

УДК 621.39
EDN TRNDMY

А. В. БОЛЬШАКОВА, А. М. БОРОНАХИН, Д. М. КЛИОНСКИЙ, Д. Ю. ЛАРИОНОВ,
Л. Н. ПОДГОРНАЯ, А. Н. ТКАЧЕНКО, Р. В. ШАЛЫМОВ

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ РЕЛЬСОВОГО ПУТИ НА ОСНОВЕ НЕПРЕРЫВНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И ЧАСТОТНОГО АНАЛИЗА

В статье предложен алгоритм определения дефектов рельсового пути по показаниям инерциальных датчиков с учетом прохождения болтовых стыков. В качестве математического аппарата использованы непрерывное вейвлет-преобразование и частотный анализ. Алгоритм опробован на выборке экспериментальных данных, показана эффективность его применения.

Ключевые слова: инерциальный метод диагностики, акселерометр, болтовой стык, сварной стык, непрерывное вейвлет-преобразование, вейвлет-скалограмма, частотный анализ.

Введение

Составными элементами верхнего строения пути являются рельсы, рельсовые скрепления, шпалы (деревянные или бетонные), стрелочные переводы, балластный слой. Рельсы служат направляющими для колес объектов, перемещающихся по железной дороге, а также принимают на себя давление от поезда и передают его через шпалы в балластный слой. Стандартная длина рельсов в России – 12,5; 25; 50; 100 м; для их соединения применяются болтовые и сварные стыковые скрепления.

В болтовых стыках рельсы соединяются четырех- или шестидырными накладками, стягиваемыми в пазах рельсов стыковыми болтами. Зазор в стыках между

Большакова Александра Васильевна. Старший преподаватель кафедры лазерных измерительных и навигационных систем, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (С.-Петербург).

Боронахин Александр Михайлович. Доктор технических наук, профессор кафедры лазерных измерительных и навигационных систем, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

Клионский Дмитрий Михайлович. Кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

Ларионов Даниил Юрьевич. Кандидат технических наук, доцент кафедры лазерных измерительных и навигационных систем, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

Подгорная Людмила Николаевна. Кандидат технических наук, доцент кафедры лазерных измерительных и навигационных систем, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

Ткаченко Анна Николаевна. Кандидат технических наук, доцент кафедры лазерных измерительных и навигационных систем, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

Шалымов Роман Вадимович. Кандидат технических наук, доцент кафедры лазерных измерительных и навигационных систем, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

рельсами оставляется по причине изменений их длины, обусловленных температурой окружающей среды. При прохождении стыка колесо ударяется о головку принимающего рельса, что приводит к износу как рельсов, так и колес.

При помощи сварных стыков рельсы соединяются в единую плетть. Использование сварных типов стыковых скреплений позволяет снизить затраты на текущее содержание пути, увеличить срок службы элементов его верхнего строения и подвижных составов, а также повысить комфортабельность для пассажиров. Однако из-за разных механических свойств материалов рельсов и сварного шва в стыках могут возникать дефекты.

Болтовой и сварной стыки обладают различными механическими свойствами. Несмотря на наличие накладок, болтовой стык – это разрыв рельсовой нити, поэтому он обладает меньшей жесткостью, чем сварной стык или цельный рельс.

Для диагностики рельсового пути может применяться инерциальный метод [1–5], предполагающий обнаружение неровности на поверхности катания рельса (дефекта) и определение ее длины и глубины путем анализа данных акселерометров, установленных в составе микромеханических модулей (ММ) на вагоне вблизи точки контакта его колес с рельсами. Прохождение стыковых скреплений оказывает влияние на показания инерциальных датчиков. Например, в случае болтового стыка сигналы акселерометров меняются таким образом, как если бы объект проходил через дефекты. Подобная реакция датчиков обусловлена ударом колеса о принимающий рельс, который вследствие меньшей нагрузки располагается чуть выше отдающего рельса. При прохождении сварного стыка значение имеет не само соединение (сварка), а присутствие в нем дефекта типа «смятие в сварном стыке» (если сварной стык не имеет дефектов, то показания инерциальных датчиков будут практически такими же, как при движении по ровному, цельному рельсу). Следовательно, в силу механического отличия болтового стыка от сварного путем спектрального анализа можно определить тип стыка по сигналу ММ, т.е. отличить дефект типа «смятие в сварном стыке» от болтового стыка (дефектом не являющегося). Подобная идентификация является важной задачей, поскольку стыки относятся к самой распространенной неоднородности рельсов, при этом параметры дефектов болтовых стыков (длина и глубина неровности) не могут быть определены.

Распознавание по сигналам акселерометров участков прохождения болтовых стыковых скреплений может быть выполнено с привлечением информации от других измерительных систем (магнитометрических датчиков, лазерных сканеров, систем видеофиксации). Однако для повышения независимости инерциальной системы диагностики от сторонних измерительных систем, а также в целях ее применения на неспециализированных железнодорожных подвижных средствах болтовые стыки необходимо идентифицировать непосредственно по показаниям инерциальных датчиков, установленных на буксовых узлах тележки вагона.

Таким образом, в настоящей статье исследуются особенности использования инерциальных датчиков и предлагается алгоритм для выявления дефектов поверхности катания рельсов с помощью показаний приборов, обусловленных прохождением различных типов стыковых скреплений. Для этого ниже будут кратко проанализированы современные подходы к диагностике рельсового пути. С учетом 20-летнего опыта авторов настоящей работы в этой области рассматриваются основные особенности построения инерциальной системы диагностики рельсового пути.

Обосновывается выбор математического аппарата непрерывного вейвлет-преобразования для выделения ключевых признаков, соответствующих конкретному типу стыка. Поставлена задача классификации типа стыка и описан подход к ее решению. Приведены результаты апробации алгоритма определения типов стыковых скрепленных рельсов по показаниям акселерометров.

Анализ работ

В области диагностики рельсового пути можно вычлениить две задачи: измерение геометрических параметров пути и диагностика дефектов рельсов. Применяемые средства диагностики можно разделить на три основные категории: ручные (линейки, шаблоны и т.д.), тележки (ручные, с электро- или бензоприводом) и вагоны (путемеры, дефектоскопы и т.д.). При всех достоинствах тележек и ручных средств (низкая стоимость, легкость транспортировки и выделения окон в расписании движения) они обладают существенным недостатком: при их использовании для диагностики рельсового пути последний не испытывает рабочей нагрузки, т.е. экспериментальные условия разительно отличаются от эксплуатационных. Таким образом, диагностические вагоны – как специализированные путемеры, так и прочие типы вагонов, дооснащенные соответствующим измерительным оборудованием (вплоть до пассажирских и грузовых, а также локомотивов) – в этом смысле не имеют альтернативы.

Для определения параметров и измерения дефектов рельсов, выявления болтовых стыков широко применяются ультразвуковые [6–8] и магнитометрические системы [9–11]. Ультразвуковые средства требуют контакта датчиков с поверхностью рельса, что ограничивает скорость вагона, при которой осуществляется контроль. И те и другие характеризуются низкой точностью выявления поверхностных дефектов и определения их параметров [12].

Инерциальные средства, в зависимости от места установки на вагоне, могут использоваться как для контроля геометрических параметров пути (установка на хребтовой балке или тележке вагона, внутри него) [13–16], так и для диагностики дефектов поверхности катания рельса (буксовые узлы, тележка вагона) [15–18]. При этом прохождение болтовых стыков и дефектов поверхности катания рельса будут порождать схожие изменения в показаниях датчиков, поэтому для выявления болтовых стыков задействуют дополнительные системы, например магнитометрические [19]. Следует отметить, что авторам настоящей статьи не известны работы, в которых описывались бы способы, как различить показания инерциальных датчиков, полученные при прохождении дефектов рельсового пути и при прохождении болтовых стыков, без привлечения таких дополнительных систем.

Особенности построения инерциальной системы диагностики рельсового пути

Предлагаемый в статье алгоритм классификации типа стыка и результаты его апробации основаны на данных системы контроля коротких и импульсных неровностей (КИН). В этой системе, входящей в состав мобильного диагностического комплекса МДК-498 [20] производства АО «Радиоавионика», реализован инерциальный метод диагностики. Система КИН построена на базе 4 микромеханических

модулей, установленных на буксах колесных пар одной из ходовых тележек вагона (рис. 1). Каждый из модулей содержит комплект МЭМС-акселерометров с вертикально ориентированной измерительной осью, установленных на последовательно идущих колесах (например, ММ1 и ММ2 на рис. 1). Благодаря конструктивным особенностям тележки вагона расстояние между буксами неизменно и составляет 2,4 м, что позволяет однозначно установить прохождение неровности благодаря наличию всплесков в сигналах датчиков с заранее известной временной задержкой, зависящей от скорости движения. Местоположение дефектов и оценка временной задержки в показаниях ММ контролируются либо непосредственно по измерениям одометра, установленного на одном из колес вагона, либо с использованием на рельсовом пути интегрированной системы навигации. Система также оснащена одометром и дополнительно привлекает данные от приемной аппаратуры спутниковых навигационных систем, бесплатформенной инерциальной навигационной системы, геоинформационной системы (ГИС) [21].

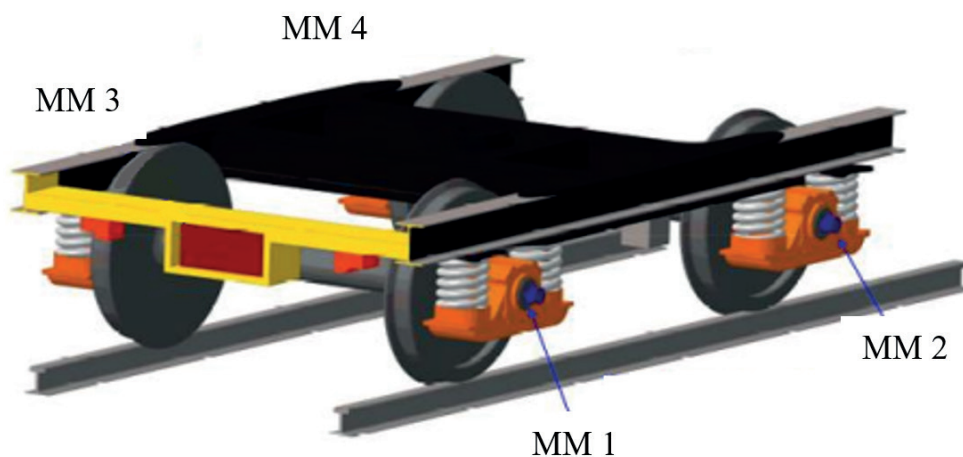


Рис. 1. Расположение ММ системы КИН

В составе каждого модуля имеются акселерометры различных моделей (разного диапазона измерений и чувствительности), предназначенные для контроля состояния пути как в районе стыковых соединений (ускорения порядка десятков g), так и вне стыков (ускорения порядка единиц g). При сильных ударах акселерометры с недостаточным динамическим диапазоном не будут давать достоверного результата (рис. 2, *a*), а при воздействиях с малыми амплитудами показания датчиков могут как совпадать (рис. 2, *b*), так и существенно отличаться (рис. 2, *в*).

Перед разработчиком измерительного модуля для объектов с повышенной динамикой стоит задача обеспечить заданные параметры (точности, полосы частот) во всем требуемом диапазоне измеряемых ускорений. Обычно с этой целью выбирается один датчик с характеристиками, полностью соответствующими заданным требованиям. Тем не менее в ряде случаев это слишком дорого или невыполнимо в пределах требуемых массогабаритных характеристик. В связи с этим предлагаемый подход предусматривает выбор нескольких датчиков, чьи диапазоны измеряемых ускорений перекрывают друг друга, т.е. каждый прибор должен обеспечить заданную точность в том диапазоне ускорений, который не охватывается другим датчиком.

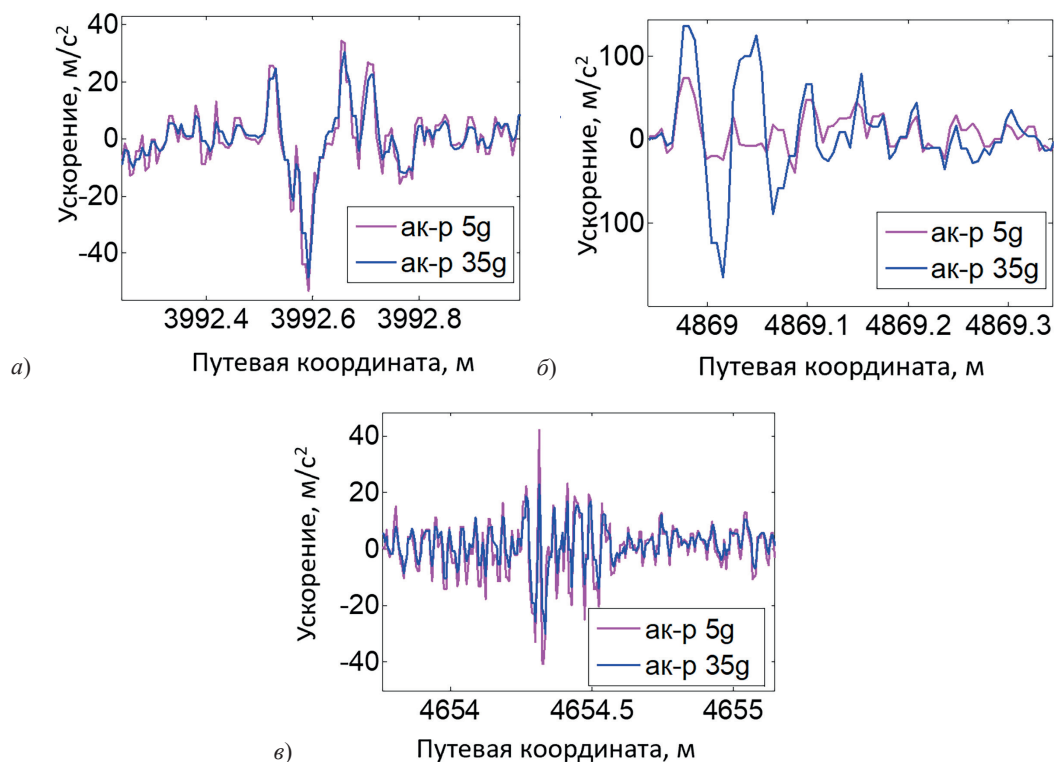


Рис. 2. Различия в сигналах акселерометров системы КИН

Что касается требуемого частотного диапазона, то он в зависимости от поставленной перед системой диагностики рельсового пути задачи может быть различным. Собственные частоты прохождения некоторых элементов системы «вагон–рельс» на скорости в 100 км/ч не превышают 100 Гц. Однако при анализе вибраций в системе серьезные возмущения наблюдаются и на более высоких частотах, акустические вибрации (например, от трещин в колесах и оси колесной пары) находятся уже в области десятков кГц.

Требования к инерциальным датчикам ММ системы КИН основываются на:

- 1) рабочей скорости путеизмерительного средства, обусловленной типом вагона и установленным на нем оборудованием;
- 2) параметрах контролируемых дефектов, заданных нормативной документацией на содержание рельсового пути.

Система КИН предназначена в первую очередь для выявления дефектов на поверхности катания рельсов с погрешностью $\pm 0,5$ мм при глубине износа до 3 мм в диапазоне длин волн от 0,03 м до 1 м [22]. Тщательное изучение совокупности значений амплитуд и частот, возникающих при прохождении всех типов неровностей рельсового пути, подвергаемых контролю, позволяет сформулировать следующие требования, которым должен удовлетворять датчик:

- измеряемые амплитуды ускорений – от 0,01 до 100 g;
- диапазон частот – не менее 6 кГц (частота записи при этом должна быть еще хотя бы в 2 раз выше) [23].

В силу большого разнообразия возмущающих воздействий, оказываемых на вагон при его движении, в состав системы КИН включены микромеханические аксе-

лерометры (ММА) с диапазонами ± 8 g (ММА1), ± 50 g (ММА2) и ± 100 g (ММА3). ММА1 обладает большей чувствительностью и меньшей плотностью шума по сравнению с ММА2 в одном с ним диапазоне ускорений (то же самое верно и для ММА2 и ММА3). В зависимости от действующего ускорения из показаний всех акселерометров при помощи специально разработанного алгоритма формируется единый сигнал с заданными точностными характеристиками – создается так называемый «виртуальный» акселерометр [5].

Повторяемость сигналов акселерометров, установленных на буксах впереди и позади идущих колес, является критерием достоверности дефекта, выявленного посредством блока корреляционного анализа системы КИН [24]. Если при прохождении сварного стыка амплитуда ускорений в показаниях акселерометра определяется глубиной и длиной дефекта в нем, то при прохождении болтового стыка – разностью высот стыкуемых рельсов. В первом случае система КИН должна определить параметры проходимого дефекта, во втором реакция акселерометров должна быть исключена из такого анализа: болтовой стык не является дефектом, его некорректно характеризовать таким параметром, как глубина, так как при его прохождении колесо не касается дна [25]. Для различения этих измерительных ситуаций разработан специальный алгоритм.

Выбор математического аппарата

В рамках настоящей статьи для определения свойств сигналов акселерометров предлагается использовать частотный анализ совместно с непрерывным вейвлет-преобразованием. Одним из способов проведения частотного анализа является регистрация мгновенного спектра сигнала, зависящего от времени, для визуализации которого строится Фурье-спектрограмма [26], отображаемая на частотно-временной плоскости (в системе координат «время–частота»), а амплитуды спектральных составляющих окрашиваются соответствующим цветом.

Фурье-анализ частично или полностью теряет свою эффективность при исследовании сигналов с частотной эволюцией (т.е. частотой, изменяющейся по некоторому сложному закону, такому как частотная модуляция сигнала, наличие локальных сигналов). Кроме того, Фурье-анализ предполагает, что сигнал определен на всей временной оси, поэтому из-за отсутствия локализационных свойств во временной области (при вычислении преобразования одновременно задействуются все данные) возникают сложности при определении основных диапазонов концентрации энергии, которая рассеивается по достаточно широкому диапазону частот, что создает порой ложную картину ее распределения по частотам.

При анализе сигналов важно учитывать, что по Фурье-спектрограмме сложно выявлять их локальные особенности из-за не всегда достаточного разрешения по частоте. Сигналы акселерометров могут быть нестационарными, в связи с чем применение метода Фурье является не вполне корректным.

Для повышения точности и достоверности оценки сигналов акселерометров, включая выявление и анализ неровностей рельсового пути, необходим специальный подход, обладающий адаптивностью к рассматриваемому сигналу. Таковым является вейвлет-преобразование [27–32] – как дискретное, так и непрерывное.

Важно отметить, что, несмотря на широкое использование (для осуществления мультиразрешающего и мультиполосного анализа, сжатия сигналов, очистки сиг-

налов от шума), дискретное вейвлет-преобразование имеет некоторые ограничения при анализе и обработке сигналов. Оно не позволяет построить единую частотно-масштабную скалограмму (аналог частотно-временной спектрограммы в методе Фурье), которая давала бы общее представление о сигнале на частотно-масштабной плоскости (масштаб в вейвлет-преобразовании является аналогом частоты и при необходимости может быть пересчитан в нее и наоборот). Кроме того, дискретное вейвлет-преобразование не обеспечивает требуемого частотно-временного разрешения для разделения низкочастотных компонент, что важно при анализе сигналов акселерометров. По этой причине целесообразно задействовать непрерывное вейвлет-преобразование, речь о котором пойдет далее.

Непрерывное вейвлет-преобразование (НВП) обладает следующими преимуществами:

- 1) высоким разрешением (связанным с избыточностью НВП) как в низкочастотной, так и в высокочастотной областях;
- 2) адаптивностью, в связи с чем можно учитывать локальные особенности как во временной, так и в частотной областях;
- 3) удобной визуализацией на основе вейвлет-скалограммы;
- 4) возможностью применения быстрых вычислительных алгоритмов.

В основе НВП лежит семейство функций, зависящих от двух непрерывных параметров a и b , которые определяют соответственно масштаб и сдвиг этого преобразования. В качестве базисного вейвлета в данном случае выступает двухпараметрическое семейство функций

$$\psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right); a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0, \quad (1)$$

где $\psi_{ab}(t)$ – базисный вейвлет, соответствующий параметру масштаба a и параметру сдвига b ; t – непрерывное время.

Таким образом, непрерывное вейвлет-преобразование сигнала f на основе базисного вейвлета (1) определяется следующим образом:

$$W_{\psi}[a, b] = (f, \psi_{a,b}) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt. \quad (2)$$

Полученное в (2) выражение является непрерывной функцией масштаба a и параметра сдвига b . Построение вейвлет-скалограммы требует выбора из этой непрерывной функции счетного набора значений, называемых вейвлет-коэффициентами, которые можно определить через интегральное вейвлет-преобразование

$$c_{jk} = W_{\psi}[f]\left(\frac{1}{2^j}, \frac{k}{2^j}\right), \quad (3)$$

где $\frac{1}{2^j}$ – масштаб a ;

$\frac{k}{2^j}$ – сдвиг b ;

$j, k \in \mathbb{N}$ – порядковые индексы в матрице вейвлет-коэффициентов. Количество индексов (строк и столбцов матрицы вейвлет-коэффициентов (3)) формирует частотное (по масштабу a) и временное (по сдвигу b) разрешение вейвлет-скалограммы.

Постановка и подход к решению задачи классификации типа стыка

Задача классификации состоит в определении класса некоторого объекта (события) на основе анализа его свойств (характеристик), делающих этот объект уникальным по сравнению со всеми остальными. При этом предполагается, что число классов априорно известно и объект будет непременно отнесен к одному из них.

В качестве классифицируемых событий для системы КИН используются различные типы неровностей рельсового пути, по которым проходит колесо вагона с установленным на нем ММ. Среди возможных в этом случае следует рассматривать следующие ситуации: прохождение периодической или импульсной (одиночного дефекта вне зоны стыка) неровности, дефектного (со смятием) сварного стыка, болтового стыка, ровного рельса (в том числе сварного стыка без дефектов). Большая часть этих событий с высокой степенью достоверности (свыше 95%) идентифицируется существующим алгоритмом системы КИН. В частности, соответствующие ровному рельсу (не содержащие неровности) данные удаляются из рассмотрения после прохождения сигналов ММ через блоки корреляционного анализа и выделения сигналов повышенной мощности. Периодические и импульсные неровности выявляются на основании особенностей, наблюдаемых в сигналах ММ при их прохождении, и по данным ГИС-архива прошлых проездов. Единственное, что на текущий момент не может быть надежно распознано (без использования дополнительной измерительной аппаратуры), это прохождение болтовых и дефектных сварных стыков.

Таким образом, полная группа событий $U = \{u_1, u_2\}$ для разрабатываемого классификатора (алгоритма определения типа стыкового скрепления) делится на две категории – болтовые и сварные стыки:

- 1) группа u_1 – болтовой стык – соответствует прохождению «разрыва» между двумя рельсами, который не является дефектом [25];
- 2) группа u_2 – сварной стык – соответствует прохождению дефекта типа «смятие».

На вход классификатора типа стыка поступает w_i – сигнал, прошедший через описанные выше блоки обработки данных системы КИН и относящийся к одной из двух перечисленных групп.

У каждого события можно выделить M описывающих его признаков. Следовательно, каждое событие описывается с помощью многомерной величины $y_i = (y_i^{(1)}, y_i^{(2)}, \dots, y_i^{(M)})$, при этом $y_i^{(m)}$ – результат измерения m -го признака при i -м событии. В качестве признаков в анализируемой ситуации должны выступать особенности сигналов w_i , зависящие как от механических свойств проходимой неровности, так и от скорости ее прохождения. Поскольку они представляют собой локальный во времени всплеск, имеющий разные характеристики в разных диапазонах частот, то ни временные, ни частотные их особенности отдельно не могут служить такими признаками. Ввиду этого для формирования набора признаков предлагается выполнить следующую предобработку сигналов.

1. Нормирование w_i по квадрату скорости, чтобы исключить влияние непостоянства скорости движения вагона на амплитуду сигналов [1]:

$$f_i(t) = \frac{w_i(t)}{V_i^2(t)}, \quad (4)$$

где $f_i(t)$ – нормированный сигнал системы КИН, $V_i(t)$ – скорость движения вагона, i – номер участка сигнала, t – время. Эта операция позволяет оставить для анализа исключительно реакцию на механические особенности проходимой неровности.

2. Вычисление НВП от полученных после (4) сигналов $f_i(t)$ в соответствии с выражением (2) и выделение на его основе матрицы вейвлет-коэффициентов $c_{jk}[f_i]$ согласно выражению (3). Это должно позволить сформировать пространство признаков на основе частотно-временных особенностей сигналов.

3. Нормирование вейвлет-коэффициентов таким образом, чтобы максимальное значение каждого из рассматриваемых сигналов соответствовало 1, а минимальное – 0:

$$c_{jk}^n [f_i] = \frac{c_{jk} [f_i] - \min(c_{jk} [f_i])}{\max(c_{jk} [f_i]) - \min(c_{jk} [f_i])}, \quad (5)$$

где $c_{jk}^n [f_i]$ – нормированный вейвлет-коэффициент, $\min(c_{jk} [f_i])$ – минимальное значение элемента матрицы вейвлет-коэффициентов, $\max(c_{jk} [f_i])$ – максимальное значение элемента матрицы вейвлет-коэффициентов. В результате амплитуда сигнала (глубина неровности или размер зазора в болтовом стыке) не будет оказывать влияния на выбор признаков, характеризующих событие.

Тогда пространство признаков Y , в качестве элементов которого выступают y_p , представляет собой набор значений от 0 до 1, полученных в соответствии с выражением (5). Количество признаков, выделяемых для описания рассматриваемых событий, должно быть определено на основе анализа матриц нормированных вейвлет-коэффициентов для нескольких событий каждого класса. Предполагается, что локальные во времени колебания (большие значения вейвлет-коэффициентов) будут типичны для группы u_1 на одних частотах, а для группы u_2 – на других (в силу механических отличий стыков). В итоге признаками $y_i^{(m)}$ должны стать значения $c_{jk}^n [f_i]$ для конкретных диапазонов частот (т.е. конкретных значений i и j), превышение или непревышение которых будет соответствовать принадлежности события к конкретной группе, т.е. решающая функция примет вид:

$$u_1 = \begin{cases} 1, & y_i^{(m)} \geq P_{\max}^{(m)} \\ 0, & y_i^{(m)} < P_{\max}^{(m)} \end{cases}, \quad (6)$$

$$u_2 = \begin{cases} 1, & y_i^{(m)} \leq P_{\min}^{(m)} \\ 0, & y_i^{(m)} > P_{\min}^{(m)} \end{cases}.$$

Набор таких бинарных классификаторов позволяет отнести событие к той или иной группе. Далее в статье будет представлен анализ обучающей выборки, а на его основании определен набор признаков (значений вейвлет-коэффициентов в ключевых диапазонах частот, которые соотносятся с анализируемыми событиями). Сформированные на их базе бинарные классификаторы будут оценены на предмет качества решения задачи классификации. Кроме того, будут определены пороги (соответствующие выражению (6)) и сочетание бинарных классификаторов, которые позволят получить наилучший результат.

Разрабатываемый классификатор предназначен для выделения из класса «стыки» группы «болтовые стыки», чтобы система КИН выдавала как можно меньше ошибочных рекомендаций на ремонт. Следует, однако, помнить, что достижение обозначенной цели не должно нанести ущерб основной задаче системы – выявлению

и измерению дефектов. В итоге качество работы классификатора можно оценить по следующим критериям:

- минимальному числу (желательно полному отсутствию) сварных стыков, принятых за болтовые (поскольку это означает пропуск дефекта);
- максимальному числу верно выявленных болтовых стыков (для снижения процента ложных рекомендаций на ремонт);
- минимальному числу стыков, которые не удалось надежно классифицировать (для которых бинарные критерии дали противоречивые результаты).

Разработка и апробация алгоритма

При эксплуатации системы КИН в составе мобильного диагностического комплекса показания всех его измерителей записываются в единую базу поездок. В настоящей работе задействуются данные акселерометров ММ с вертикально ориентированной измерительной осью, записанные с частотой 32,5 кГц и прошедшие предварительную обработку в соответствии с выражениями (4), (2), (3), (5).

Для построения и последующей апробации алгоритма определения типа стыкового скрепления из базы записей поездок вагона, оборудованного системой КИН, были выбраны 130 сигналов, выработанных приборами при прохождении болтовых и сварных стыков. Эти показания в равном соотношении были поделены на две группы:

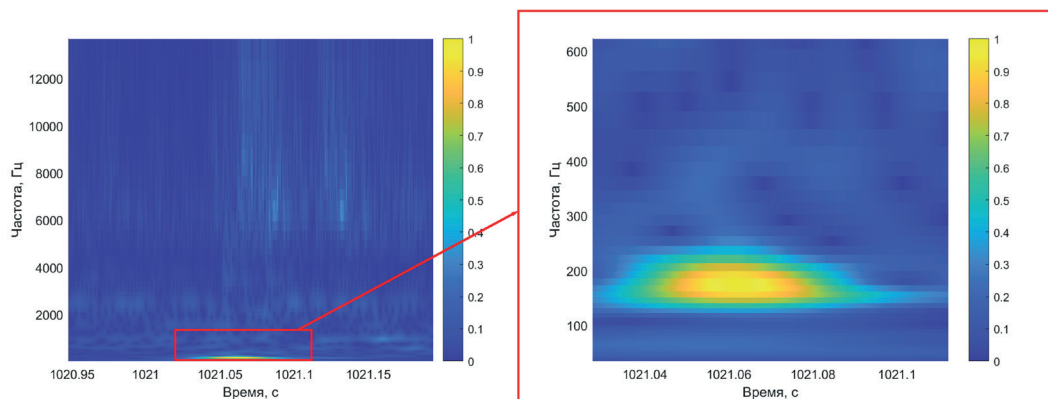
- группа 1, предназначенная для выполнения исследования (обучающая выборка), куда вошли 30 реализаций (при прохождении 15 болтовых и 15 сварных стыков);
- группа 2 – контрольная, предназначенная для оценки качества работы алгоритма (отложенная выборка), куда были включены 100 реализаций (при прохождении 50 болтовых и 50 сварных стыков).

Алгоритм определения типа стыкового зазора разрабатывался с учетом анализа построенных на основе коэффициентов $c_{jk}^n [f_i]$ скалограмм для сигналов 1 группы. Примеры полученных для сварного и болтового стыков скалограмм приведены на рис. 3, а и 4, а соответственно (по оси ординат отложен параметр масштаба, пересчитанный к частоте, по оси абсцисс – параметр сдвига, цветом обозначены нормированные значения вейвлет-коэффициентов). На каждой из скалограмм были определены частотные границы областей, содержащих значения больше 0,5 (выделены на рис. 3, а и 4, а). Результат представлен на рис. 3, б и 4, б в виде сводных вейвлет-скалограмм, соответствующих моменту прохождения каждого из рассматриваемых стыков (на оси абсцисс отмечен номер стыка, на оси ординат – частота). Для каждого стыка выделены частотные интервалы (для анализируемых сигналов их количество составило от 1 до 3), имеющие высокие (амплитуда > 0,5) значения интенсивности колебаний. Цветом на рис. 3, б и 4, б обозначены значения вейвлет-коэффициентов в интервале частот: желтым – выше 0,9; оранжевым – выше 0,8; светло-зеленым – выше 0,7; темно-зеленым – выше 0,6; голубым – выше 0,5. Синим цветом отмечены области, в которых вейвлет-коэффициенты равны или приближаются к нулю (меньше 0,5).

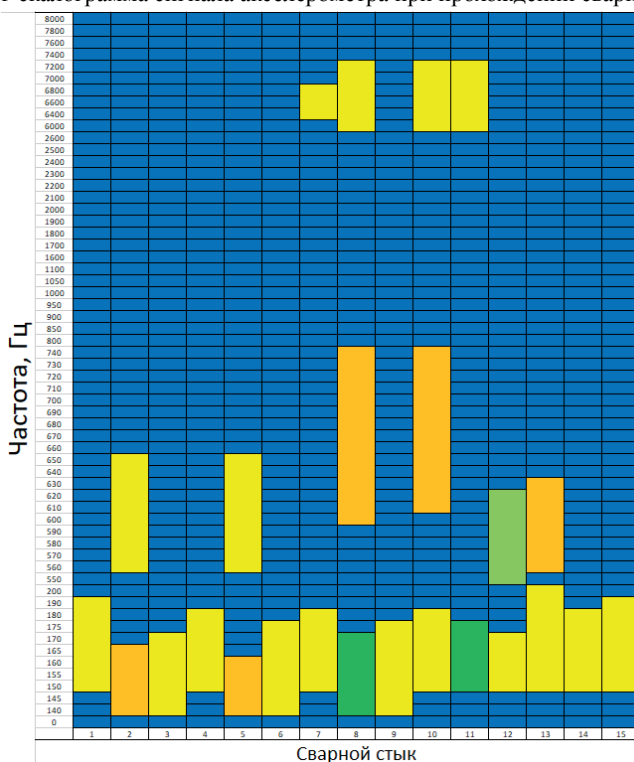
На рис. 3, б и 4, б показаны следующие частотные диапазоны:

- колебания от 140 до 200 Гц соответствуют прохождению сварного стыка и, следовательно, могут быть критерием определения типа стыка;
- колебания от 550 до 740 Гц часто соответствуют прохождению болтового стыка, однако встречаются в 40% рассмотренных сварных стыков, поэтому не могут служить критерием определения типа стыка;

- колебания от 800 до 1100 Гц наблюдаются только при прохождении болтовых стыков в сигналах акселерометров, установленных в составе модулей на колесах, идущих по одному рельсу, и, следовательно, не могут быть критерием определения типа стыка;
- колебания от 1400 до 2400 Гц возникают только при прохождении болтового стыка; таким образом, их можно использовать в качестве критерия определения типа стыка;
- колебания от 6000 до 7200 Гц присущи сигналам только одного из модулей при прохождении сварных стыков; ввиду этого они не являются характеристикой стыка и не могут служить критерием определения типа стыка.

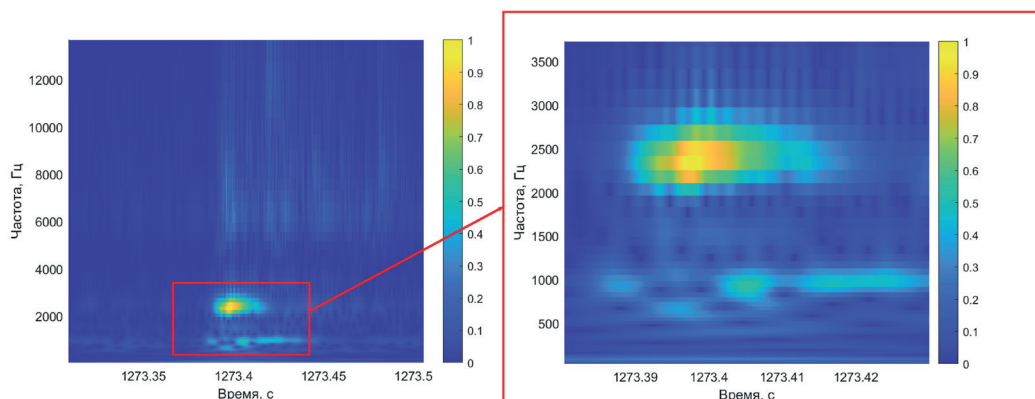


а) Вейвлет-скалограмма сигнала акселерометра при прохождении сварного стыка 1

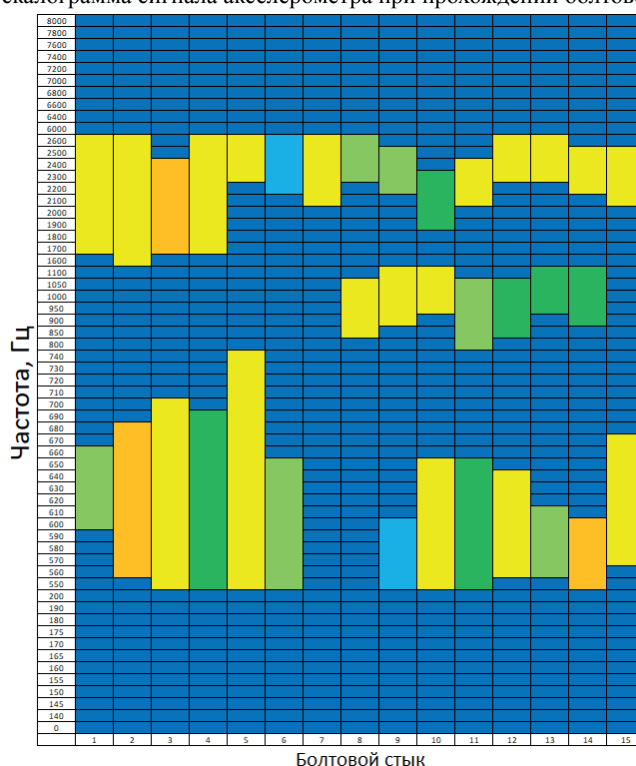


б) Сводная вейвлет-скалограмма, соответствующая прохождению 15 сварных стыков

Рис. 3. Вейвлет-скалограммы сигналов акселерометра при прохождении сварных стыков



а) Вейвлет-скалограмма сигнала акселерометра при прохождении болтового стыка 1



б) Сводная вейвлет-скалограмма, соответствующая прохождению 15 болтовых стыков

Рис. 4. Вейвлет-скалограммы сигналов акселерометра при прохождении болтовых стыков

Из проведенного анализа следует, что интерес для классификации типа стыка представляют два диапазона частот: 1400–2400 Гц (1-й диапазон) и 140–200 Гц (2-й диапазон). Тем не менее сводные вейвлет-скалограммы на рис. 3, б и 4, б показывают, что наибольшие значения вейвлет-коэффициентов попадают в эти диапазоны не для всех 30 стыков. Например, для сварного стыка 8 максимальное значение нормированных вейвлет-коэффициентов в диапазоне 140–200 Гц составляет 0,65; в диапазоне 600–740 Гц – 0,86; в диапазоне 2600–7200 Гц – 1. Заметно, что часть вейвлет-скалограммы, не несущая информации о типе стыка, выглядит ярче, чем полезная для

задачи классификации. Для устранения этого недостатка в алгоритм после нормирования по квадрату скорости предлагается дополнительно ввести два предварительных фильтра, выделяющих необходимые полосы частот, и только затем осуществить нормировку по формуле (5): фильтр нижних частот с полосой пропускания 6 кГц; режекторный фильтр с полосой заграждения 550–1100 Гц.

Таким образом, в пространстве содержится по два признака:

- $y_i^{(1)}$ – максимальное значение вейвлет-коэффициентов в частотном диапазоне 1400–2400 Гц;
- $y_i^{(2)}$ – максимальное значение вейвлет-коэффициентов в частотном диапазоне 140–200 Гц.

Принадлежность стыка к тому или иному типу определяется пороговыми значениями $P_{\max}^{(1)}$ и $P_{\min}^{(1)}$ для признака $y_i^{(1)}$; $P_{\max}^{(2)}$ и $P_{\min}^{(2)}$ – для признака $y_i^{(2)}$. С учетом того что большие амплитуды в 1-м диапазоне соответствуют наличию болтового стыка, а в 2-м диапазоне – наличию сварного стыка, можно сформировать следующий набор бинарных классификаторов по аналогии с выражением (6):

$$u_1 = \begin{cases} 1, & y_i^{(1)} \geq P_{\max}^{(1)} \\ 0, & y_i^{(1)} < P_{\max}^{(1)} \end{cases}, \quad (7)$$

$$u_2 = \begin{cases} 1, & y_i^{(1)} \leq P_{\min}^{(1)} \\ 0, & y_i^{(1)} > P_{\min}^{(1)} \end{cases}, \quad (8)$$

$$u_2 = \begin{cases} 1, & y_i^{(2)} \geq P_{\max}^{(2)} \\ 0, & y_i^{(2)} < P_{\max}^{(2)} \end{cases}, \quad (9)$$

$$u_1 = \begin{cases} 1, & y_i^{(2)} \leq P_{\min}^{(2)} \\ 0, & y_i^{(2)} > P_{\min}^{(2)} \end{cases}. \quad (10)$$

Выбор порогового значения для каждого из классификаторов должен определяться соотношением полученных после его работы истинно положительных (TP), ложноположительных (FP), истинно отрицательных (TN) и ложноотрицательных (FN) решений. Зависимость этих параметров от значений порогов для бинарных классификаторов (7) и (10), идентифицирующих события как прохождение болтового стыка, приведена на рис. 5, а и б соответственно.

Выбранный порог должен обеспечивать наилучшую комбинацию следующих условий:

- минимизация ошибок второго рода (FN) при максимальном значении верно определенных стыков данного типа (TP) для сочетания двух порогов;
- минимизация ошибок первого рода (FP), при которых неболтовой стык (дефект в сварном стыке) считается болтовым, а значит, выводится из алгоритма системы КИН (т.е. для дефекта не будут определены его параметры).

Таким образом, в диапазоне 1 первому условию удовлетворяют пороги $P_{\max}^{(1)}$ от 0,1 до 0,3. Второе условие ограничивает выбор порога $P_{\max}^{(1)}$ до 0,3, так как при таком значении уменьшается количество сварных стыков, ошибочно считающихся болтовыми.

ми. Одновременно с этим при выборе порога $P_{\min}^{(2)}$ во втором диапазоне равным 1 все болтовые стыки будут определены верно, но и все сварные будут идентифицированы как болтовые. Таким образом, чтобы удовлетворить второму условию, необходимо снизить пороговое значение $P_{\min}^{(2)}$ до 0,9.

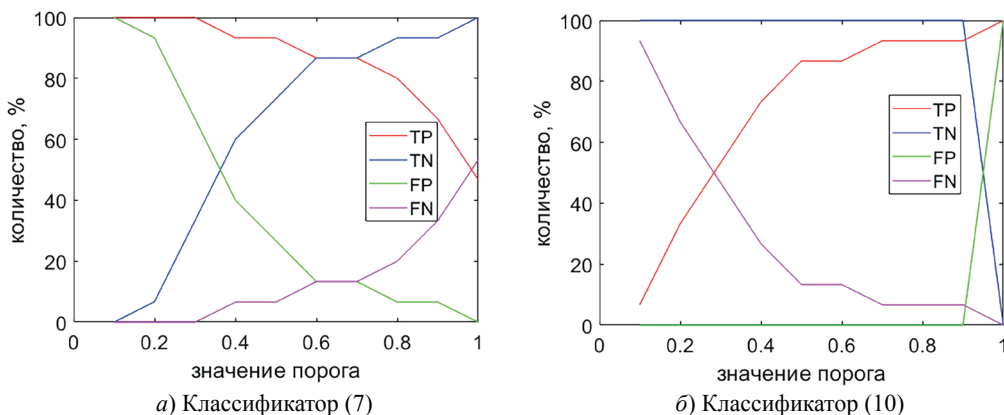


Рис. 5. Зависимости показателей качества от пороговых значений

Зависимость параметров TP, TN, FP, FN от значений порогов для бинарных классификаторов (8) и (9), распознающих событие как прохождение сварного стыка, приведена на рис. 6, а и б соответственно.

Воспользовавшись аналогичными предыдущему случаю критериями для бинарных классификаторов (8) и (9), получим наилучшие пороговые значения $P_{\min}^{(1)} = 0,6$ и $P_{\max}^{(2)} = 1,0$ соответственно.

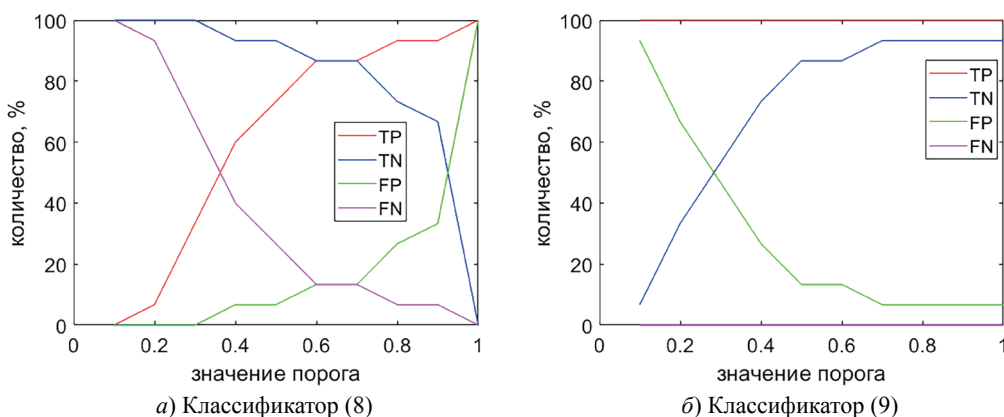


Рис. 6. Зависимости показателей качества от пороговых значений

Поскольку для каждой из групп событий существуют два бинарных классификатора и нет теоретических предпосылок отдать какому-то одному из них предпочтение, то можно считать их равноценными. Тогда итоговую классификацию следует осуществлять после объединения результатов предыдущих распределений событий по группам. Очевидно, что при этом результаты классификации могут не совпадать. Для таких случаев следует ввести 3-й вариант итоговой классификации – «тип стыка не определен» (u_3). Это поможет минимизировать ошибки: при правильном подборе пороговых значений и объединении результатов, полученных с помощью бинарных

классификаторов, через логическое «и» в группы u_1 , u_2 попадут только события, подходящие по всем критериям. Остальные попадут в группу u_3 , т.е. сохранят исходный признак U поступающих на вход классификатора данных. Схема итогового алгоритма классификации приведена на рис. 7.

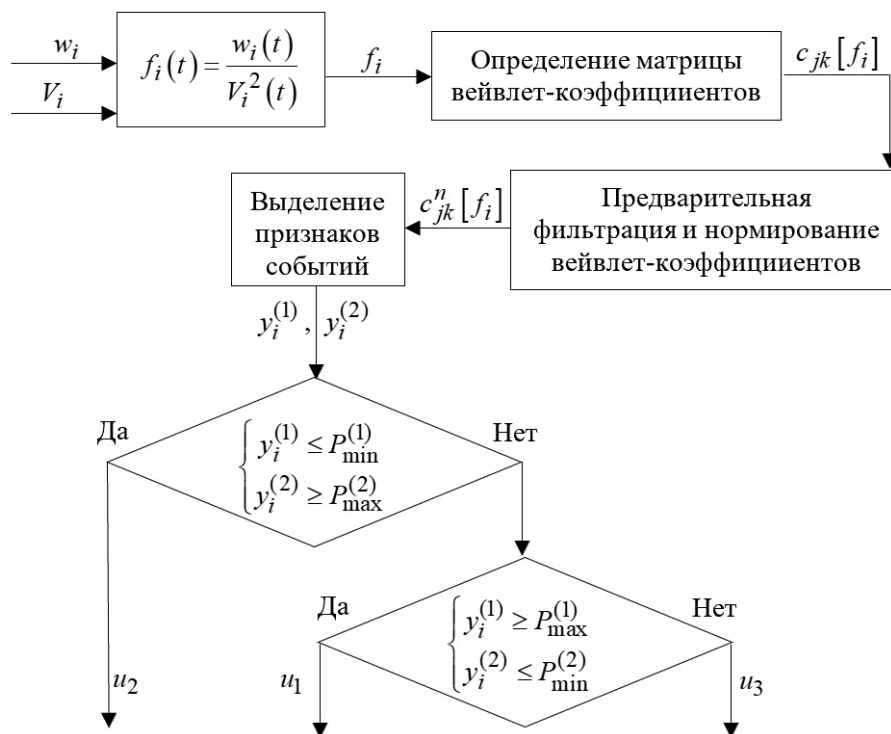


Рис. 7. Алгоритм классификации типа стыкового скрепления

Как и при определении дефекта, повторяемость при идентификации типа стыка по показаниям модулей, установленных на идущих друг за другом по одному рельсу колесах, служит подтверждением того, что тип стыка распознан правильно. В этом случае на выход алгоритма выдается этот тип, если же по показаниям модулей тип стыка оказывается разным, считается, что его определить невозможно (он попадает группу u_3).

Качество работы предложенного алгоритма оценивалось по сигналам группы 2. Был получен следующий результат:

- 1) 85% типов стыковых скреплений определено верно, 0% неверно и в 15% случаев тип стыка распознать не удалось;
- 2) можно отметить, что болтовые стыки идентифицируются лучше: 96% болтовых стыков выявлено верно, остальные не определены;
- 3) 24% сварных стыков не распознано.

Обратим внимание на отсутствие неверно определенных типов стыков, что является достоинством для работы всей системы КИН. Определение смятия в сварном стыке как болтового стыка означает, что этот участок пути классифицируется в качестве нормативного (так как болтовой стык не является дефектом поверхности катания рельса), а следовательно, для него не будут найдены параметры (глубина и длина), что снижает надежность системы. Обратная ситуация (с ложным выяв-

лением смятия в сварном стыке на месте болтового) не столь критична, поскольку дефект пропущен не будет (дать ложную тревогу лучше, чем не выявить дефект).

Сигналы на участках, где тип стыка определить не удалось, должны поступать на вход алгоритма определения параметров дефектов с соответствующей пометкой. Если система КИН работает в составе диагностического комплекса, то есть имеется возможность получить дополнительные данные о типе стыкового скрепления, то пометка снимается в соответствии с внешней информацией и данный участок выводится из обработки (в случае болтового стыка) или остается (в случае дефекта в сварном стыке). Если система КИН функционирует автономно, то на выходе алгоритма параметры такого дефекта будут иметь пометку о том, что тип стыка для данного случая не выявлен. Поскольку болтовые стыки значительно реже попадают в категорию «не распознано», то лишняя нагрузка на вычислитель (в части определения параметров дефектов) будет минимальна.

Что касается относительной вычислительной сложности предложенного алгоритма, то ее вклад в общую оперативность обработки данных обусловлен скоростью движения вагона и плотностью «подозрительных» участков, проходящих скрининг. При проезде тяжело нагруженных, а значит, и изношенных железнодорожных веток плотность таких участков достигает сотен на каждый километр пути. При текущей реализации алгоритма и скорости движения вагона в 70-80 км/ч это приводит к постоянному отставанию обработки данных от обследуемого участка пути. С технической точки зрения это нивелируется за счет промежуточной базы данных, размещенной на жестких дисках и, соответственно, позволяющей демпфировать любое реальное отставание. Последствия подобного отставания зависят от регламента работы сотрудников вагона и могут быть как допустимыми, так и недопустимыми. Успешность применения алгоритма в режиме реального времени связана с его оптимизацией в сочетании с более мощным аппаратным обеспечением.

Заключение

Рассмотренная в статье система контроля коротких и импульсных неровностей предназначена для выявления дефектов поверхностей катания рельсов и измерения их параметров инерциальным методом. Этот подход имеет значительные преимущества перед возможными альтернативами в силу высокой рабочей скорости, всепогодности, компактности измерительной системы. Однако его недостатком является сложность выделить в показаниях датчиков реакции на прохождение дефектов сварного шва и идентифицировать болтовые стыки на фоне других факторов, возникающих при взаимодействии колеса с рельсом. Чтобы решить эту проблему, предлагается предпринять ряд мер, таких как подбор места расположения и количества датчиков, их диапазонов измерения и полосы пропускания, а также алгоритма совместной обработки их показаний исходя из всех априори известных особенностей данной задачи. К последним относятся скорость движения вагона, диапазоны параметров контролируемых дефектов, особенности показаний инерциальных датчиков при прохождении наиболее распространенных элементов конструкции рельсового пути.

Построенная таким образом система КИН способна не только измерять параметры неровностей, но и распознавать, что именно проходит колесо – болтовой стык (не являющийся дефектом) или дефектный сварной стык. Это дает возможность ис-

пользовать систему автономно на различных железнодорожных подвижных средствах. Алгоритм определения типа стыкового скрепления основан на частотном анализе с применением непрерывного вейвлет-преобразования и позволяет локализовать во времени момент прохождения стыка колесом, чтобы анализировать только его. Частотный анализ показал, что прохождение сварного стыка характеризуется низкочастотными колебаниями в диапазоне 140–200 Гц, болтового – высокочастотными (1400–2400 Гц). В статье предложен алгоритм, суть которого заключается в классификации типа стыка на основе признаков интенсивности колебаний в этих диапазонах. Он построен на объединении четырех бинарных классификаторов с возможностью не классифицировать часть стыков, для которых не удалось получить надежное решение.

Разработанный алгоритм может применяться независимо от других систем вагона-дефектоскопа, а также при установке системы КИН на регулярно курсирующие поезда. Благодаря предложенному подходу в 85% случаях типы стыкового скрепления были идентифицированы верно, 15% стыков распознать не удалось, неверно определенные типы стыка отсутствуют.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ларионов Д.Ю., Подгорная Л.Н., Шалымов Р.В. Инерциальный метод диагностики пути в условиях его динамического взаимодействия с вагоном // Материалы докладов XIII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». Санкт-Петербург: ЦНИИ «Электроприбор», 2011. С. 357–364.
2. Lee, J., Choi, S., Kim, S., Kim, Y., Kim, S., and Park, C., Track condition monitoring by in-service trains: A comparison between axle-box and bogie accelerometers, *Railway Condition Monitoring and Non-Destructive Testing* (RCM 2011), 5th IET Conference on, 2011, pp. 1–6.
3. Heirich, O., Lehner, A., Robertson, P., and Strang, T., Measurement and analysis of train motion and railway track characteristics with inertial sensors, *IEEE Conf. Intell. Transp. Syst. Proc. ITSC*, 2011, pp. 1995–2000.
4. Schild, R.R. and Hinüber, E.V., Inertial Sensing and Mapping of Railway Track Properties, *DGON Inertial Sensors and Systems* (ISS), Braunschweig, Germany, 2023, pp. 1–17, doi: 10.1109/ISS58390.2023.10361906.
5. Большакова А.В., Боронахин А.М., Ларионов Д.Ю., Подгорная Л.Н., Ткаченко А.Н., Шалымов Р.В. Особенности испытаний и выбора микромеханических акселерометров для задачи диагностики рельсового пути // Материалы XXXII конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова. СПб., 2020. С. 105–107.
6. Марков А.А., Максимова Е.А. Анализ эффективности ультразвуковых и магнитных каналов дефектоскопических комплексов при контроле рельсов // Вестник ИЖГТУ имени М.Т. Калашникова. 2019. Т. 22. №2. С. 22–32. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-2-22-32.
7. Kanis, J., Zitrický, V., Hebelka, V., Lukáč, P., Kubín, M., Innovative Diagnostics of the Railway Track Superstructure, *Transportation Research Procedia*, 2021, vol. 53, pp. 138–145, doi: 10.1016/j.trpro.2021.02.017.
8. Bombarda, D., Vitetta, G.M., Ferrante, G., Rail Diagnostics Based on Ultrasonic Guided Waves: An Overview, *Applied Sciences*, 2021; 11(3):1071, doi: 10.3390/app11031071.
9. Кузьмин Е.В., Горбунов О.Е., Плотников П.О., Тюкин В.А. Эффективный алгоритм определения уровня полезных сигналов при расшифровке магнитных и вихретоковых дефектограмм // Моделирование и анализ информационных систем. 2018. Т. 25. № 4 (76). С. 382–387.
10. Намагничивающий узел мобильного рельсового дефектоскопа. Марков А.А., Антипов А.Г., Бовдей В.А. Патент на изобретение RU 2793187 С1, 29.03.2023. Заявка №2022124905 от 21.09.2022.
11. Устройство магнитной дефектоскопии рельсов. Марков А.А., Антипов А.Г. Патент на изобретение RU 2634806 С1, 03.11.2017. Заявка № 2016139182 от 05.10.2016.
12. Марков А.А., Кузнецова Е.А. Комплексный анализ состояния рельсового пути с помощью вагона-дефектоскопа с аппаратурой АВИКОН-03М // Радиоэлектронные комплексы многоцелевого

- назначения: сборник научных трудов. Юбилейный выпуск. 1991–2011. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. С. 59–71.
13. **Tsunashima, H., Naganuma, Y., Matsumoto, A., Mizuma, T., and Mori, H.**, Japanese railway condition monitoring of tracks using in-service vehicle, *Railway Condition Monitoring and Non-Destructive Testing* (RCM 2011), 5th IET Conference on, 2011, pp. 1–6.
 14. **Mori, H., Tsunashima, H., Kojima, T., Matsumoto, A., and Mizuma, T.**, Condition Monitoring of Railway Track Using in Service Vehicle, *J. Mech. Syst. Transp. Logist.*, 2010, vol. 3, no. 1, pp. 154–165.
 15. **Wei, X., Liu, F., and Jia, L.**, Urban rail track condition monitoring based on in-service vehicle acceleration measurements, *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, 2016, vol. 80, pp. 217–228.
 16. **Zhang, X., Jia, L., Wei, X., and Ru, N.**, Railway track condition monitoring based on acceleration measurements, *27th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, 2015, pp. 923–928.
 17. **Qin, L., Wei, D., and Sun, Y.B.**, Design of onboard device to diagnose track fault online, *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 483, pp. 465–470.
 18. **Tanaka, H., Matsumoto, M., and Harada, Y.**, Application of axle-box acceleration to track condition monitoring for rail corrugation management, *Railway Condition Monitoring* (RCM 2016), 7th IET Conference on, 2016, pp. 1–7.
 19. **Boronakhin, A.M., Larionov, D.Y., Podgornaya, L.N., Tkachenko, A.N., Shalymov, R.V.**, Detection and classification of rail track flaws using inertial and magnetometric sensors, *Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*, 2018, pp. 1066–1070.
 20. **Горелкин В.** Глаза и уши дороги // Гудок. 03.04.2019. Вып. 57 (26666). URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1458905&archive=2019.04.03> (дата обращения: 20.04.2024).
 21. **Boronahin, A.M., Filatov, Y.V., Larionov, D.Y., Podgornaya, L.N., Shalymov, R.V.**, Measurement system for railway track condition monitoring // *Proceedings of IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference*, 2015, pp. 155–158.
 22. **Большакова А.В., Боронахин А.М., Бохман Е.Д., Ларионов Д.Ю., Подгорная Л.Н., Ткаченко А.Н., Шалымов Р.В.** Возможности использования показаний инерциальных датчиков для выявления протяженных неровностей рельсов // XXIX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб., 2022. С. 208–211.
 23. **Большакова А.В., Боронахин А.М., Ларионов Д.Ю., Подгорная Л.Н., Ткаченко А.Н., Шалымов Р.В.** Анализ вибраций в системе «вагон – рельсовый путь» // Приборы. 2022. №1 (259). С. 46–51.
 24. **Boronakhin, A., Larionov, D., Podgornaya, L., Tkachenko, A., Shalymov, R.**, Inertial method of railway track diagnostics incorporating the condition of rolling surfaces of the railcar's wheels, *4th International Conference on Intelligent Transportation Engineering*, 2019, pp. 49–53.
 25. **Распоряжение ОАО «РЖД» № 2499р от 23.10.2014** «Об утверждении и введении в действие инструкции «Дефекты рельсов. Классификация, каталог и параметры дефектных и острodefектных рельсов».
 26. **Оппенгейм А., Шафер Р.** Цифровая обработка сигналов / пер. с англ. М.: Техносфера, 2006.
 27. **Малла С.** Вейвлеты в обработке сигналов / пер. с англ. М.: Мир, 2005.
 28. **Чун К.** Введение в вейвлеты / пер. с англ. М.: Мир, 2001.
 29. **Добешин И.** Десять лекций по вейвлетам / пер. с англ. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001.
 30. **Oreshko, N.I., Klionskiy, D.M.**, New Techniques for the Processing and Analysis of Telemetry and Trajectory Information on the Basis of Achievements in the Realm of Time-Frequency Analysis and Wavelet Theory, *Pattern Recognition and Image Analysis: Advances in Mathematical Theory and Applications*, 2011, vol. 21, no. 4, pp. 731–739.
 31. **Клионский Д.М., Орешко Н.И., Геппенер В.В.** Оценивание спектральной плотности телеметрических данных на основе теории вейвлетов // Цифровая обработка сигналов и ее применения: тез. докл. 13-й междунар. конф. DSPA'2011. М., 2011. С. 123–127.
 32. **Орешко Н.И., Геппенер В.В., Клионский Д.М.** Применение гармонических вейвлетов в задачах обработки осциллирующих сигналов // Цифровая обработка сигналов. 2012. №2. С. 6–15.

Bol'shakova, A.V., Boronakhin, A.M., Klionskii, D.M., Larionov, D.Yu., Podgornaya, L.N., Tkachenko, A.N., and Shalymov, R.V. (St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russia)
Railway Defects Detection Algorithm Based on Continuous Wavelet Transform and Frequency Domain Analysis, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2024, vol. 32. no. 3, pp. 86–104.

Abstract. The paper proposes an algorithm for detecting the railway defects by the readings of inertial sensors, taking into account the bolted joints passed. The mathematical tools used in this method include continuous wavelet transform and frequency domain analysis. The algorithm has been tested with an experimental data sample, and the efficiency of its application has been demonstrated.

Key words: inertial method of diagnostics, accelerometer, bolted joint, welded joint, continuous wavelet transform, wavelet scalogram, frequency domain analysis.

Материал поступил 11.03.2024