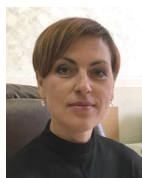


Критерии достоверности результатов диагностики буксовых узлов грузовых вагонов акустическими методами



А. С. Ададулов,
к. т. н., доцент,
заместитель
генерального директора
АО «ВНИИЖТ»



А. А. Романова,
к. т. н., доцент кафедры
«Вагоны и вагонное
хозяйство»
Петербургского
государственного
университета
путей сообщения
Императора
Александра I

Рассмотрены внешние факторы, влияющие на показания постов акустического контроля и развитие дефектов подшипников буксовых узлов грузовых вагонов. Приведены критерии оценки и учета влияния этих факторов на достоверность результатов диагностики акустическими методами.

С учетом насущных проблем ОАО «РЖД» по повышению безопасности движения поездов и мирового опыта с 2006 г. на сети внедряется так называемая «Система ранней диагностики подшипников на ходу поезда», где использован акустический подход к выявлению дефектов элементов подшипника буксового узла [7]. Акустический подход, основанный на рассмотрении колебательных явлений в механических конструкциях и в окру-

жающем пространстве как волнового процесса, универсален, так как базируется на закономерностях, общих для упругих волн в любой среде: твердой, жидкой или газообразной. В основе методов выявления дефектов механизмов лежит одна отправная диагностическая модель: развитие дефекта вызывает рост амплитуды и числа кратковременных импульсов в виброакустическом сигнале, вызванном колебаниями на вынужденных и собственных частотах механизма. Сегодня перед подходами к 22-м станциям установлены посты акустического контроля (ПАК) [8, 9, 10]. Для обнаружения дефектов используются две линейные микрофонные решетки, находящиеся на измерительном участке с обеих сторон железнодорожного пути. Каждая решетка включает шесть микрофонов, размещенных в защитных боксах. Расстояние между соседними микрофонами составляет 1,5 м, общий линейный размер решетки – 7,5 м [1,5, 6].

Суть технологии определения внешних факторов, влияющих на показания ПАК, в следующем: накапливались статистические данные звуковых сигнатур дефектных подшипников буксовых узлов грузовых вагонов при следовании их через посты по маршруту Хабаровск – Сорокино – Инская – Оверята – Лоста – Мга – Усть-Луга и дополнялись данными, полученными по запросу к автоматизированной системе оперативного управления перевозками, для идентификации вагонов, определения массы, пробега вагона и передачи совокупных данных в Комплексный диагностический центр (КДЦ).



Выявлены следующие факторы, влияющие на показания ПАК:

- скорость вагона;
- расстояние от буксового узла до микрофона;
- загрузка вагона;
- направление движения вагона;
- состояние поверхности катания колеса;
- букса с неисправным подшипником (влияет на показания буксы соседней оси тележки и противоположной буксы той же оси тележки);
- шум от срабатывания тормозной системы вагона;
- сетевые помехи.

В публикациях [2, 3] по акустическим исследованиям подшипников качения приведены данные о снижении значений амплитуды огибающих акустического сигнала с увеличением скорости вращения. Это утверждение основывается на том, что к приходу следующего импульса предыдущий импульс не затухает и накладывается своим окончанием на фронт следующего импульса. Такое наложение вызывает снижение коэффициента модуляции огибающей и, как следствие, амплитуды огибающей и ее спектра. Однако при рассмотрении сигналов ОТ необходимо понимать, что с увеличением частоты значения амплитуды огибающих возрастают.

Согласно результатам статистических исследований, проведенных на маршруте Хабаровск – Сорокино – Инская – Оверята – Лоста – Мга – Усть-Луга с помощью систем ПАК, наблюдается обратная зависимость, т. е. с увеличением скорости вращения колесной пары акустические импульсы неисправных подшипников становятся выше. Вследствие малых зазоров в подшипнике колебания наружного кольца затухают быстро, до начала следующего соударения, и огибающие импульсов не накладываются друг на друга. Поправка на скорость поезда рассчитывается и вносится программным обеспечением (ПО) ПАК при получении спектра огибающей.

Формула, по которой выполняется поправка, имеет следующий вид:

$$d_v = (45 - Vel_{mps} \times 3,6) \times 0,33,$$

где Vel_{mps} — скорость движения состава, м/с;
 d_v — поправка.

Далее выполняется перевод временной реализации — «сшивки» — в огибающую, линейная интерполяция полученных отсчетов, вычисление пяти спектров по

Таблица 1

Порожний вагон		Груженный вагон	
Скорость, км/ч	Амплитуда	Скорость, км/ч	Амплитуда
	1-й гармоники, Дб		1-й гармоники, Дб
65,1	68,5	65,6	73,5
60,9	68	62,5	77
56,7	67,2	53	81,5
49,2	69,3	51,3	78,5

выборкам с размером, равным обороту колеса, усреднение спектров, расчет поправки, коррекция спектра с учетом поправки. При выполнении линейной интерполяции шаг дискретизации вычисляется таким образом, чтобы число точек, кратное степени 2, соответствовало выборке равной 1,06 оборота колеса [8].

На участках, где устанавливался ПАК, конструктивное расположение соседних путей различалось, поэтому для каждого ПАК расстояние от микрофона до буксового узла было индивидуальное [9]. Расстояние от букс до микрофонов 1,5 м считалось стандартным, а отклонение от этого размера учитывалось с помощью масштабного коэффициента. Поправка на расстояние от буксового узла до микрофонов вносится ПО ПАК при масштабировании измерительной информации, полученной от микрофонов, одновременно с учетом чувствительности измерительного тракта (умножается на значение поправки). Отклонение от этого расстояния определяется следующим образом:

$$dR = L2 / 2,25,$$

где L — фактическое расстояние от буксового узла до микрофона;
 dR — поправка.

В таблице приведены результаты, полученные при полевых испытаниях порожнего и груженого вагона с дефектным подшипником при различных значениях скорости. Поправка на скорость введена. У порожнего вагона амплитуда, соответствующая 1-й гармонике в спектре дефектного подшипника, с изменением величины скорости остается постоянной, у груженого вагона с увеличением скорости убывает. Поправка вносится при отображении в базу данных (БД) методом линейной аппроксимации [4]. Алгоритм заложен в процедуре Correction.

В процессе мониторинговых наблюдений за неисправным подшипником может произойти изменение его адреса в вагоне (номера оси и стороны вагона). Чаще все-

го это связано с изменением направления движения вагона, а иногда с перестановками осей в процессе ремонта вагона. Из анализа данных следует, что не все неисправные подшипники сохраняют тенденцию изменения показаний ПАК при изменении направления вращения оси. Поэтому в БД необходимо хранить и анализировать диагностические данные отдельно для каждого направления движения вагона.

На рис. 1 показан график развития дефектов в одном вагоне по одной оси для разных направлений движения вагона (красным цветом выделен график развития для 3-й оси справа, синим — для 2-й оси слева).

При прохождении поста контроля колеса, имеющего на поверхности качения лыски, сколы, раковины и другие дефекты, возникают ударные акустические шумы, регистрируемые системой измерений ПАК. Амплитуда импульсов может достигать 90 дБА и более в зависимости от размеров повреждения колеса. Такие одиночные удары существенно влияют на диагностику подшипников, если не приняты меры по устранению указанного фактора.

На рис. 2 приведена исходная временная реализация, «сшитая» по шести микрофонам. Зелеными овалами выделены сигналы от удара дефектного колеса о рельс. Амплитуда сигнала от дефекта колеса превышает амплитуду импульсов от дефекта подшипника (выделенного желтым овалом) в два-три раза.

Также программное обеспечение ПАК анализирует спектр исходного сигнала на предмет наличия гармоник, соответствующих периоду вращения и гармоник, соответствующих дефектам элементов подшипника.

В зону измерения каждого микрофона одновременно попадают сигналы от двух соседних букс одной тележки, и при распаковке информации непонятно, какая именно букса имеет дефект.

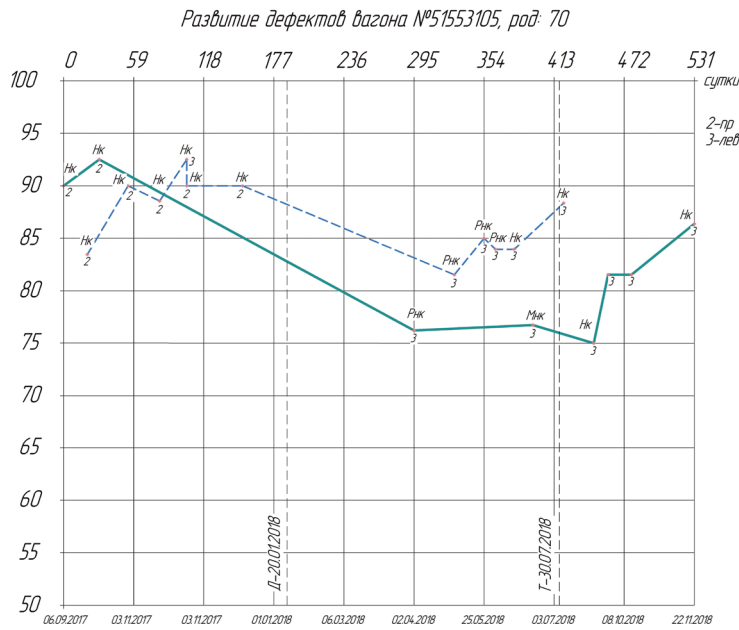


Рис. 1. Развитие дефектов в одном вагоне по одной оси для разных направлений движения вагона

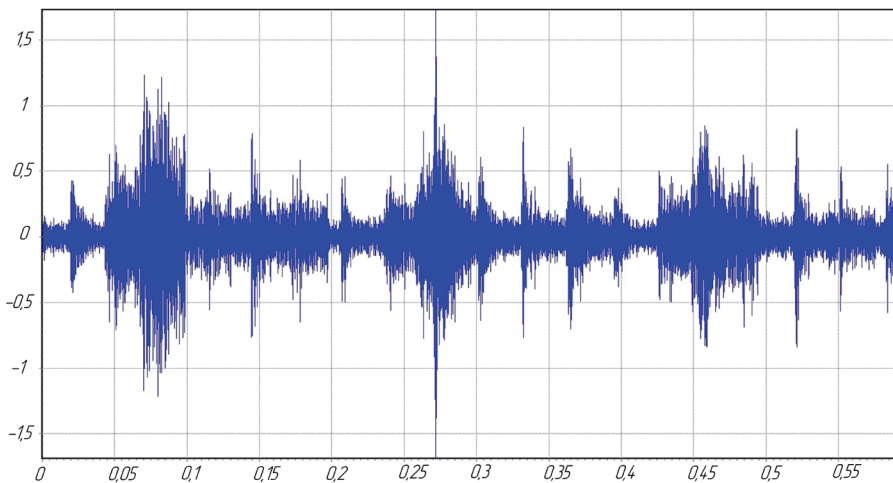


Рис. 2. Исходный сигнал от шести микрофонов поста акустического контроля

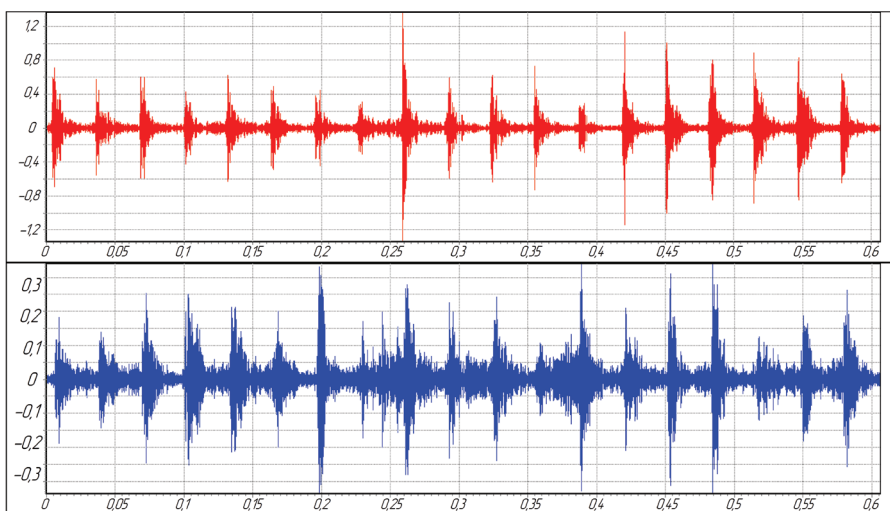


Рис. 3. Сигналы, зафиксированные постом акустического контроля от дефектной и недефектной осей вагона

На рис. 3 представлены исходные временные реализации по дефектной оси и соседней с ней недефектной, расположенной в той же тележке (красным цве-

том показаны сигналы от оси с дефектом; синим — сигналы от оси без дефекта). Как видно на рисунке, недефектную ось можно воспринять как ось с дефектом.

Сопоставление амплитуд гармоник, соответствующих дефекту из всех соседних осей, позволяет выбрать ось с дефектным подшипником. В процессе обработки информации на ПАК программа выбирает все оси состава, спектры которых подтверждают наличие дефекта, и сохраняет их в файле. После обработки данных выбирается ось с максимальными значениями амплитуд.

При шуме неисправной буксы порядка 90 дБА противоположная букса излучает шум примерно на 8–10 дБА ниже. После дополнительной обработки измерительной информации выявлена взаимная связь акустических процессов той и другой буксы.

Эта связь обусловлена передачей акустического шума с затуханием в 2,5–3 раза, появляющегося при неисправности подшипника, с одной буксы на другую по оси колесной пары. На рис. 4 представлены исходные временные реализации для буксовых узлов одной оси (красным цветом показаны сигналы дефектной буксы, синим — сигналы буксы без дефекта на противоположной стороне оси).

В случае внезапного торможения поезда при прохождении ПАК (случается при расположении поста вблизи станции) прижатые к колесу тормозные колодки создают характерный высокочастотный шум (свист). На рис. 5 приведены спектры сигналов со «свистом» тормозных колодок и без такового (красным цветом показан спектр сигнала при торможении вагона, синим — спектр сигнала без торможения). Пик сигнатур на частоте 15 кГц составляет 135 дБ и превышает уровень анализируемого сигнала на 60 дБ, т. е. в 1000 раз.

Процедура устранения влияния шума от срабатывания тормозной системы выполняется программой перед получением «сшивки» сигналов по микрофонам. На рис. 6, а) приведена временная реализация сигнала при помехе 50 Гц. Три импульса, идущие с частотой следования 20 мс (зеленый овал) при определенной скорости поезда воспринимаются как дефект внутреннего кольца или ролика кассетного подшипника.

Информация проверяется на наличие большого пикфактора по значениям, полученным от одного или нескольких микрофонов. При определении большого пикфактора и непопадания сигнала в диапазон (рис. 6, б) — входной сигнал превышает диапазон 100 Па; рис. 6, в) — выходной сигнал на участке в желтом овале меньше диапазона 0,1 Па) в протокол оператору ПТО выдается сообщение «Состояние оборудования ПАК: не-

исправно». Такая исходная информация запоминается и передается в КДЦ для анализа в ручном режиме с целью выявления неисправностей оборудования ПАК.

В период эксплуатации систем ПАК стали накапливаться данные по выкаткам колесных пар с актами расследований причин выкаток и фотографиями неисправностей подшипников. Принятая схема выкатки и удаления неисправных подшипников потребовала внесения некоторых корректировок в модель, описанную в статье [3]. Суть их заключается в новом представлении модели акустических сигналов развития контактно-усталостного повреждения и работы системы ПАК.

Если по оси абсцисс привести степень возрастания неисправности подшипника (условно), а по оси ординат — амплитудные показания системы ПАК, то получим эмпирическую функциональную зависимость (рис. 7). С началом эксплуатации подшипника в нагруженной точке на беговой дорожке кольца при контакте с телами качения подшипника происходят упругие деформации, которые с течением времени переходят в упруго-пластическую фазу, а затем в выраженную пластическую стадию развития.

На рис. 7 обозначим точку А началом пластических деформаций, при которых нарушаются геометрические размеры зоны контакта, образуется ямка, вокруг нее формируется область пластических сдвигов, способствующих началу выкрашивания металла. Появляются акустические сигналы, но они не выделяются системой ПАК вследствие высоких внешних шумов. В результате выкрашивания металла образуется узкая раковина, увеличивающаяся в длину и в глубину. Ее рост сопровождается пропорциональным возрастанием амплитуды акустических сигналов. При превышении амплитуды этих сигналов уровня внешнего шума срабатывает программа диагностики и ПАК выдает информацию о повреждении подшипника. На рис. 7 показано, что это происходит при амплитуде около 70 дБА. Этот уровень, как было сказано раньше, принят как уровень тревоги Т0 (точка В). Далее продолжается формирование усталостной раковины, к 80 дБА ее длина становится равной трети ширины беговой дорожки. Уровень 80 дБА принят за уровень тревоги Т1, сигнализирующий об уверенном обнаружении повреждения подшипника (точка С).

Рост раковины выкрашивания продолжается в длину и в глубину, показания

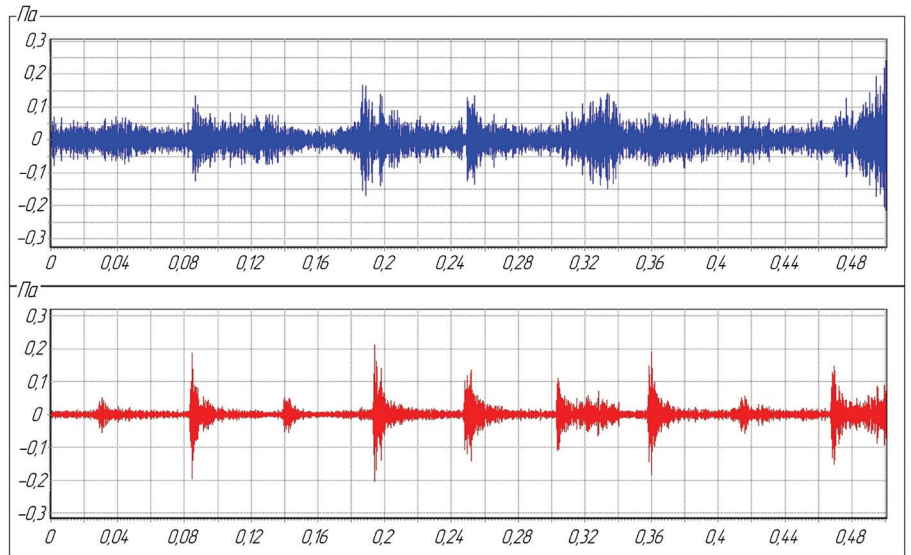


Рис. 4. Сигналы, зафиксированные постом акустического контроля от оси с дефектом в буксе справа и недефектной буксы слева

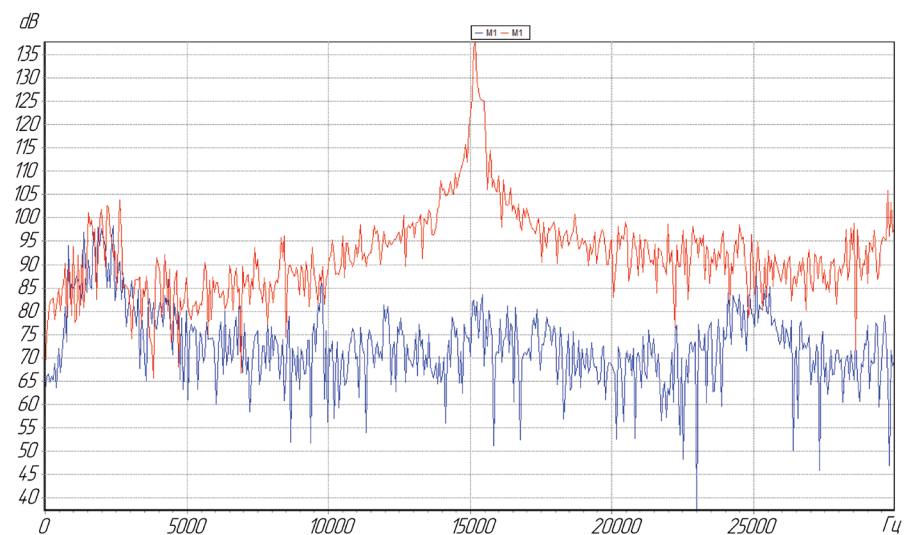


Рис. 5. Сигнал, зафиксированный постом акустического контроля при торможении вагона и без торможения

ПАК также пропорционально возрастают, и при амплитуде приблизительно 90 дБА раковина полностью пересекает дорожку качения. Показания ПАК могут продолжать возрастать, достигая максимальных значений 95 дБА и более. Повреждение приобретает форму неглубокой узкой борозды с ровными острыми кромками, пересекающей дорожку качения по всей ширине (точка D).

Дальнейшее углубление раковины приостанавливается, так как пластическая зона с полями скольжения переносится на соседние с раковиной участки слева. Повреждение развивается вследствие скалывания и выкрашивания на боковых поверхностях раковины. Увеличивается ширина раковины, и вследствие этого уменьшаются значения амплитуды акустических сигналов. Если не будут образовываться новые раковины, то при амплитудах акустического сигнала, близ-

ких к начальному уровню срабатывания ПАК, контроль неисправного подшипника прекратится (точка F). Это может привести к серьезным последствиям, так как на дорожке качения скапливаются обломки металла, усиливается трение, подшипник переходит в состояние деградации и отказа.

Следует обратить внимание, что часть неисправных подшипников, если показания ПАК не достигли уровня 90 дБА, не удаляется, хотя их состояние в перспективе может серьезно ухудшаться, как и у тех подшипников, которые вышли из зоны контроля (участок F–G). Следует отметить, что неисправные подшипники, объединенные в группу средней степени неисправности, должны быть разделены по степени опасности на две части. Одна, менее опасная, должна находиться в левой части графика до пересечения функцией уровня Т2 в зоне С–D, а другая,

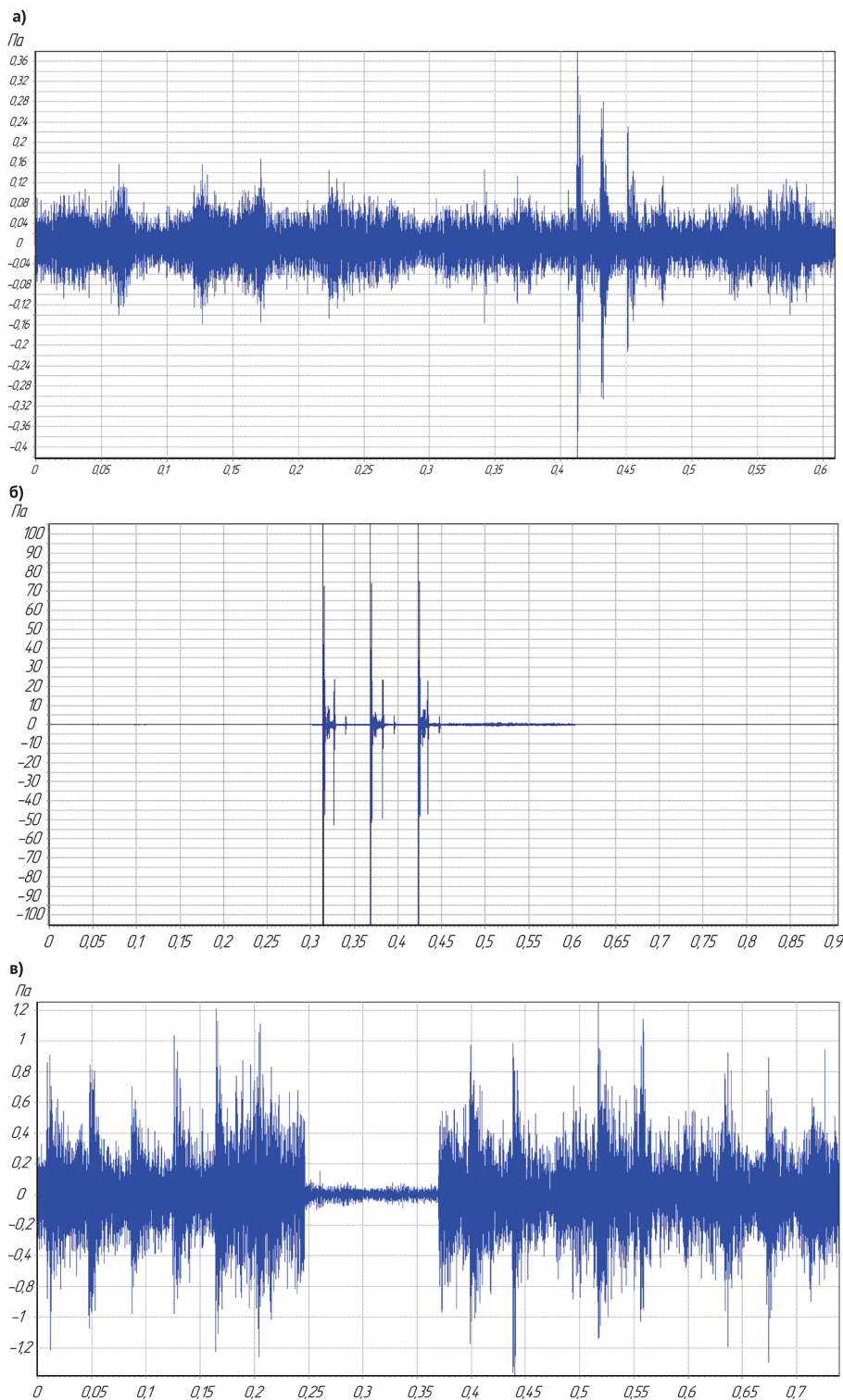


Рис. 6. Сигналы, зафиксированные постом акустического контроля (а–в) при неисправном оборудовании

более опасная — в правой части графика справа от пересечения границы T2 в области D–E, примыкающей к зоне самых опасных подшипников E–F.

В заключение отметим, что полученные результаты позволяют перейти к этапу разработки алгоритмов по выявлению тенденций, архитектуры программных средств и ПО для встраивания в прогностические системы Дирекции инфраструктуры в рамках проекта «Цифровая железная дорога».

Литература

1. Ададулов А. С., Тюпин С. В., Лапин А. М. Техническая диагностика колесных пар: выявление дефектов поверхности катания посредством анализа акустических сигналов // Техн. жел. дорог. 2014. № 1 (25). С. 52–61.
2. Papaelis M., Amini A., Huang Z. et al. Online condition monitoring of rolling stock wheels and axle bearings // Proceed. Inst. Mech. Eng. P. F. J. Rail Rapid Transit. p. 0954409714559758/ 2014.

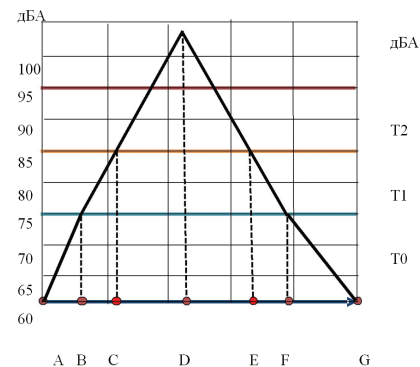


Рис. 7. Функциональная взаимосвязь показаний системы поста акустического контроля с развитием контактно-усталостного повреждения подшипника

3. Amini A. Won 3rd award poster Presentation «Online condition monitoring of railway wheelsets» at BLUEBEAR 2014 conference. December 2014. Birmingham, UK.
4. Ададулов А. С. Алгоритмы идентификации сигналов дефектного буксового узла постовой системы ранней диагностики // Транспорт РФ. 2018. № 5 (78). С. 58–62.
5. А. Ф. Комиссаров, К. В. Григорьев, Автоматизированный диагностический комплекс для измерения геометрических параметров колесных пар. Вагоны и вагонное хозяйство, 2011, № 3 (27). С. 14–15.
6. Л. Н. Степанова, С. А. Бехер, А. С. Кочетков. Особенности использования быстродействующей тензометрии для контроля колес грузовых вагонов в движении. Вестник РГУПС, 2010, № 2. С. 53–57.
7. Е. А. Орлик. Акустический метод контроля состояния буксовых узлов железнодорожного подвижного состава. Проблемы механики современных машин, 2012. С. 1–3.
8. А. С. Ададулов. Алгоритмы идентификации сигналов дефектного буксового узла постовой системы ранней диагностики. Транспортное машиностроение. 2018. № 5. С. 58–62.
9. А. Л. Куценко, Ю. В. Савич, Д. С. Слущкий. Акустический тракт постовой системы ранней диагностики буксовых подшипников для обеспечения экологической безопасности движущихся поездов. Известия ЮФУ. 2009. № 7. С. 41–49.
10. В. И. Поддубняк, И. Д. Борзилов, В. М. Петухов. Технология диагностики букс на ходу поезда с использованием радиодатчиков. Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта, 2006. № 7. С. 58–61.