

Газы, анализ которых в промышленности осуществляется с использованием методов абсорбционной спектроскопии, перечислены в таблице.

Основные газы, анализируемые с помощью оптических излучений

Длина волны, нм		Рентгеновское излучение $10^{-2} \div 10$	УФ $10 \div 5 \cdot 10^2$	Видимое $5 \cdot 10^2 \div 8 \cdot 10^2$	ИК $8 \cdot 10^2 \div 10^6$
Основные анализируемые газы		H ₂ S, газобразные кислоты	O ₂ , O ₃ , SO ₂ , NH ₃ , Hg	Cl ₂ , ClO ₂ , NO _x , H ₂ O	H ₂ O, CO, CO ₂ , NO, N ₂ O, NH ₃ , SO ₂ , SO ₃ , алканы, алкены
Область концентраций	Следовые количества	—	NH ₃ , SO ₂ , O ₃ , Hg	+	+
	Высокие концентрации	+	O ₃ , SO ₂	+	+

Основные требования, предъявляемые датчику при проведении анализа углерода:

- высокое быстродействие;
- низкий уровень собственных шумов;
- высокая чувствительность;
- небольшой размер детектора.

Дисперсионные, или «монокроматизирующие», приборы используются для контроля процессов в промышленности очень редко; обычно используют недисперсионные приборы, т. е. приборы без спектрального разложения. Хотя селективность этих приборов ниже, однако при промышленном исполь-

зовании они имеют ряд преимуществ: лучшая чувствительность, простота, надежность и меньшие эксплуатационные расходы. Для того чтобы устранить или учесть источники ошибок, указанные выше, наряду с другими неконтролируемыми факторами, такими, как изменение интенсивности излучения, изменение чувствительности детектора или загрязнение окон датчика, обычно используются приборы, работающие по двухлучевой схеме.

Излучение от инфракрасной лампы (ИЛ) направляется на измерительную кювету (ИК), через которую продувается анализируемая газовая смесь. Кювета закрыта окнами, прозрачными для излучения (LiF, кварц, слюда, CaF₂ и др.). На выходе кюветы стоит двухканальный пироэлектрический детектор. Каждый канал детектора имеет свой фильтр, один, соответствующей пику поглощения для анализируемого газа (в данном случае CO₂), и другой – отвечающей минимальному поглощению (последняя принята в качестве линии сравнения).

В настоящее время данная схема оптического датчика реализована в анализаторе углерода и серы МЕТЭК-200 производства ООО «МЕТЭКПРОМ» (Ижевск) для определения общего углерода и графита в углеродистой стали и нелегированном чугуне, при массовой доле углерода и графита от 0,01 до 5,0 %. Погрешность результата анализа (при доверительной вероятности 0,95) не превышает пределов, указанных в ГОСТ 22536.1–88.

T. N. Lebedeva, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Optical Sensors to Determine the Total Carbon in Carbon Steel and Unalloyed Cast Iron

This article discusses application of optical sensors to determine the carbon in steels and cast iron. The design of the sensor with account of technical requirements is described.

Keywords: optical sensors, gas analyzer, carbon steel

Получено: 03.04.13

УДК 004.93, 004.85

А. С. Менлитдинов, магистрант;

М. А. Барков, магистрант;

А. В. Коробейников, кандидат технических наук, доцент

Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

**АЛГОРИТМ АНАЛИЗА СЕРДЕЧНЫХ АРИТМИЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛИНГВИСТИЧЕСКОГО И СЕКВЕНЦИАЛЬНОГО АНАЛИЗА
И АЛГОРИТМА КЛАСТЕРИЗАЦИИ COBWEB**

Рассмотрены алгоритмы анализа сердечных аритмий начиная с разбиения сигнала электрокардиограммы (ЭКГ) на циклы и заканчивая формированием последовательности типов аритмий. Предлагается построение словаря аритмий на основе секвенциального анализа последовательности кода ритма сигнала ЭКГ, а затем на его основе предлагается использовать алгоритм лингвистического анализа для классификации типа аритмии. Предлагается использовать модификацию алгоритма концептуальной кластеризации Cobweb для сигналов QRS-комплексов ЭКГ. Приведен пример анализа фрагмента записи сигнала ЭКГ.

Ключевые слова: сердечные аритмии, лингвистический анализ, алгоритм кластеризации Cobweb, секвенциальный анализ

Электрокардиография (ЭКГ) – один из важнейших методов диагностики заболеваний сердца. ЭКГ отражает электрическую активность сердца. Развитие вычислительной техники позволяет большую часть анализа сигнала ЭКГ (ЭКС) выполнять автоматически. Одной из общепринятых методик анализа ЭКС является анализ аритмий: определение факта возникновения нарушения сердечного ритма и классификация этого нарушения [1]. При анализе ЭКС, записанного кардиографом, анализ аритмий не производится из-за малой длины записи (несколько секунд). При более длительной записи ЭКС ручной поиск аритмий оказывается затруднен. Поэтому анализ нарушений ритма является важной задачей автоматизации. Данный анализ выполняется в мониторах безопасности, при анализе записей ЭКС суточных мониторов, в стресс-системах [2]. Суточная запись ЭКС содержит около 100 тысяч кардиоциклов. В этом объеме кардиоциклов необходимо детектировать и классифицировать единичные нарушения ритма при наличии помех и артефактов.

На рис. 1 представлена структура подсистемы анализа аритмий, содержащая основные этапы анализа аритмий по ЭКС: 1) разбиение ЭКС на кардиоциклы; 2) кластеризация *QRS*-комплексов; 3) построение кода ЭКС; 4) построение словаря аритмий; 5) лингвистический анализ кода ЭКС.

Для разработки алгоритмов анализа необходимо описать математическую модель, адекватную множеству реальных ЭКС. На рис. 2 представлен фрагмент типичного ЭКС.

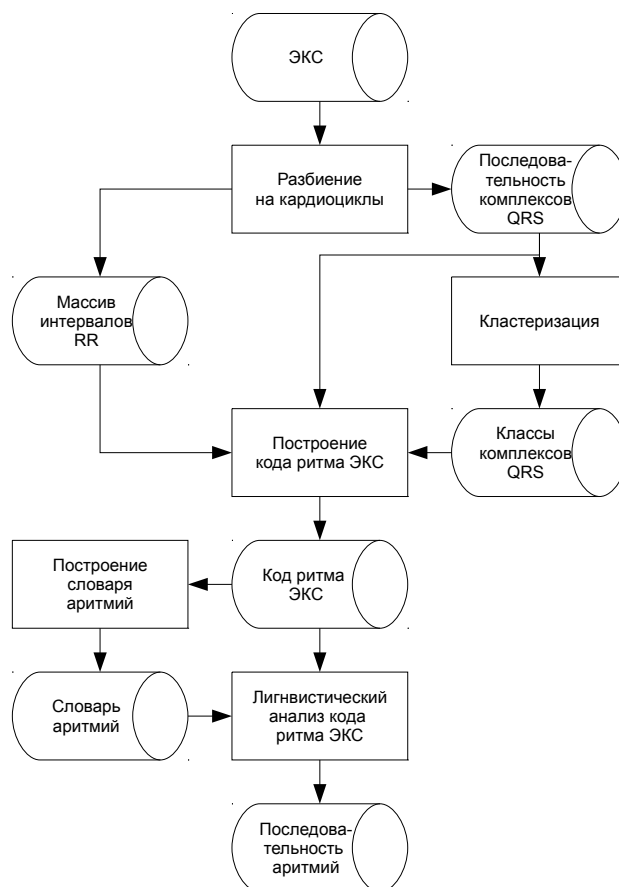


Рис. 1. Структура подсистемы анализа аритмий



Рис. 2. Пример ЭКС

ЭКГ является результатом прохождения электрических импульсов, вызывающих сердечное сокращение, через ткани сердца. Импульсы следуют с определенной периодичностью, и каждый период импульсов имеет характерный вид. Единичный период импульсов называют кардиоциклом, сердечным циклом (рис. 3). Каждый кардиоцикл состоит из нескольких характерных участков, которые условно называют зубцами или сегментами.

В кардиологии приняты следующие названия зубцов: *P*, *Q*, *R*, *S*, *T*, *U*. Зубцы *Q*, *R*, *S* объединяют в *QRS*-комплекс, так как они по времени следуют близко и часто накладываются. *QRS*-комплекс является основным сегментом при оценке деятельности сердца, так как он наиболее выражен среди всех эле-

ментов кардиоцикла. Сегмент *U*, как правило, слабо проявлен на ЭКС.

Степень периодичности следования кардиоциклов (рис. 4) характеризуется ритмом ЭКС и частотой сердечных сокращений (ЧСС). Длительность кардиоцикла измеряется как расстояние между вершинами двух соседних зубцов *R* (*RR*-интервал). ЧСС может меняться на реальных сигналах в пределах 20...300 циклов в минуту. При нормальном (синусовом) ритме длительность соседних *RR*-интервалов отличается не более чем на 20 %. В случае нарушения ритма сердца соотношение *RR*-интервалов может иметь сложный характер [1]. В сложных случаях может нарушаться не только ритм следования кар-

диоциклов, но и ритмы появления отдельных зубцов могут быть различны [1]. На реальных ЭКС присутствуют шумы, сетевая наводка и артефакты.

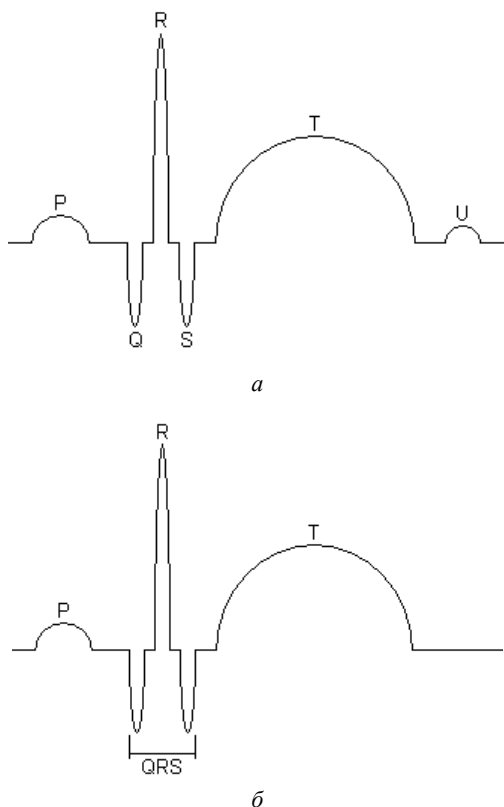


Рис. 3. Кардиоцикл ЭКС

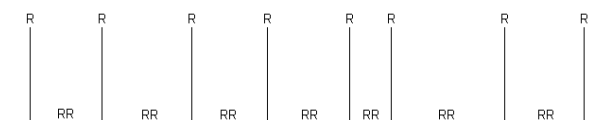


Рис. 4. Ритм ЭКС

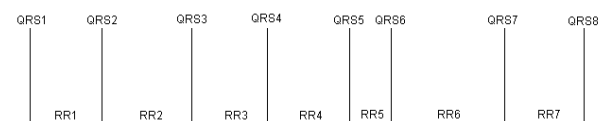


Рис. 5. Кодирование ритма ЭКС

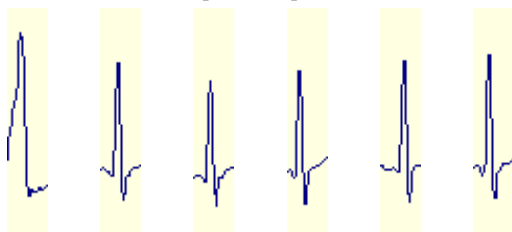


Рис. 6. Пример сигналов QRS-комплексов

Разбиение на кардиоциклы

На вход разбиения ЭКС на кардиоциклы поступает дискретный ЭКС, прошедший этап фильтрации от шумов. В результате разбиения ЭКС получают последовательность QRS-комплексов и длительностей

RR-интервалов. Данный этап является основным при автоматической обработке ЭКС и достаточен для простых систем, где ведется лишь подсчет ЧСС [2]. Подробно алгоритм разбиения на кардиоциклы представлен в [3].

Кластеризация QRS-комплексов

Для решения задачи классификации сигнала QRS-комплекса (отнесение к одному из классов: «норма», «нарушение») необходимо выполнить обучение подсистемы анализа аритмий.

При решении задачи классификации возможны два подхода: 1) классификация на основе всего массива классов QRS-комплексов, встречающихся в клинической практике; 2) классификация на основе только классов QRS-комплексов данной записи ЭКС. Автоматическая классификация по всем сигналам в клинической практике затруднена по причине большого разнообразия QRS-комплексов, снятых у разных пациентов, в разных условиях шумов и артефактов, при разных способах наложения датчиков (отведениях) [1].

Поэтому в данной работе предлагается анализировать только комплексы QRS текущей записи. При этом объем записи должен быть значительным, что выполняется в случае анализа суточного ЭКС.

Для обучения подсистемы анализа аритмий необходимо выполнить кластеризацию (разбиение на классы) всех сигналов QRS-комплексов в записи ЭКС. Для кластеризации сигналов QRS-комплексов в данной работе предлагается использовать алгоритм концептуальной кластеризации *Cobweb*, модифицированный для работы с количественными данными, предложенный в работе [4].

В результате кластеризации QRS-комплексов исходное множество комплексов записи ЭКС разбивается на несколько групп (кластеров, классов). Таким образом, при этом решается и задача классификации каждого отдельного QRS-комплекса для данной записи ЭКС.

Отнесение каждого кластера QRS-комплексов к типу «норма», «нарушение» может производиться автоматически или с возможностью ручной коррекции.

Кодирование ритма

На ЭКС аритмии проявляются в основном в виде характерных изменений последовательности RR-интервалов и формы QRS-комплексов, поэтому эти признаки должны учитываться алгоритмом анализа.

В результате кодирования ритма ЭКС представляется в виде цепочки:

$$M_1 - Z_1 - M_2 - Z_2 - M_3 - Z_3 - \dots - M_i - Z_i - M_{i+1}, \quad (1)$$

где M_i – номер класса QRS-комплекса (минимальный набор классов $M_i \in \{a, b\}$: a – «норма»; b – «нарушение»); Z_i – номер класса длительности интервала RR.

Для обозначения класса формы QRS-комплекса берут результаты работы алгоритма разбиения на кардиоциклы и кластеризации QRS-комплексов. Ка-

ждый *QRS*-комплекс заменим на соответствующий его форме номер класса M_i .

Для оценки относительной длительности интервала вычисляется D_i – отношение длительностей соседних интервалов:

$$D_i = T(RR_i) / T(RR_{i+1}). \quad (2)$$

Отношение D_i квантуется на несколько классов Z_i : 1) $Z_i = 1, D_i \geq 1,2$; 2) $Z_i = 2, 1,2 > D_i \geq 1,1$; 3) $Z_i = 3, 1,1 > D_i \geq 0,9$; 4) $Z_i = 4, 0,9 > D_i \geq 0,8$; 5) $Z_i = 5, 0,8 > D_i$. В итоге получим: $Z_i \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$; $\{2, 3, 4\}$ – «норма» (N); $\{1, 5\}$ – «нарушение» (K – короткий, D – длинный).

По полученным классам *RR*-интервалов и связанным с ними классам формы *QRS*-комплекса производится запись всей последовательности ЭКС в алфавите этих классов, как это представлено в формуле (1). Полученная запись ЭКС отражает динамику всех его существенных изменений и служит для выявления характерных нарушений ритма.

Построение словаря аритмий

Возможные источники словаря аритмий:

1. Логические формулы нарушений ритма на основе данных из кардиологической практики. Пример для одиночной наджелудочковой экстрасистолы [6]:

$$S_1 = (Z_1 = a) \text{ and } (Z_2 = 5) \text{ and } (M_1 = a) \text{ and } (M_2 = a) \text{ and } (M_3 = a)$$

2. Построение словаря на основе секвенциального анализа кода ритма ЭКС текущие записи. Методика описана в работах [7, 8]. Задача рассматривается как составление словаря по фрагменту текста на неизвестном языке с заданным алфавитом. Необходимо предусмотреть возможность ручной коррекции словаря.

В данной работе используется второй подход.

Лингвистический анализ кода ритма

Распознавание аритмий на данном этапе сводится к задаче разбиения текста на слова в соответствии с заданным словарем. Анализируемый текст может содержать ошибки в словах. Методика предложена в работе [9] и практически проверена на коде ритма ЭКС в работе [10]. В результате последовательность букв кода ритма ЭКС преобразуется в последовательность кодов аритмий (слов) согласно словарю аритмий.

Результаты экспериментов

В экспериментах использовалась запись ЭКС, содержащая 4 153 *QRS*-комплексов.

Пример разделения сигналов *QRS*-комплексов приведен на рис. 7.

Результаты кластеризации сигналов *QRS*-комплексов представлены в табл. 1. Только кластер 1 представляет нормальную форму *QRS*-комплексов.

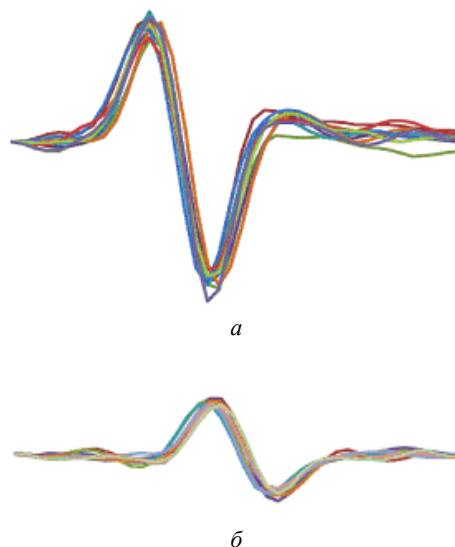


Рис. 7. Пример сигналов, вошедших в кластеры *QRS*-комплексов

Таблица 1. Результаты кластеризации сигналов *QRS*-комплексов

№	Количество	Процент	Форма комплекса	Усредненный сигнал
1	2767	66,63%	a (n_1)	
2	1178	28,37%	b ₁ (an_1)	
3	153	3,68%	b ₂ (an_2)	
4	55	1,32%	b ₃ (an_3)	прочие

Затем был выполнен этап кодирования ритма ЭКС по формуле (1). Пример фрагмента кода ритма ЭКС ($M_i \in \{a, b\}$; $Z_i \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$):

a3a3a3a3b1a5a3a3a3b1a5a3a3a3b1a5b3a3a3b1a5a3a3b1a5a3a3b1a5

Результаты этапа построения словаря аритмий представлены в табл. 2. Эвристика E_{3210} характеризует стабильность связей букв слова по всему массиву текста. Эвристика вычисляется как произведение условных вероятностей появления букв слова, подробнее в работе [7]. В табл. 2 представлены только слова с эвристикой $E_{3210} > 0,5$. Фрагментам ритма без нарушений соответствуют слова словаря S_{85} и S_{56} .

На следующем этапе выполнялся лингвистический анализ кода ритма ЭКС (текста) на основе известного словаря (табл. 2) согласно методике, предложенной в работе [10]. В результате получена последовательность кодов аритмий, представляющих все события ритма в исходном ЭКГ: участки нормального ритма и нарушения ритма. Пример фрагмента кода аритмий ЭКС, в скобках указано число исправленных в коде ритма несоответствий возможному слову:

Код слова	Буквы слова	Эвристика E_{3210}
S ₉₇	b1a3	0,717
S ₈₅	a3a3	0,713
S ₄₄	1a3a	0,688
S ₆₈	5a3a	0,667
S ₅₆	3a3a	0,633
S ₆₀	3b1a	0,627
S ₁₀₃	b3a3	0,586
S ₄₆	1a5a	0,571
S ₄₅	1a3b	0,566
S ₇₂	5b1a	0,565
S ₉₁	a5a3	0,561
S ₈₇	a3b1	0,554
S ₇₀	5a5a	0,553
S ₆₉	5a3b	0,549
S ₅₈	3a5a	0,525
S ₅₇	3a3b	0,521
S ₄₈	1b1a	0,505

[illegible]

5. Внешний вид средних сигналов *QRS*-комплексов и их процент в общем объеме комплексов (табл. 1) показывают наличие ошибок при кластеризации. Кластеризация самих сигналов *QRS*-комплексов при изменении их амплитуды в процессе

11. Коробейников А. В. Распознавание образов при анализе формы электрокардиограммы // Математическое моделирование и интеллектуальные системы : темат. сб. науч. тр. / Ин-т экономики Урал. отд-ния РАН. – Екатеринбург : Издвекс, 2004. – № 1. – С. 45–53. – URL: http://files.izhteled.ru/articles/2004_article_2_blogs_izhteled.ru_kav.pdf (дата обращения: 16.05.2013).

A. V. Korobeynikov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Algorithm of cardiac arrhythmias analysis using the linguistic and sequential analysis and COBWEB clustering algorithm

The paper considers cardiac arrhythmias analysis algorithms beginning from electrocardiogram (ECG) signal splitting into cycles up to generation of the sequence of arrhythmias types. It is proposed to create the arrhythmias dictionary basing on sequential analysis of ECG signal rhythm code sequence. After that it is offered to use the linguistic analysis algorithm for classification of arrhythmia type. It is proposed to apply the modification of Cobweb conceptual clustering algorithm for ECG signals QRS complexes. The example of the analysis of ECG signal record fragment is given.

Keywords: cardiac arrhythmias, linguistic analysis, sequential analysis, Cobweb clustering algorithm

Получено: 11.04.13

УДК 620.17:658.56

В. В. Муравьев, доктор технических наук, профессор
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ СТЕНДОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ ТЕЛЕЖЕК ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ*

Приводятся результаты десятилетней эксплуатации акустико-эмиссионных стендов для неразрушающего контроля литых деталей грузовых вагонов. Доказывается малоцикловый механизм развития трещин в боковых рамах нового изготовления при наличии концентраторов напряжений заданных размеров. Обосновывается эффективность использования стендов для выявления трещин на ранней стадии эксплуатации боковых рам в связи с большим количеством металлургических дефектов, не обнаруженных на заводах-изготовителях.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, усталость, изломы боковых рам грузовых вагонов, ресурс

Введение

На сети железных дорог России к 2001 году сложилось критическое положение с литыми элементами тележек грузовых вагонов, вызванное острой нехваткой новых деталей из-за снижения их выпуска металлургическими заводами. Такая ситуация сложилось вследствие резкого падения производства на металлургических заводах в 1990-е годы. Речь идет о боковых рамах и надрессорных балках тележки модели 18-100, нормативный срок службы которых составляет 30 лет. Департамент вагонного хозяйства ОАО «РЖД» принял решение о продлении срока службы по результатам индивидуальных испытаний каждой детали с истекшим сроком эксплуатации.

Основой методики продления срока службы явился метод акустической эмиссии (АЭ), дополняющий магнитные методы. Основанием для внедрения метода АЭ послужили исследования [1–8], проведенные в Сибирском государственном университете путей сообщения (СГУПС) в 1994–1999 гг. под руководством автора. Сравнительные испытания метода АЭ с электромагнитными методами неразрушающего контроля в вагонном депо Нижнеудинск (2001 г.) показали его значительно более высокую вероятность обнаружения дефектов по сравнению с феррозондовым и особенно вихретоковым методами.

В настоящее время более 110 вагонных ремонтных депо оснащены АЭ-стендами, разработанными двумя коллективами: СГУПС совместно с Сибирским НИИ авиации (СЦАД-16) [1, 2, 5, 9, 10] и ПКБ ЦВ ОАО «РЖД» совместно с ООО «Интерюнис»

(А-Line). Общая концепция продления срока службы боковых рам тележек грузовых вагонов модели 18-100 методом АЭ производится в настоящее время по утвержденному технологическому процессу в соответствии с методикой № 682-2005 ПКБ ЦВ. Методика продления срока службы литых деталей внедрена во всех железнодорожных администрациях, входящих в состав СНГ. Разработка и использование метода АЭ для других объектов железнодорожного транспорта подтвердили его эффективность [11–17].

По результатам АЭ-диагностики к 2012 г. продлен срок службы более 700 000 боковым рамам и около 200 000 надрессорным балкам с 30 лет до 38 лет полезного использования. Ни одна из деталей с продленным сроком службы после АЭ-контроля не отказала в процессе эксплуатации. За время эксплуатации АЭ-стендов в вагонных ремонтных депо реальная экономия от продления срока службы литых деталей грузовых вагонов составила более 12 млрд руб.

Статистика изломов и крушений

Однако, начиная с 2006 г., происходит резкое увеличение числа сходов и крушений из-за изломов боковых рам. В основном ломаются боковые рамы коробчатого сечения нового изготовления. Качество литых деталей с каждым годом ухудшается, что подтверждается статистикой изломов боковых рам тележки грузовых вагонов в движении на рис. 1, а. Большинство изломов боковых рам в пути следования с гарантийным сроком эксплуатации до 5 лет приходится на первые 2–3 года эксплуатации (рис.1, б).