Использование «утерянной» информации для совершенствования систем обработки сигналов в ультразвуковой дефектоскопии рельсов

За прошедшее десятилетие все средства сплошного контроля рельсов (ультразвуковые дефектоскопные тележки, автомотрисы и вагоны-дефектоскопы), действующие на российских железных дорогах, были оснащены системами сплошной регистрации дефектоскопической информации. При этом результаты контроля по каждому ультразвуковому каналу отображаются на пространственно-временной координате – на, так называемой, развертке типа В [1].

При использовании развертки типа В как в отечественных, так и в зарубежных системах дефектоскопии рельсов анализ (расшифровка) сигналов контроля в основном производится оператором («вручную»). Наиболее ответственная процедура технологии неразрушающего контроля рельсов – анализ результатов контроля выполняется специально обученными работниками дистанции пути или инженерами центров расшифровки Дирекций инфраструктуры железных дорог. Анализ зарегистрированных дефектограмм требует от оператора знания обширного теоретического и практического материала, навыков по распознаванию сигналов и концентрации внимания в процессе расшифровки. Однако, несмотря на это, влияние «человеческого фактора» все же существенно сказывается на результатах анализа.

Из статистики ОАО «РЖД» следует, что, несмотря на то, что количество изломов ежегодно снижается, все же, почти одна треть изломов рельсов произошли по дефектам, сигналы от которых были зафиксированы дефектоскопными средствами. По всем признакам оператор при расшифровке должен был классифицировать эти сигналы как дефектные, однако по ряду причин (невнимательность, недостаточные знания, сложность ситуации, усталость и др.), они были пропущены и привели к печальным результатам. И это, в первую очередь, связано с тем, что на оператора ложится значительная нагрузка при анализе дефектограмм и выборе решения о принадлежности сигналов к дефектам, помехам или к конструктивным отражателям (рис. 1).

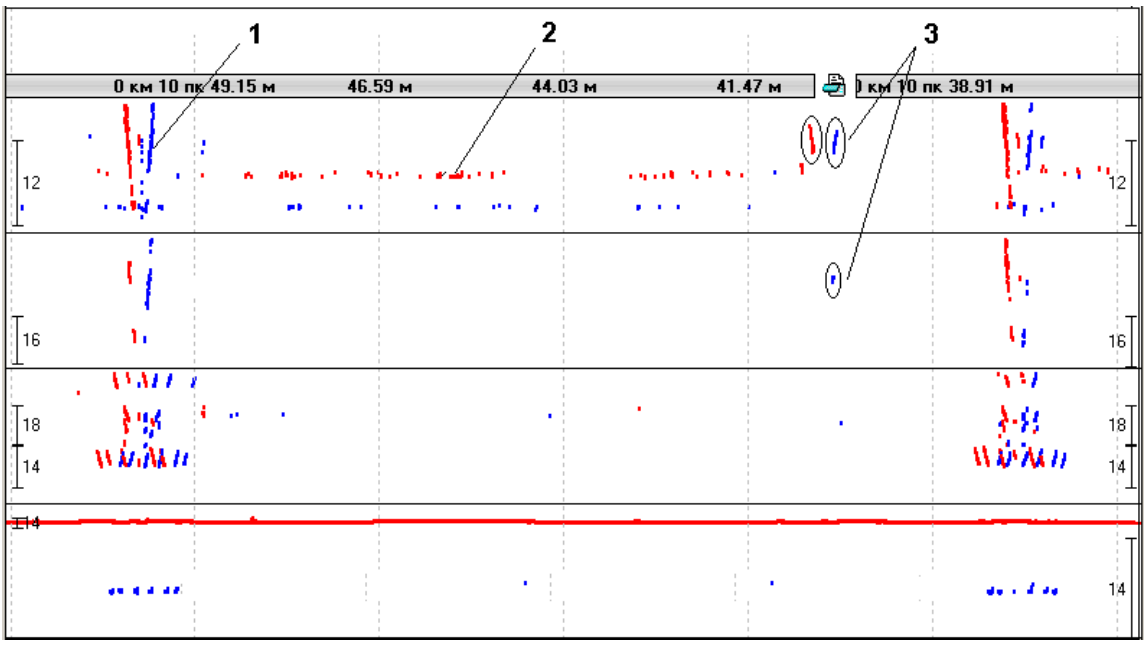

Рис. 1. Представление сигналов на развертке типа В при контроле рельсовой нити многоканальным (10 каналов) ультразвуковым дефектоскопом. Сигналы от возможной трещины в головке рельса (3) на фоне отражений от болтовых стыков (1) и помех (2)

Естественно, выходом из сложившейся ситуации был бы переход на **автоматизированную расшифровку сигналов контроля**. Однако сложность этой проблемы обусловлена не только трудностью создания соответствующих алгоритмов обработки сигналов от многообразных дефектов рельсов. Анализ подходов и технических решений по автоматизации сигналов сплошного контроля рельсов специалистов зарубежных фирм [2] и многолетнего опыта в этой области отечественных специалистов позволяет сделать вывод, что данная проблема является многофакторной, весьма сложной и полностью не решенной ни в одной стране мира.

По нашему мнению имеется два существенных фактора, затрудняющих (или делающих в настоящее время невозможным) создание системы автоматизированной расшифровки сигналов, обеспечивающей требуемую для практики достоверность выделения сигналов от дефектов:

1. Динамично изменяющиеся условия контроля;

2. Потеря в процессе предварительной обработки (регистрации) сигналов в дефектоскопе ряда информативных параметров.

В процессе сплошного контроля рельсов как дефектоскопными тележками, так и вагонами-дефектоскопами приходится сталкиваться с **постоянно изменяющимися условиями контроля**, вызванными, как правило:

- загрязненностью поверхности сканирования рельса;

- неоптимальным прижатием ультразвуковых датчиков к поверхности катания (особенно при преодолении неровностей в зоне сварных и болтовых стыков и локальных повреждений поверхности рельса);

- нестабильной подачей контактирующей жидкости при изменении скорости сканирования в широком диапазоне (от 0 до 60 км/ч);

- износом головки рельса (вызывающим отклонения углов ввода ультразвуковых колебаний и нарушения схем прозвучивания сечений рельсов);

- несовершенной центровкой искательных систем относительно продольной оси рельса;

- нарушением параметров настройки дефектоскопа;

- изменением акустических свойств металла рельсов разных производителей и лет выпуска.

По нашим данным, только из-за нестабильности ввода ультразвуковых колебаний при скоростном контроле рельсов уровень сигналов от одного и того же отражателя может изменяться в пределах до 30 дБ (!).

Проблемы первого мешающего фактора могут быть частично решены и минимизированы путем перехода на более стабильные системы ввода/приема ультразвуковых колебаний. Например, путем перехода с систем скольжения на колесные ультразвуковые системы, осуществляющие ввод у.з колебаний через упругую оболочку колеса, плотно прилегающую к поверхности сканирования. В [3] показано, что эффективность дефектоскопных тележек с колесными ультразвуковыми преобразователями в несколько раз выше, чем аналогичных дефектоскопов, оснащенных искательными системами скольжения.

Для минимизаций воздействий второго фактора при автоматизации расшифровки дефектограмм следует учитывать, что в процессе многократных преобразований реальный акустический сигнал, получаемый первичным датчиком (ультразвуковым преобразователем - ПЭП), претерпевает многократные изменения с одновременным упрощением. При этом, естественно, теряются важные информационные параметры сигналов.

Первоначально эхо-сигнал на пьезопластине представляет собой радиоимпульс ультразвуковой частоты f (рис. 2а), который, кроме частоты заполнения, характеризуется следующими параметрами:

- U, дБ - амплитуда эхо-сигнала от отражателя;

- $t_з$, мкс – временная задержка эхо-сигнала от отражателя относительно зондирующего импульса (ЗИ);

- ф – фаза сигнала (несет информацию об акустическом сопротивлении отражателя и о его типе: пора или более твердое включение);

- τ, мкс - длительность эхо-импульса;

- форма эхо-импульса (указывает на тип отражателя: «гладкий» импульс – от округлого дефекта или от трещины, сигнал с несколькими вершинами – от отражателя с неровной диффузной поверхностью).

В приемном тракте дефектоскопа эти сигналы подвергаются амплитудному детектированию, при этом двухполярный радиоимпульс превращается в однополярный видеоимпульс (рис. 2б). Информация о фазе и частоте сигнала теряется.

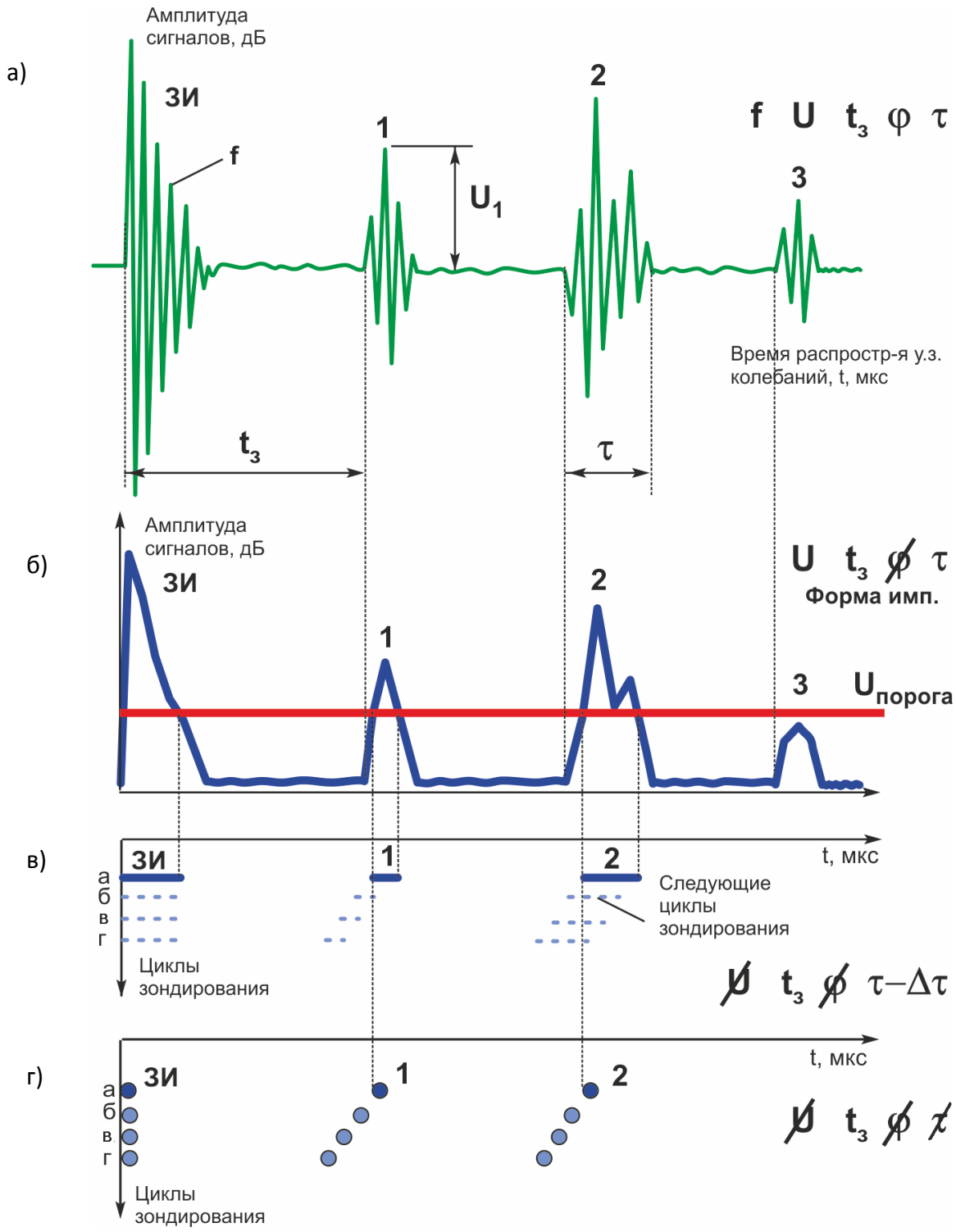

Рис. 2. К искажению параметров эхо-сигналов в процессе преобразований в приемном тракте дефектоскопа: а – высокочастотные радиоимпульсы на входе дефектоскопа; б- импульсы после амплитудного детектирования; в и г – эхо-сигналы при их представлении на дефектограмме в виде развертки типа В

Принятая в настоящее время во всех системах регистрации сигналов ультразвукового контроля рельсов представление сигналов в виде развертки

типа В, предусматривает фиксацию эхо-сигналов в виде яркостных отметок при превышении их амплитуды заданного порогового уровня (рис. 2в). В этом случае из рассматриваемых первоначальных пяти параметров эхо-сигналов остаются только два: временная задержка эхо-сигнала $t_з$ и искаженная пороговой регистрацией длительность импульса τ-$\Delta\tau$. При этом ряд сигналов, амплитуда которых не превышает пороговый уровень (сигнал №3 на рис. 2), оказываются утраченными.

Введение многоуровневой регистрации сигналов [5] только частично решает проблему сохранения информации об амплитуде сигнала (в действующих дефектоскопах и комплексах в зависимости от регистратора имеется 8-16 амплитудных уровней с шагом 2-3 дБ).

При регистрации эхо-сигналов только по переднему фронту импульсов дополнительно утрачивается и длительность импульса (рис. 2г).

Как показывает практика, основываясь даже на столь скудной информации, в целом, возможно распознавание и классификация сигналов от разнообразных конструктивных элементов и дефектов рельсов. Безусловно, такое значительное упрощение первоначального сигнала уменьшает информационные параметры и усложняет обработку сигналов. В результате достоверность автоматизированной обработки сигналов остается на весьма низком уровне, не позволяющем заметно повысить производительность расшифровки и освободить специалиста-расшифровщика от рутинной операции визуального анализа.

Таким образом, в результате предварительной обработки сигналов в приемном тракте дефектоскопического канала и в системе регистрации, из шести информативных параметров принятого эхо-сигнала сохраняются только два: время задержки эхо-сигнала относительно зондирующего импульса и иногда – длительность импульса. Во многих случаях остальные параметры сигналов оказываются потерянными для анализа.

Кроме того необходимо отметить, что при движении преобразователя (при сканировании рельса) с определенной скоростью, частота $f_Э$ заполнения эхо-сигнала (рис. 2а), благодаря проявлению эффекта Доплера, отличается от частоты f_0 излучаемых колебаний на величину доплеровского смещения $F_Д$ [4]:

$$f_э = f_0 \pm F_Д. \qquad (1)$$

В данном выражении знак (+) соответствует для «наезжающих», а знак (-) для «отъезжающих» ПЭП. Естественно, величина доплеровского сдвига зависит от скорости сканирования v_c и от углов ввода α и разворота γ ПЭП относительно продольной оси рельса:

$$F_Д \approx 2\, f_0\, (v_c/c)\, \sin\alpha\, \cos\gamma. \qquad (2)$$

При исходных параметрах, реализуемых в рельсовой дефектоскопии, значение доплеровского сдвига частоты составляет от десятков Гц (для ручного контроля), до единиц кГц (для вагонов-дефектоскопов). Несмотря на малую, относительно излучаемой частоты (2,5 МГц), величину, доплеровский сдвиг частоты эхо-сигналов от дефектов может быть достаточно просто выделен с помощью радиотехнических средств и использован для идентификации полезных сигналов на фоне помех [4].

При рабочих скоростях мобильных средств контроля за время распространения ультразвуковых колебаний до искомого дефекта и обратно акустическая система успевает сместиться на определенную величину (рис. 3).

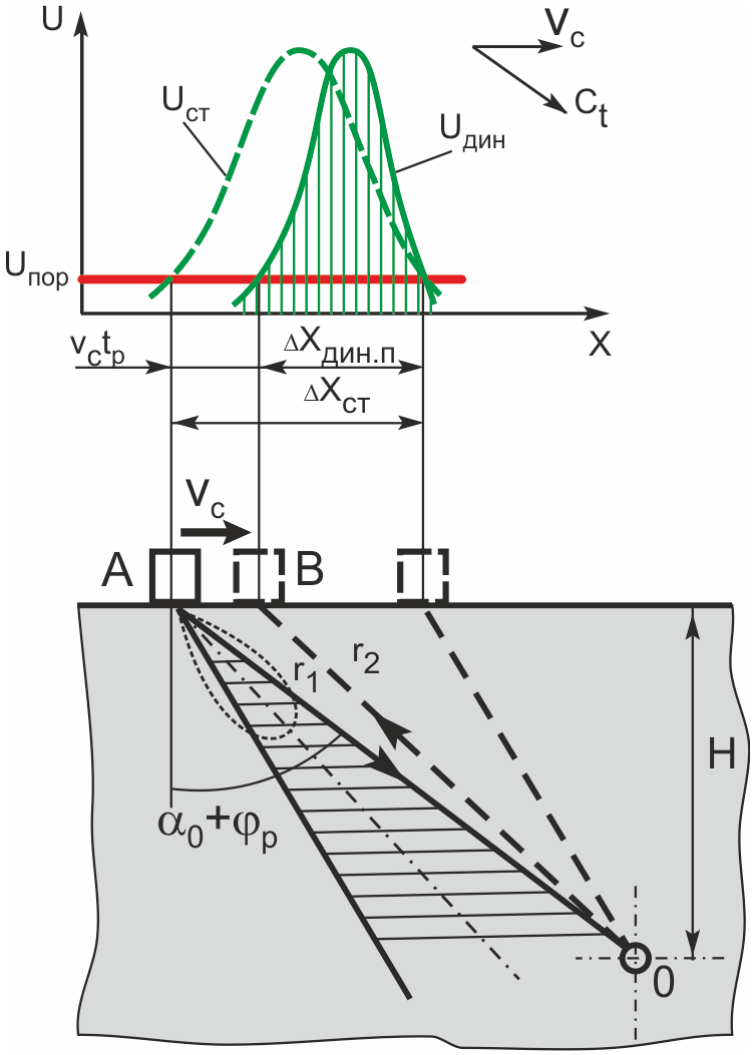

Рис. 5. Изменение условной протяженности дефекта при значительных скоростях сканирования

В результате, как показано в наших исследованиях [5], условные размеры дефекта в стационарных условиях и в динамических условиях отличаются. Выполненный анализ явления компрессии условного размера дефекта по длине рельса показывает необходимость его учета при скоростях сканирования $v_c > v_c^*$, где

$$v_c^* = 0{,}025 c_t \cdot \sin 2\varphi_p / \cos(\alpha_0 + \varphi_p). \qquad (3)$$

Данное изменение необходимо учитывать при скоростях, превышающих 30 км/ч, и корректировать критерии браковки сигналов.

Учет этих особенностей первичного эхо-сигнала в будущем может повысить помехозащищенность метода и, в конечном счете, достоверность результатов контроля.

Таким образом, в качестве информативных параметров полезных эхо-сигналов недостаточно использовать только временную задержку и амплитуду эхо-сигналов. Необходимо также задействовать в анализе все информационные параметры сигналов: доплеровский сдвиг частоты, фазу и амплитуду.

Безусловно, анализ указанных параметров сигналов потребует создания принципиально иной дефектоскопической аппаратуры с пропускной способностью потока информации, многократно превышающей аналогичной показатель эксплуатируемых дефектоскопических комплексов.

Можно предположить, что учет тонкой структуры принимаемых сигналов и реализация этапов обработки, рассмотренных выше, позволит в будущем приблизиться к решению вопроса эффективной автоматизации процесса расшифровки сигналов неразрушающего контроля рельсов.

Из изложенного следует, что создание достоверных автоматизированных систем расшифровки обуславливает разработку и внедрение более эффективных и стабильных систем ввода/приема ультразвуковых колебаний и создание новой аппаратуры, позволяющей сохранять для анализа все информативные параметры эхо-сигналов от дефектов.

Литература

1. Марков А.А., Козьяков А.Б., Кузнецова Е.К. Расшифровка дефектограмм ультразвукового контроля рельсов. С-Пб.: «Образование-Культура». 2006. - 206 с.

2. Марков А.А., В.В. Мосягин. Проблемы обнаружения дефектов в рельсах со значительным износом.

3. Марков А.А. Зарубежные системы контроля рельсов. – Путь и путевое хозяйство, 2010, № 9, с.32-40.

4. Марков А.А., Кузнецова Е.К. Дефектоскопия рельсов. Формирование и анализ сигналов. Книга 2. Расшифровка дефектограмм. С-Пб.: «Ультра Принт». 2014. - 325 с.

5. А.А. Марков. Ультразвуковой дефектоскоп. – А.с. СССР № 896550.– Бюл. изобр., 1982, № 1, с. 3.

6. Марков А.А. Особенности оценки условных размеров дефектов при значительных скоростях сканирования. – Дефектоскопия, 1989, № 3, с. 8-11.