

ДИНАМИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДЕФЕКТОСКОПИЧЕСКИХ КАНАЛОВ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ КОНТРОЛЕ РЕЛЬСОВ

© 2021 г. А.А. Марков^{1,*}, Е.А. Максимова¹, А.Г. Антипов²

¹АО «Радиоавионика», Россия 190005 Санкт-Петербург, Троицкий пр., 4Б

²Санкт-Петербургский государственный университет, Россия 199034 Санкт-Петербург,
Университетская наб., 7/9

*E-mail: amarkovspb@gmail.com

Поступила в редакцию 30.09.2021; после доработки 09.11.2021

Принята к публикации 12.11.2021

Рассмотрено повышение достоверности высокоскоростного ультразвукового контроля длинномерных объектов, в частности железнодорожных рельсов. Показано, что действующие нормативные документы не учитывают особенности высокоскоростного контроля рельсов, ориентированы на соблюдение первоначально заданных параметров и не могут обеспечить требуемую достоверность обнаружения дефектов. Рассмотрены факторы, проявляющиеся при больших скоростях сканирования и негативно влияющие на качество контроля. Большинство этих факторов не поддаются количественной оценке для их учета и корректировки параметров контроля. Выполнена оценка возможной недобраковки дефектов при работе по действующим требованиям.

Для обеспечения более надежного контроля в непрогнозируемых и динамичных условиях высоких скоростей сканирования предложено оценивать текущую чувствительность контроля путем анализа сигналов от типовых конструктивных отражателей контролируемого объекта. В качестве таких отражателей при контроле рельсов возможно использовать типовые отверстия в зоне болтовых стыков, регулярно встречающихся по пути сканирования. Получено выражение для определения величины коррекции чувствительности контроля с учетом скорости сканирования и измеряемых параметров сигналов от отверстий. Предложен алгоритм динамической корректировки чувствительности контроля, повышающий достоверность обнаружения дефектов в условиях высокоскоростного сканирования.

Ключевые слова: рельсовая дефектоскопия, высокоскоростной контроль, условные размеры дефекта, чувствительность, болтовые отверстия, негативные факторы, динамическая коррекция.

DOI: 10.31857/S0130308221120010

1. ОБОСНОВАНИЕ АКТУАЛЬНОСТИ

Сплошной контроль рельсов осуществляется передвигаемыми операторами дефектоскопными тележками (со скоростью перемещения V до 5 км/ч), вагонами-дефектоскопами (до 60—80 км/ч) и высокоскоростными (до 120 км/ч) дефектоскопическими комплексами [1—5].

При контактном способе ввода ультразвуковых (УЗ) колебаний в металл рельсов на высоких (60—120 км/ч) скоростях сканирования проявляются разнообразные факторы, негативно влияющие на качество контроля [6]: нестабильность акустического контакта; отличие температуры контролируемых рельсов от той, при которой проводилась настройка [7—9]; состояние поверхности катания и поверхностных слоев рельсов [10]; износ протекторов (донышек) УЗ преобразователей (ПЭП); компрессия условных размеров отражателей [6, 11].

При одновременном воздействии нескольких факторов некоторые из них могут взаимно компенсировать друг друга, а суммарное воздействие других может привести к полной потере контроля. Например, при уменьшении толщины протектора ПЭП в процессе проезда (от 4,0 до 0,2 мм) и снижении температуры окружающего воздуха (и рельсов) чувствительность контроля возрастает. При увеличении скорости сканирования чувствительность уменьшается, взаимно компенсируя изменение общей чувствительности контроля. С другой стороны, одновременное воздействие даже двух факторов: повышение температуры воздуха (от 0° до 40°C) и увеличение скорости сканирования от 20 до 100 км/ч может вызвать уменьшение амплитуды сигналов и сокращение зоны локации (условной протяженности ΔL) отражателей более чем на 20 % [11], что может суммарно привести к недобраковке (пропуску) сигналов от опасного дефекта.

Таким образом, значения измеряемых параметров от искомых дефектов зависят от многих разнообразных факторов. Оценка количественного вклада каждого фактора на конечный результат (на достоверность и надежность контроля) требует проведения сложных экспериментальных исследований и не всегда корректно выполнимо. В то же время, достоверность контроля рельсов средствами дефектоскопии во многом зависит от соблюдения заданных

параметров в процессе контроля. Естественно, в широком диапазоне скоростей контроля эксплуатирующихся рельсов (5—120 км/ч) обеспечить необходимую стабильность и эффективность дефектоскопирования с первоначально установленными параметрами контроля маловероятно.

Актуальность достижения и сохранения требуемой достоверности контроля рельсов многократно возрастает в связи с принятой в мире тенденцией перехода от низкопроизводительных дефектоскопных тележек на скоростные (до 80 км/ч) и высокоскоростные (до 120 км/ч) диагностические комплексы [3, 5, 12]. Поэтому исследования, направленные на разработку технологии динамической корректировки параметров (чувствительности) ультразвукового контроля с учетом воздействующих при высокоскоростном контроле факторов, являются своевременными.

2. АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ КОЛИЧЕСТВА ВЫЯВЛЯЕМЫХ ДЕФЕКТОВ И ИХ УСЛОВНЫХ РАЗМЕРОВ ОТ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КОНТРОЛЯ

Условная протяженность пачек эхосигналов ΔL (ГОСТ 18576—96) при анализе дефектограмм многоканального УЗ контроля длинномерных изделий является простым и информативным параметром отражателей (дефектов). Размеры пачек сигналов позволяют оператору практически мгновенно (визуально) отделить полезные сигналы от конструктивных отражателей и дефектов в рельсах от всевозможных помех УЗ контроля, а также оценить степень развития (размер) дефектов. В рельсовой дефектоскопии браковочные признаки сигналов также ориентированы на оценку условной протяженности ΔL , а не максимальной амплитуды искомых дефектов [13—15].

Оценка сигналов путем измерения *условных размеров выявляемых дефектов*, а не их *амплитуд*, как это принято при ручном контроле, имеет теоретическое обоснование. Еще в 1966 г. И.Н. Ермолов показал, что при контроле изделий наклонными ПЭП основными характеристиками обнаруживаемых дефектов должны являться условные размеры, а амплитуда — дополнительным параметром [16]. Особенно это важно при контроле изделий ограниченных размеров (например, рельсов), когда на формируемую амплитуду эхосигнала большое значение оказывает соотношение фаз лучей, отраженных непосредственно от плоскости дефекта, и лучей, переотраженных от поверхностей изделия и дефекта. Амплитуды эхосигналов от идентичных дефектов могут отличаться в несколько раз в зависимости от глубины их расположения относительно поверхности изделия. В исследованиях В.Г. Щербинского [8] и А.К. Гурвича [9] показано, что условные размеры дефектов при абсолютном способе оценки монотонно увеличиваются с возрастанием истинных размеров дефектов, что способствует более достоверной экспресс-оценке сигналов при визуальном анализе.

Ниже приведены результаты исследований зависимости условных размеров и выявляемости реальных дефектов рельсов при изменении чувствительности контроля.

Выявляемость опасных дефектов рельсов в зависимости от чувствительности контроля (порога регистрации сигналов) оценена с помощью базы данных Центра расшифровки Октябрьской ж/д. Анализировали дефектограммы вагонов-дефектоскопов, полученных на участках смешанного пассажирского и грузового движения при скоростях сканирования 35—45 км/ч. Измерены пачки сигналов (с наибольшими значениями характеристик¹) от 50 реальных дефектов, в основном, в виде поперечных трещин в головке рельсов при их озвучивании наклонными ПЭП с углами ввода 70 и 58°. Построена зависимость количества Q выявляемых дефектов (в % от 50 шт. дефектов) при разных амплитудных порогах регистрации $N_1 \dots N_8$ с дискретностью 3 дБ (рис. 1). Оказалось, что уменьшение чувствительности контроля на 15 дБ может привести к пропуску почти 80 % рассматриваемых дефектов. При дальнейшем снижении чувствительности еще на 6 дБ, только три из 50 дефектов были зарегистрированы.

Отображенная на этом же рисунке усредненная условная протяженность пачек сигналов от анализируемых дефектов $\Delta L_{\text{ср}}$ в зависимости от уровня чувствительности показывает, что, в основном, снижение выявляемости дефектов происходит именно из-за уменьшения зоны локации. По действующей НТД («Положение о расшифровке результатов неразрушающего контроля рельсов», утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 09.01.2018 г. № ЦДИ-1/р) пачки сигналов от отражателей в

¹Обычно дефект может быть зафиксирован несколькими каналами и с нескольких ракурсов, в том числе т.н. «наезжающими» и «отъезжающими» ПЭП [4].

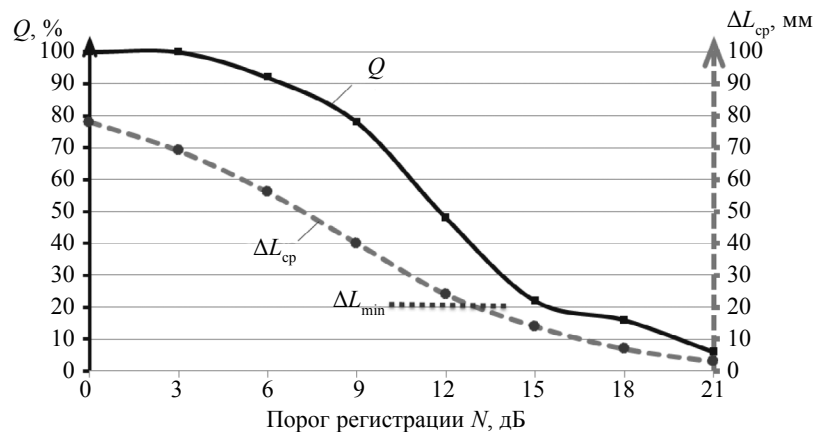


Рис. 1. Влияние уменьшения чувствительности контроля на количество Q выявленных дефектов и их усредненный условный размер $\Delta L_{ср}$.

рельсах с малым значением условного размера $\Delta L < 20$ мм (на графике — штриховая линия ΔL_{min}) операторами по расшифровке могут не рассматриваться.

Таким образом, приведенные результаты (см. рис. 1) показывают, что даже при небольших скоростях сканирования (около 40 км/ч) из-за воздействия неизбежных в реальных условиях негативных факторов изменение чувствительности контроля на 12—15 дБ может привести к пропуску (недобраковке) значительного количества опасных дефектов. В связи с этим важно разработать технологию отслеживания в текущий момент времени реальной чувствительности контроля и ее оперативной корректировки при действии негативных факторов.

Принципы формирования сигналов от рассмотренных дефектов в головке рельсов и анализируемых в работе отражателей в шейке практически идентичны, т.к. эхосигналы от них появляются примерно в одинаковой временной зоне (в районе 60—110 мкс). Это вызвано тем, что дефекты в головке, в основном, выявляются однократно отраженным лучом, а дефекты и отражатели в шейке рельсов — прямым лучом.

3. ПРЕДЛАГАЕМАЯ ТЕХНОЛОГИЯ КОРРЕКЦИИ ПАРАМЕТРОВ НАСТРОЙКИ

3.1. Основная идея предлагаемой технологии

Даже приближенная оценка влияния некоторых факторов на измеряемый параметр ΔL показывает, что при соблюдении действующей технологии с сохранением предварительной настройки каналов при высокоскоростном сканировании можно ожидать значительные отклонения от первоначальных значений, которые могут привести к пропуску дефектов в рельсах. Таким образом, действующая технология настройки УЗ каналов дефектоскопических комплексов несовершенна, требует значительных временных (на тестирование, на контроль выполнения НТД) и материальных затрат и не обеспечивает необходимую достоверность контроля рельсов.

Основная идея предлагаемого способа заключается в измерении в процессе сканирования текущих параметров сигналов от регулярных конструктивных отражателей (КО) объекта контроля, сравнении измеренных параметров с их базовыми значениями и, при их значительном расхождении, в формировании сигнала коррекции чувствительности контроля. Использование регулярно встречающихся на пути сканирования типовых (одинаковых) КО позволяет объективно зафиксировать воздействие негативных факторов и оперативно скорректировать параметры (чувствительность) контроля на конкретном участке пути.

Известен способ автоматической регулировки чувствительности каналов дефектоскопа по уровню структурных шумов в контролируемых рельсах [17]. Однако, как показала практика, оценка только уровня шумов не дает необходимой информации для корректной регулировки чувствительности. Это всего лишь приводит к непомерному возрастанию объемов файлов дефектограмм и к крайнему затруднению процедуры их передачи с бортов скоростных дефектоскопических комплексов в региональные центры расшифровки дефектограмм. Важно, что сильно зашумленные дефектограммы практически непригодны для визуального анализа и выявления дефектов.

В процессе проведения контроля рельсового пути при существенном (например, более $\pm 10\%$) отклонении параметров принимаемых сигналов $\Delta L_{\text{изм}}$ от базового значения ΔL_6 должна вырабатываться управляющая команда по корректировке чувствительности конкретного дефектоскопического канала.

Регулярными КО рельсового пути, которые возможно и целесообразно использовать для коррекции настройки каналов дефектоскопических средств, могут являться:

вторые и третьи отверстия в болтовых стыках (за исключением первых отверстий, не полностью проверяемых из-за близости к торцам рельсов [6]);

донная поверхность рельсов (для настройки каналов прямых ПЭП с углом 0°);

угловые отражатели торцов рельсов в зоне болтовых стыков (образованные торцами и поверхностями головки и подошвы рельсов);

сварные стыки рельсов, например, путем использования характерных отражений от структуры металла в зоне термического влияния (Патент на изобретение № 2573707. Способ контроля качества сварки).

3.2. Обоснование выбора конструктивного отражателя

В данной работе, по примеру [6], исследования проведены для случая, когда в качестве КО выбраны болтовые отверстия диаметром 36 мм болтовых стыков рельсов типа Р65, выполняемых в заводских условиях в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51685—2013.

Болтовые стыки являются самыми распространенными конструктивными отражателями на сети дорог ОАО «РЖД». Несмотря на широкое внедрение бесстыкового пути, они имеются в достаточном количестве (более 9 млн стыков) и регулярно фиксируются на дефектограммах.

Правомерность выбора сигналов от болтовых отверстий в качестве тестовых отражателей можно обосновать следующими положениями:

зона залегания отражающих точек от стенки отверстий ($h \approx 105$ мм) находится в зоне образования многих опасных дефектов в шейке рельса и в головке рельса (при однократном отражении лучей от подголовочной грани);

амплитуды сигналов от отверстий и большинства обнаруживаемых дефектов сравнимы (± 8 дБ);

достаточно большое количество реальных дефектов имеют условные размеры, близкие по значениям к условным размерам сигналов от отверстий.

Даже на бесстыковых участках пути, в среднем через каждые 800 м, для компенсации температурного расширения плети следуют от двух до четырех пар разрядных звеньев, соединенных болтовыми стыками. Сигналы от болтовых отверстий на разрядных звеньях могут быть использованы для коррекции чувствительности контроля. Например, при движении дефектоскопического комплекса со скоростью 30 м/с (108 км/ч) сигналы от 12 до 20 отверстий на каждой нитке пути будут фиксироваться через каждые 27 с. Они могут успешно использоваться для определения усредненных параметров сигналов от типовых отражателей и формирования корректирующего сигнала регулировки усиления контроля.

В качестве базового значения ΔL_6 сигналов от КО целесообразно использовать усредненный условный размер пачек сигналов от болтовых отверстий, полученных при благоприятных условиях (малая скорость сканирования, стабильный акустический контакт и т.п.). Например, при контроле рельсов за ΔL_6 можно принять значения параметров сигналов, полученных при периодической (через 3—6 месяцев) проверке работоспособности мобильных средств на специальных испытательных участках пути в соответствии с требованиями ТИ 07.139-2020 (Инструкция по проверке работоспособности средств неразрушающего контроля рельсов на испытательных участках пути, утв. расп. ОАО «РЖД» № 1771/р от 19.08.2020). Как правило, скорости сканирования на этих участках не превышают 30—40 км/ч, и основными измеряемыми характеристиками отражателей являются их условные размеры ΔL .

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБУЕМОЙ ВЕЛИЧИНЫ КОРРЕКЦИИ УСИЛЕНИЯ

4.1. Исследование зависимости усиления от скорости сканирования

На рис. 2 приведены зависимости усредненной условной протяженности сигналов ΔL от болтовых отверстий на трех скоростях контроля: 20, 60 и 80 км/ч. Данные получены при обработке

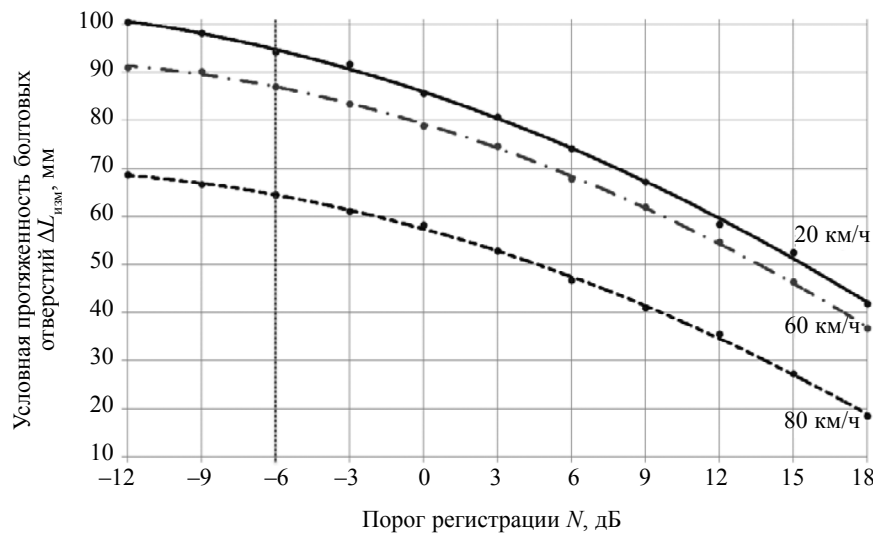


Рис. 2. Зависимость усредненной условной протяженности $\Delta L_{\text{изм}}$ болтовых отверстий от порога регистрации N на скоростях контроля 20, 60 и 80 км/ч.

реальной дефектограммы участка рельсового пути протяженностью около 110 км Юго-Восточной ж/д, проконтролированного скоростным дефектоскопическим комплексом «АВИКОН-03М». На каждом пороге регистрации² измерялись условные протяженности пачек сигналов от 50 болтовых отверстий (отверстия вблизи торцов рельсов не учитывались) и определялось среднее значение $\Delta L_{\text{изм}}$. На рис. 2 видно, что при всех скоростях контроля изменение амплитудного порога регистрации сигналов (чувствительности контроля) приводит к уменьшению измеренной условной протяженности $\Delta L_{\text{изм}}$ сигналов от отверстий по квадратичному закону. Например, при уменьшении чувствительности на 30 дБ (от -12 до $+18$ дБ) значения $\Delta L_{\text{изм}}$ падают на 60—70 %.

При анализе сигналов на уровне регистрации « -6 дБ», являющимся рабочим порогом при поиске дефектных сечений, изменение скорости сканирования на 60 км/ч (с 20 до 80 км/ч) приводит к уменьшению условных размеров отверстий в рельсах примерно на 30 мм (30 %) (расстояние по вертикальной оси между крайними линиями на рис. 2).

Полученные выше зависимости показывают, что величина необходимой коррекции чувствительности дефектоскопического канала при высокоскоростном сканировании одновременно зависит как минимум от двух взаимосвязанных факторов: от скорости сканирования и от условного размера тестового отражателя. В действующих системах контроля текущие значения этих параметров могут быть определены с достаточной для практики точностью.

Располагая данными, содержащими информацию об условной протяженности ΔL , скорости сканирования V и пороге регистрации N , при котором проводились измерения (см. рис. 2), для имеющегося набора сигналов от болтовых отверстий можно установить связь между указанными параметрами. В частности, можно определить зависимость порога регистрации (чувствительности) от условной протяженности при любом фиксированном значении скорости и, тем самым, определить зависимость требуемого значения корректировки чувствительности тракта ΔK_y от измеренных значений ΔL на текущей скорости V . Для этого нужно аппроксимировать конечный набор из M точек в трехмерном пространстве:

$$\{V_m, N_m, \Delta L_m\}_{m=1}^M \quad (1)$$

поверхностью, отражающей связь между условной протяженностью, скоростью и порогом отображения.

Зададим указанную поверхность уравнением следующего вида:

$$\Delta L = \sum_{i=0}^I \sum_{j=0}^J a_{ij} V^i N^j, \quad (2)$$

²Некоторые отличия представления пороговых уровней на рис. 2 и 3 вызваны анализом сигналов, полученных с разных мобильных средств, с несколько отличающимся программным обеспечением.

где a_{ij} , $i = 0, \dots, I, j = 0, \dots, J$ — некоторые коэффициенты. Определим такие значения коэффициентов a_{ij} , при которых поверхность будет оптимальным образом соответствовать исходному набору данных, а, именно, когда сумма квадратов расстояний от поверхности до набора имеющихся точек будет минимальной. Необходимо найти минимум функции многих переменных:

$$F_L(a) = \sum_{m=1}^M \left(\Delta L_m - \sum_{i=0}^I \sum_{j=0}^J a_{ij} V_m^i N_m^j \right)^2.$$

Из условия на экстремум функции $F_L : \frac{\partial F_L}{\partial a_{ij}} = 0$, $i = 0, \dots, I, j = 0, \dots, J$ вытекает система из $(I+1) \times (J+1)$ линейных алгебраических уравнений относительно коэффициентов a_{ij} :

$$\sum_{i'=0}^I \sum_{j'=0}^J \sum_{m=1}^M V_m^{i+i'} N_m^{j+j'} a_{ij'} = \sum_{m=1}^M V_m^i N_m^j \Delta L_m, \quad i = 0, \dots, I, \quad j = 0, \dots, J. \quad (3)$$

Если в качестве исходных точек в трехмерном пространстве (1) взять данные, изображенные на рис. 2, и при описании поверхности (2) использовать степени скоростей и пороговых значений не выше первой ($I = 1, J = 1$), то в результате решения системы уравнений (3) мы получим следующие значения четырех имеющихся в данном случае коэффициентов:

$$a_{00} \approx 93,8, \quad a_{01} \approx -2,06, \quad a_{10} \approx -0,432, \quad a_{11} \approx 0,00465,$$

и зависимость N от V и ΔL будет задаваться выражением:

$$N = \frac{\Delta L}{a_{11}V + a_{01}} - \frac{a_{10}V + a_{00}}{a_{11}V + a_{01}}. \quad (4)$$

На рис. 3 показана полученная связь между N , V и ΔL вместе с использованными в расчетах исходными данными.

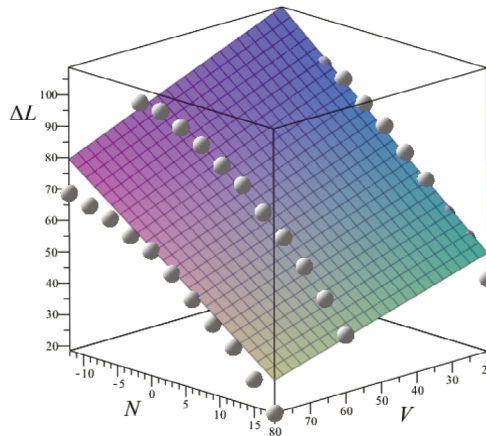


Рис. 3. Поверхность в трехмерном пространстве, отображающая связь между условной протяженностью ΔL , скоростью V и порогом регистрации N сигналов контроля.

На рис. 4 представлены зависимости $N(\Delta L)$ для нескольких фиксированных значений скорости (40, 60, 80, 100 км/ч).

Из рис. 4 видно, что, например, при скорости движения 100 км/ч для измеренного усредненного размера пачки сигналов от типовых отверстий $\Delta L_{\text{изм}} = 70$ мм, чтобы достигнуть некоторой

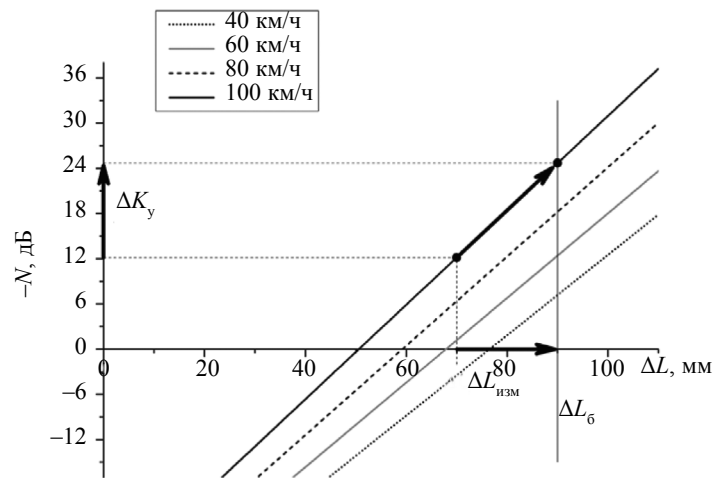


Рис. 4. Пример определения величины требуемой коррекции усиления ΔK_y при заданных ΔL_6 , скорости V и текущего значения $\Delta L_{изм} = 70$ мм.

базовой протяженности $\Delta L_6 = 90$ мм, требуется ввести усиления на 12 дБ. В общем случае зависимость требуемой величины усиления от ΔL_6 , $\Delta L_{изм}$ и скорости V выражается следующей формулой:

$$\Delta K_6 = -\frac{\Delta L_a - \Delta L_{\text{еcl}}}{a_{11}V + a_{01}}. \quad (5)$$

Для фиксированного базового значения $L_6 = 90$ мм (измеренного при благоприятных условиях, на малых скоростях сканирования с хорошим акустическим контактом) по выражению (5) можно построить зависимости, показывающие величину необходимой коррекции усиления приемного тракта дефектоскопического канала ΔK_y при снижении в ходе рабочего проезда текущего значения условной протяженности сигналов от тестовых отверстий $\Delta L_{изм}$ (рис. 5). Видно, что в диапазоне практических значений условной протяженности болтовых отверстий (например, в пределах от 90 до 40 мм) величина необходимой корректировки усиления ΔK_y может составить около 30 дБ.

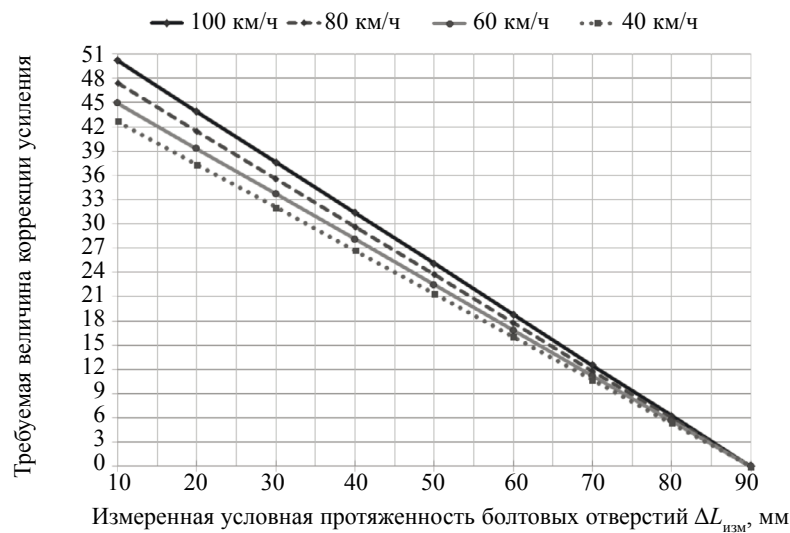


Рис. 5. Величина коррекции усиления ΔK_y при изменении измеренной условной протяженности сигналов от болтовых отверстий $\Delta L_{изм}$ (при $L_6 = 90$ мм).

Погрешность измерения условной протяженности отражателей и дефектов $\Delta L_{\text{изм}}$ (рис. 1—6) складывается из дискретности посылок зондирующих импульсов и точности ручного измерения пачек сигналов по экрану компьютера и не превышает 4 % (рассчитана при измерении не менее 30 отверстий и усредненного значения $\Delta L_{\text{изм}} = 40$ мм на скорости 100 км/ч, см. рис. 6). Указанная погрешность может быть минимизирована при излучении/приеме УЗ колебаний с помощью двохенных ПЭП и при программной автоматизации измерения условных размеров (автоматическая расшифровка дефектограмм). Эти функции во многом уже реализованы в современных образцах диагностических комплексов.

Дополнительно проведена оценка погрешности измерения условной протяженности $\Delta L_{\text{изм}}$ сигналов от болтовых отверстий при многократных проездах. Для этого в трех разных файлах проездов вагона-дефектоскопа по однотипным участкам пути Октябрьской ж/д в канале ПЭП 45° измерили по 50 отверстий на приблизительно одинаковой скорости контроля (около 45 км/ч). Разброс полученных усредненных значений $\Delta L_{\text{изм}}$ отверстий не превышает 5,5 %. Это подтверждается и опытом многолетнего визуального анализа УЗ дефектограмм сплошного контроля рельсов: при номинальных параметрах контроля средний размер $\Delta L_{\text{изм}}$ пачек сигналов от болтовых отверстий (за исключением первых отверстий) от проезда к проезду существенно не меняется. Ранее это позволило разработчикам НТД (Положение по расшифровке от 09.01.2018 г. № ЦДИ-1/р) установить фиксированное значение пороговой величины $\Delta L_{\text{мин}}$ (см. рис. 1).

Таким образом, можно считать, что результирующая погрешность определения усредненного значения $\Delta L_{\text{изм}}$ на практике не превышает 5,5 % при корректной настройке УЗ каналов.

Как видно на рис. 5, для одного и того же значения $\Delta L_{\text{изм}}$ разброс значений ΔK_y для разных скоростей сканирования составляет незначительную величину. Например, во время проезда дефектоскопного средства от набора отверстий получено усредненное значение $L_{\text{изм}} = 40$ мм. Величина необходимой коррекции усиления на скорости 100 км/ч отличается от аналогичной величины коррекции на скорости 40 км/ч всего на 5 дБ. Основное влияние скорости сканирования, как показано в [6, 11], уже опосредованно заложено в динамическом изменении параметра $\Delta L_{\text{изм}}$.

Это обстоятельство может существенно облегчить практическую реализацию системы автоматической динамической корректировки усиления по измеряемым параметрам сигналов от тестовых отражателей (от болтовых отверстий). Достаточно лишь измерить текущее значение $\Delta L_{\text{изм}}$ от набора отверстий и скорректировать чувствительность канала на определенное по графику рис. 5 значение ΔK_y . При этом сигналы от последующих типовых отражателей будут иметь значения, близкие к $\Delta L_{\text{б}}$, а потенциальные дефекты в рельсах будут обнаруживаться так же, как и при нормальных условиях сканирования.

При недостатке предусмотренного в аппаратуре диапазона регулировки усиления, рассчитанного по выражению (5), коррекцию чувствительности можно осуществить путем частичной регулировки усиления плюс дискретного увеличения амплитуды зондирующего импульса, как это предусмотрено в современных диагностических комплексах.

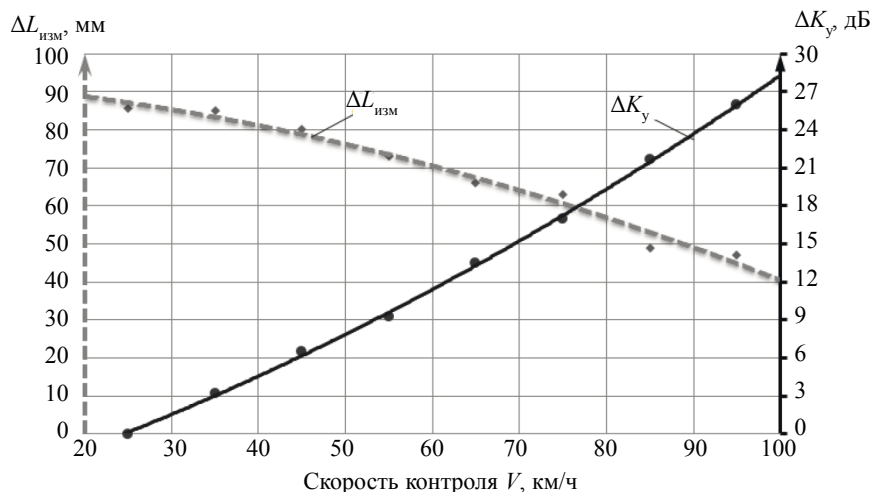


Рис. 6. Зависимость условной протяженности $\Delta L_{\text{изм}}$ пачек сигналов от болтовых отверстий (левая ось) и величины коэффициента усиления ΔK_y (правая ось) при увеличении скорости контроля.

Несмотря на зависимость искомого параметра ΔK_y в общем случае от нескольких параметров ($\Delta L_{изм}$, ΔL_6 , V и коэффициентов a_{11} и a_{01}), для практической реализации в рабочем диапазоне скоростей сканирования может быть получена упрощенная зависимость величины корректировки коэффициента усиления ΔK_y при увеличении скорости контроля (см. рис. 6).

Рис. 6 демонстрирует, что с увеличением скорости сканирования на каждые 10 км/ч условный размер болтовых отверстий $\Delta L_{изм}$ уменьшается в среднем на 6—7 %. При увеличении скорости с 20 до 100 км/ч для сохранения качества проводимого контроля следует увеличить чувствительность (в данном примере — на 28—30 дБ).

4.2. Алгоритм динамической коррекции чувствительности контроля

Последовательность операций по динамической (во время проезда скоростного дефектоскопа) корректировке чувствительности контроля с учетом получаемых характеристик сигналов от болтовых отверстий можно представить в виде следующего алгоритма (рис. 7).

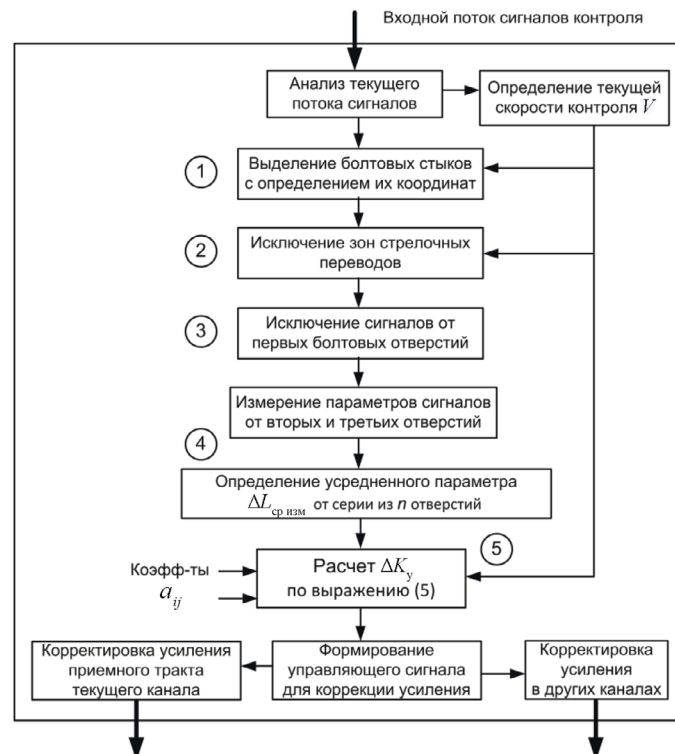


Рис. 7. Примерный алгоритм динамической коррекции чувствительности контроля.

Во время проезда из потока принимаемых в процессе сканирования сигналов по специальному алгоритму (подпрограмма 1 на рис. 7) выделяются группы сигналов в зоне болтовых стыков. Из потока данных целесообразно исключить сигналы, получаемые в зонах стрелочных переводов (кроме сигналов от примыкающих разрядных звеньев). В этих зонах ходовая часть любой подвижной единицы испытывает значительные динамические воздействия [18], и сигналы, получаемые на этих участках, могут отличаться от сигналов, фиксируемых на перегонах. Ввиду особенностей данных участков, вопросы обеспечения корректного контроля на стрелочных переводах должны рассматриваться отдельно. Возможный вариант распознавания зон стрелочных переводов (подпрограмма 2 на рис. 7) и даже их проектов (типов) предложен в патенте на изобретение № 2652673 «Способ определения стрелочных переводов и положения остряков».

Как показано в [6], при сплошном сканировании принятыми схемами УЗ прозвучивания первые болтовые отверстия (подсчет от стыкового зазора) озвучиваются не полностью из-за малой протяженности зоны локализации со стороны торцов рельсов. Поэтому с помощью специальной подпрограммы 3 (см. рис. 7) сигналы от первых болтовых отверстий должны быть также исключены

из рассмотрения. Измерение параметров набора вторых и третьих отверстий, определение их усредненной условной протяженности $\Delta L_{\text{ср изм}}$, а также сравнение полученного параметра с базовым значением ΔL_6 выполняется в отдельной подпрограмме 4. По полученным данным ($\Delta L_{\text{изм}}$ и V) с помощью выражения (5) подпрограммой 5 рассчитывается требуемая величина коррекции ΔK_y и формируется управляющий сигнал для коррекции коэффициента усиления приемного тракта конкретного дефектоскопического канала.

Для корректировки параметров других УЗ каналов (ПЭП 58°, 70°, 0°) в процессе сканирования могут быть использованы конструктивные отражатели рельсов, указанные в разд. 3.1. Все это требует дополнительных исследований, однако соответствующие подходы выравнивания параметров контроля и алгоритм корректировки параметров высокоскоростной дефектоскопии остаются общими.

При существенном отличии характеристик контролируемого участка пути (рельсы других производителей, пропущенный тоннаж, грузонапряженность и т.п.) возможно потребуются предварительная корректировка коэффициентов a_{ij} в выражении (5). В общем случае можно организовать определение закономерности поведения условных размеров типовых отражателей (например, болтовых отверстий), аналогично рис. 6, и расчет коэффициентов a_{ij} в процессе рабочего проезда после набора скорости сканирования до определенной величины.

Предварительная проверка предложенного принципа корректировки чувствительности дефектоскопических каналов проведена на реальных дефектах в головке рельсов (рис. 8). Как видно, после добавления усиления ΔK_y условные размеры пачек сигналов от дефектов увеличились в 3—6 раз, что обеспечивает их надежное обнаружение.

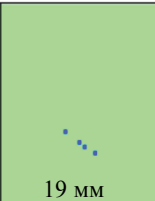
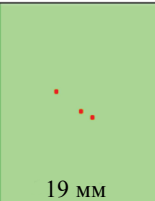
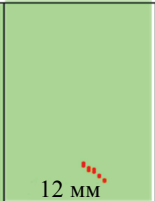
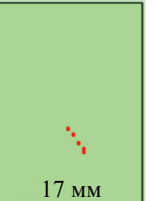
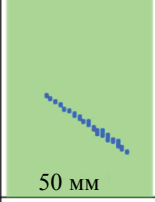
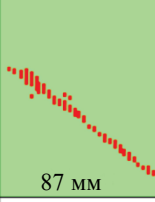
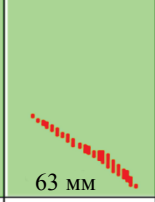
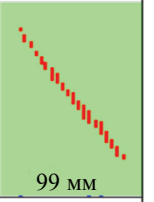
	Дефект 1	Дефект 2	Дефект 3	Дефект 4
<i>a</i>				
До коррекции				
ΔL_1	19 мм	19 мм	12 мм	17 мм
<i>б</i>				
После коррекции чувствительности				
ΔL_2	50 мм	87 мм	63 мм	99 мм
ΔK_y	+9 дБ	+12 дБ	+15 дБ	+20 дБ

Рис. 8. Размеры пачек сигналов от дефектов рельсов до (*a*) и после (*б*) корректировки чувствительности контроля.

Как показывает практика, с увеличением чувствительности контроля не происходит существенное возрастание шумовой составляющей. Видимо, это связано с идентичным воздействием негативных факторов при больших скоростях сканирования как на амплитуду сигналов от дефектов, так и на уровень шумов.

Кроме выравнивания чувствительности каналов при внешних воздействиях, отслеживание процедур автоматического управления параметрами каналов может дать дополнительную информацию о работе многоканальной дефектоскопической системы. Если в процессе контроля из нескольких однотипных каналов один из них в процессе рабочего проезда требует более частой корректировки чем остальные, то это является поводом для более детального анализа акустического тракта с целью выяснения и устранения причины нестабильности. Например, для контроля сечения рельса в проекции шейки используются по два наклонных ПЭП с $\alpha = 45^\circ$ для каждой нитки пути. При этом три канала (при контроле обеих ниток) требуют, в соответствии с приведенным выше алгоритмом, весьма плавных регулировок с изменением скорости, а для нормальной работы одного канала, формирующего пачки сигналов от болтовых отверстий меньшей протяженности, управляющее воздействие пришлось оказывать многократно,

причем не всегда из-за изменения скорости контроля. Детальный анализ после проезда позволил выяснить, что механика крепления акустического блока, на котором расположен данный ПЭП, требует замены из-за значительного износа.

Таким образом, предлагаемая технология оперативной (динамической) корректировки чувствительности с использованием отражений от конструктивных элементов контролируемого объекта в условиях высокоскоростного контроля и/или действия неблагоприятных факторов позволит повысить достоверность обнаружения дефектов.

ВЫВОДЫ

1. При контроле рельсов на высоких скоростях сканирования (до 120 км/ч) неизбежные воздействия негативных факторов приводят к существенному ухудшению качества контроля и к уменьшению основного измеряемого параметра — условного размера ΔL потенциальных дефектов.

2. Действующая технология настройки дефектоскопических каналов в стационарных условиях и неизменность этих настроек при разных скоростях сканирования не обеспечивает требуемое качество контроля и может привести к пропуску опасных дефектов.

3. С целью сохранения стабильного качества контроля при увеличении скорости контроля предложено корректировать чувствительность приемного тракта дефектоскопических каналов с учетом измерения условных размеров типовых отражателей в контролируемом изделии (например, болтовых отверстий в рельсах).

4. Предложенный алгоритм динамической корректировки чувствительности при высокоскоростном контроле может быть реализован на практике и будет способствовать повышению достоверности обнаружения дефектов.

Авторы благодарят главного специалиста по дефектоскопии АО «Радиоавионика» С.Л. Молоткова за ценные замечания и предложения, высказанные в процессе подготовки статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Clark R. Rail flaw detection: Overview and needs for future developments // NDT & E International. 2004. V. 37. No. 2. Mar. 2004. P. 111—118.
2. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов / Справочник. М.: Металлургия, 1991. 752 с.
3. Xu P., Zhu C., Zeng H., Wang P. Rail crack detection and evaluation at high speed based on differential ECT system // Measurement. 2020. V. 166. P. 108152.
4. Марков А.А., Кузнецова Е.А. Дефектоскопия рельсов. Формирование и анализ сигналов. Книга 2. Расшифровка дефектограмм. С-Пб.: Ультра Принт, 2014. 332 с.
5. Тарабрин В.Ф. Система стандартизации и метрологического обеспечения скоростных средств дефектоскопии рельсов при их производстве и эксплуатации // Контроль. Диагностика. 2021. № 5 (275). С.14—29.
6. Markov A.A., Maximova E.A. Analyzing Ultrasonic Signal Parameters during High-Speed Rail Inspection // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 3. P. 181—194. [Марков А.А., Максимова Е.А. Анализ параметров ультразвуковых сигналов при высокоскоростном контроле рельсов // Дефектоскопия. 2021. № 3. С. 3—16.]
7. Гурвич А.К., Ермолов И.Н. Ультразвуковой контроль сварных швов. Киев: Техника, 1972. 460 с.
8. Щербинский В.Г. Технология ультразвукового контроля сварных соединений. М.: Изд-во «СВЕН», 2014. 494 с.
9. Гурвич А.К., Кузьмина Л.И. Справочные диаграммы направленности искателей ультразвуковых дефектоскопов. Киев: Техника, 1980. 101 с.
10. Муравьев В.В., Муравьева О.В., Байтеряков А.В. Структурно-чувствительные акустические параметры конструкционных сталей. Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2020. 151 с.
11. Марков А.А. Особенности оценки условных размеров дефектов при значительных скоростях сканирования // Дефектоскопия. 1989. № 3. С. 8—16.
12. Yuan F., Yu Y., Wang W., Tian G. A Novel Probe of DC Electromagnetic NDT Based on Drag Effect: Design and Application in Crack Characterization of High-Speed Moving Ferromagnetic Material // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2021. V. 70. March 2021. DOI: 10.1109/TIM.2021.3069036
13. Марков А.А., Захарова О.Ф., Мосягин В.В. Применение развертки типа «В» для обнаружения трещин в зоне отверстий болтовых стыков железнодорожных рельсов // Дефектоскопия. 1999. № 6. С. 78—92.
14. Huang X.Y., Shi Y.S., Zhang Y.H., Li P., Xiong L.H., Zhong Y.C. BP neural network based on rail flaw classification of RFD car's B-scan data // China Railway. 2018. No. 03. P. 82—87.

15. *Молотков С.Л.* Чувствительность и амплитудные измеряемые характеристики дефекта. Обзор изменений в рельсовой дефектоскопии за четверть века // В мире неразрушающего контроля. 2020. № 3 (89). С. 62—73.
 16. *Ермолов И.Н.* Методы ультразвуковой дефектоскопии. Ч.1. Московский горный институт, 1966. 267 с.
 17. *Тарабрин В.Ф., Чистякова О.Е., Кисляковский О.Н., Кононов Д.А.* Автоматическая регулировка чувствительности каналов дефектоскопа с использованием адаптивного порога // В мире неразрушающего контроля. 2016. Т. 19. № 3. С. 77—80.
 18. *Ермаков В.М., Егоров М.А.* Динамическое моделирование взаимодействия стрелочного перевода с подвижным составом // Железнодорожный транспорт. 2016. № 8. С. 64—66.
-