установлен в подвагонном пространстве в области над тележкой, а второй в середине вагона. Данные записывались в непрерывном режиме с каждой платы в текстовый файл на переносной компьютер.

Темп получения данных составлял 1344 измерения в секунду по трем осям с разрешением 12 бит и динамическим диапазоном $\pm 4g$. Фильтр высоких частот был отключен, чтобы наблюдать ускорение свободного падения вдоль вертикальной оси, и чтобы не вносить в измерения фазовых искажений.

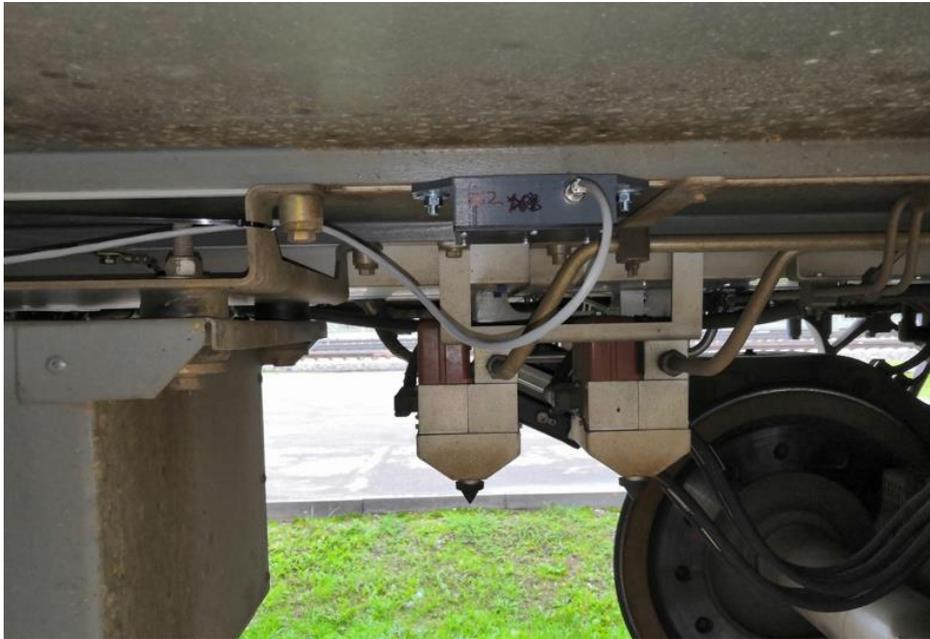


Рисунок 4 – Установка БКП в подвагонном пространстве ЭС2Г

Априорно не было известно ничего о характере получаемых данных, поэтому не было задачи привязать полученные данные к конкретному физическому процессу или явлению, возникающему в процессе движения поезда.

Спектры среднеквадратичных значений амплитуд Фурье гармоник подвагонного пространства (наружного пола вагона) по трем осям приведены на рисунках 5.

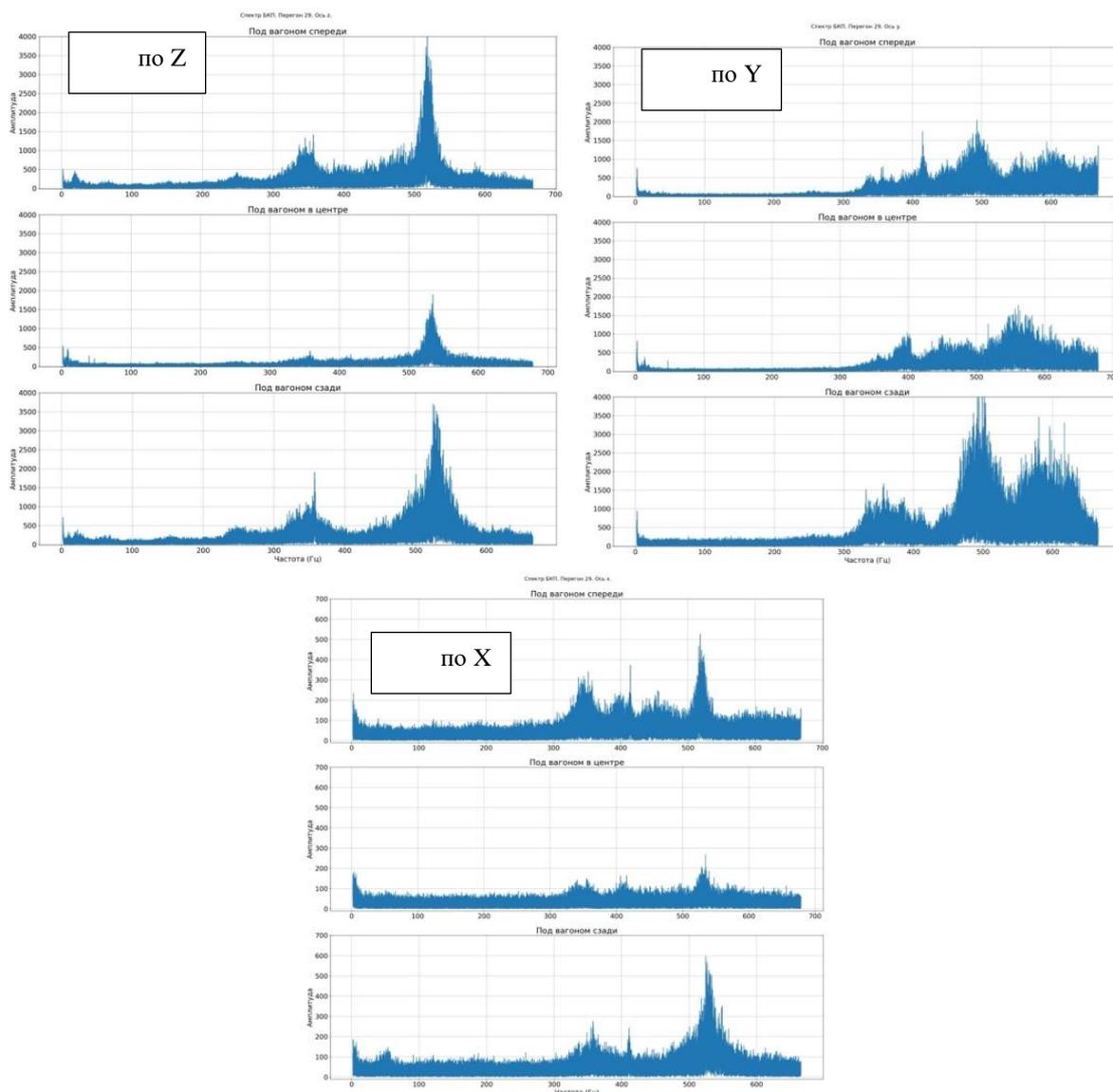


Рисунок 5 - Среднеквадратичная амплитудно-частотная характеристика поперечных колебаний в вертикальном, поперечном и продольном направлении (ось Z, Y, X), измеренная над тележками и в центре вагона

На рисунке 5 видно, что в центре вагона наблюдается выраженное колебание, многократно превосходящее уровень шума. Спектры колебаний по оси Y тоже заметно превосходят уровень шумов и это означает, что по этой оси также наблюдаются устойчивые колебания и резонансы регистрируемые БКП в центре вагона. Данные по оси X- уровень колебаний в продольном направлении по центру вагона выделяется заметно меньше над уровнем шумов. Данное наблюдение свидетельствует о том, что середина вагона и продольное направление измерения импульсов от внешних воздействий – это хороший выбор точки измерений [6, 7].

Особый интерес представляет тот факт, что в центре вагона, в продольном направлении отсутствует пик, соответствующий основной продольной моде колебаний, это означает, что измеряемые величины продольных ускорений будут следствием тех внешних воздействий, которые возбудили продольную моду либо через

тележки, либо через беззасторное сцепное устройство. Наличие шума не будет мешать выделять измеряемый сигнал, так как подавляющее большинство методик отлично справляются с такой задачей, при условии, что шум соответствует модели «белого» шума. А модель белого шума – это и есть постоянный уровень, так называемая «полка» на спектре. Непосредственный анализ полученных спектров показывает, что есть выраженные максимумы на частотах 520-550 Гц. Не уточняя источник такой вибрации можно заметить, что после пика спектр возвращается к своим среднеквадратичным значениям для продольной моды и вертикальной поперечной моды. Для поперечной горизонтальной моды ситуация неоднозначная, так как шум у низкочастотной области имеет заметно меньшее значение, чем в высокочастотной, и это может означать пропуск данных о спектре. Таким образом, для работы по осям X и Z частоты оцифровки 1344 Гц может быть вполне достаточно,

но для оси Y требуется уточнение и проведение дополнительных экспериментов.

Во время проведения эксперимента на буксовых узлах электропоезда и на раме тележки над пружиной (во второй ступени подвешивания) были установлены пьезоакселерометры. Датчики, устанавливаемые на буксовых узлах (рисунок 6)



Рисунок 6 - Установка пьезоакселерометра на буксовом узле (слева) и над пружиной (справа)

Необходимо отметить, что моторы и редукторы электропоезда ЭС2Г «Ласточки» установлены несимметрично относительно центра оси колесной пары. Анализируя полученные данные с участка движения, когда двигатель электропоезда работал в режиме тяги (рисунок 7), то можно заметить, что две буксы вибрируют достаточно гладко (вероятно на главной частоте подшипника), а сигналы на двух других явно содержат дополнительные высокочастотные компоненты, которые на данный момент можно соотнести с частотами редуктора и двигателя. Данные наблюдения показывает, что с одной стороны, частота оцифровки 65536 Гц позволяет наблюдать работу моторов и редукторов, с другой – есть существующие частоты, которые, вероятно,

ближе всего расположены относительно железнодорожного пути, поэтому они будут источником информации о пересечении колесной парой стыка рельсов или, например, дефекта пути (колеса) – потенциального источника внешнего импульсного воздействия, которым планируется зондировать механические системы вагонов.

не захватывает датчик, так как характер сигнала становится несколько хаотическим, и требует некоторого дополнительного исследования [8].

На рисунке 7 представлены выдержки записей по результатам предварительных поездных испытаний на МЦК. По данным графиком четко выделяется железнодорожный стык и возникающие при наезде колесом на него частоты колебаний, при чем отчетливо видно прохождение первой колесной пары по стыку и второй колесной пары тележки по ходу движения поезда. На первой степени рессорного подвешивания (акселерометр над пружиной) видны колебания, но уже в меньшей степени с учетом гашения возникающих процессов рессорным подвешиванием поезда.

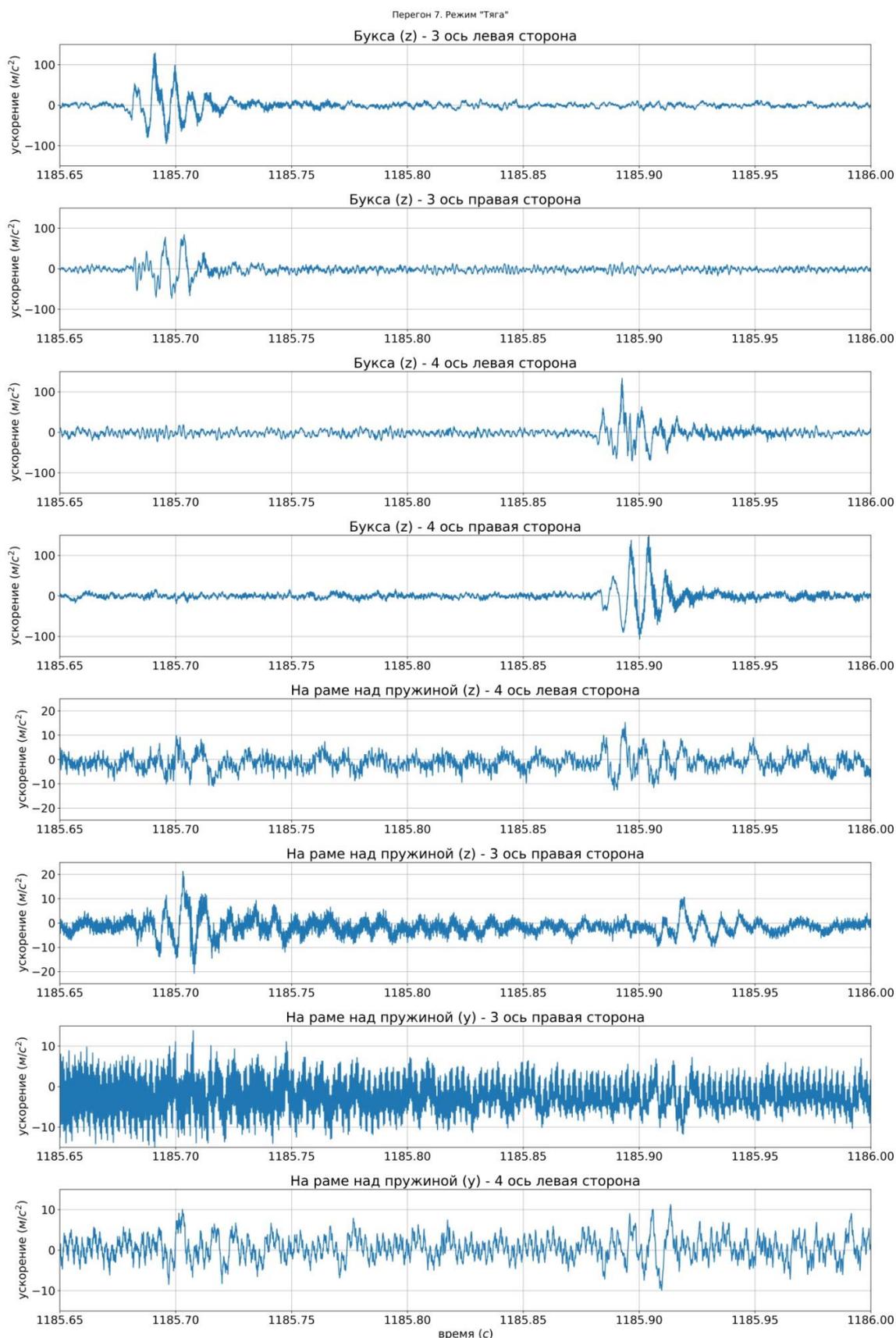


Рисунок 7 - Поток данных с акселерометров, установленных на 4х буксах одной тележки при прохождении стыка рельсов

Также элементами ПСД были зафиксированы короткое быстротекущие события амплитудой до 10g, которые возникали на одной оси и после чего

возникло на другой оси. Разница между событиями на одном из участков движения составляла 0,2 сек, что при учете расстояния между осями «Ласточки»

равным 2600 мм эквивалентно скорости 13 метров в секунду, что соответствует скорости 46.8 км/ч при том, что по данным МПСуд скорость электропоезда составляла 45 км/ч. Данные результаты свидетельствуют о предварительной сходимости зафиксированных результатов ПСД и фактическим данным с электропоезда.

Еще один тип событий - событие с амплитудой $1g$ происходит синхронно и связан с переключением режима работы двигательной установки с режима выбега на режим тяги или торможения двигателем.

Выводы. Результаты предварительных испытаний позволили выстроить методику определения необходимой частоты дискретизации сигнала для устойчивой работы алгоритма выделения всплеска, инициированного пересечением стыка рельсов:

- показано, что неустойчивость выделения первого волнового пакета во всплеске определяет неустойчивость алгоритма в целом;
- показано что для каждого типа всплесков характеристики волновых пакетов отличаются при одинаковой амплитуде всплеска;
- определен параметр, характеризующий тип выделяемого всплеска;
- показано, что устойчивость алгоритма выделения всплеска превосходит даже устойчивость алгоритма реконструкции волнового пакета;
- установлено, что любая частота оцифровки, при которой реконструкция всплеска волновыми пакетами является достоверной, гарантирует устойчивость выделения всплеска и его типа.

Записанные данные были собраны и переданы в БАМ НС разработки АНО «Сколково» для обучения нейросети. По состоянию на декабрь 2021 года ПСД умеет предсказывать остаточный ресурс подшипников ходовой части электропоезда ЭС2Г «Ласточка».

В апреле 2022 года запланированы полномасштабные испытания ПСД на новом поезде. Об итогах их проведения будет рассказано в следующих статьях.

Список литературы

1. А.С. Ададуров Автоматизированная система контроля за работой специального подвижного состава. Бюллетень объединенного ученого совета ОАО «РЖД» №6. С. 29–35, (2016).
2. А.С. Ададуров, А.В. Нерезков, В.И. Федорова, О.А. Сулов и А.В. Лесников. Достигнутый результат внедрения поста акселерометрического универсального контроля и дальнейшие перспективы при определении дефектов на поверхности катания колес вагонов. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2021 №1 (69). С.192-199.
3. Сулов О. А., Федорова В. И. Перспективные подходы к прогнозному моделированию деградационных процессов элементов верхнего строения пути и их применение при создании цифровых двойников // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2021. Т. 80. № 5. С. 251 – 259. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-5-251-259>.
4. И.А. Коконев «КОМПАКС®-ЭКСПРЕСС-ТР3». Сборник трудов XXIV Всероссийской студенческой научно-практической конференции «Молодежная наука», В.С. Ратушняк, Красноярский институт железнодорожного транспорта - филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования, Красноярск, (2020), С. 68–71.
5. А.А. Бондаренко, Г.Р. Маеров, Д.А. Зяблов, Я. В. Дорофеев, Т.В. Щенникова, (Инновации в диагностике железнодорожной инфраструктуры: методы, средства, обучение. Наука и образование транспорту №2, С. 89–92 (2017).
6. Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц, Теория упругости ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА ТЕОРИЯ УПРУГОСТИ 4-е изд., испр. -М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. - 248 с. (т. VII).
7. Беляев, Н.М. Труды по теории упругости и пластичности. М.: ГИТТЛ, 1957. 632 с
8. Тимошенко, С.П. Теория упругости / С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – М.: Наука, 1975. – 576 с