

А. А. Марков, д-р техн. наук, А. Г. Антипов, канд. физ.-мат. наук  
(ОАО «Радиоавионика», Санкт-Петербург, Россия)  
E-mail: amarkovspb@gmail.com

## ВОЗМОЖНОСТИ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЕФЕКТОСКОПИИ РЕЛЬСОВ

Приведены описание и результаты экспериментальных исследований новой намагничивающей системы вагона-дефектоскопа, реализующего магнитодинамический (МД) метод контроля. Показана высокая повторяемость сигналов от моделей дефектов на разных скоростях сканирования и выявляемость дефектов на значительной (до 15 мм) глубине залегания. Специфические особенности исследуемых сигналов позволили раскрыть дополнительные возможности МД-метода, пригодные при диагностике железнодорожной инфраструктуры.

**Ключевые слова:** рельсовая дефектоскопия, магнитодинамический метод, метод рассеяния магнитного потока, поперечная трещина.

A. A. Markov, A. G. Antipov (Radioavionica Corporation, Saint-Petersburg, Russia)

## THE FEATURES OF MFL OF RAILS

*Magnetic flux leakage (MFL) is a method of nondestructive testing applicable to ferromagnetic materials. MFL is used on railways to examine the rail tracks for flaws that could lead to the catastrophic failures. The method implies moving sources of static magnetic field (a magnetization system) act on the rail allowing one to detect anomalies inside the rail based on the field distortion near it.*

*The magnetization system, in which the magnetic flux penetrates into the rail through the wheels of NDT vehicle, with an extended interpole distance increases the magnetization depth at high speeds. This allows detecting deeper located rail flaws as compared with the traditional U-shaped magnetization, which is confirmed by the presented results of new magnetization system testing.*

*High reproducibility of MFL signals enables to automate the detection of connective elements of railway (joints, welds, switches etc.) with adequate reliability. The research shows that MFL also allows to realize the following issues: to effectively control rail welds, assuming the maintenance of time-ordered bank of signals; to monitor the temperature dependent state of the rail using special ferromagnetic labels; to measure the speed of the vehicle using signal correlation technique.*

**Keywords:** rail NDT, magnetic flux leakage, MFL, transverse crack.

Магнитный (магнитодинамический – МД) метод исследования состояния рельсов, установленных в железнодорожный путь, основан на воздействии движущимися источниками постоянного магнитного поля (намагничающей системой) на рельсы и выявлении структурных аномалий внутри рельса поискажениям картины поля вблизи него. За рубежом этот метод известен как метод рассеяния магнитного потока (MFL) [1].

Исторически магнитодинамический метод был первым методом, массово применявшимся в скоростной дефектоскопии рельсов в России [2]. За многие годы эксплуатации он доказал свою эффективность. В отдельных, часто в экстремальных, случаях магнитный канал вагонов-дефектоскопов является единственным, своевременно обнаруживающим дефекты критических размеров.

При разработке в 1994 – 1997 гг. первого в России вагона-дефектоскопа, базирующегося одновременно на двух физических принципах – ультразву-

ковом и магнитодинамическом, была поставлена задача обеспечения более глубокого промагничивания рельса на скоростях контроля вплоть до 80 км/ч и в перспективе до 120 км/ч [3]. Эта задача успешно решена, и новая система позволяет выявлять дефекты, залегающие на достаточно большой глубине под поверхностью головки рельса, в сочетании с высокой скоростью движения вагона.

Ключевым отличием совмещенного вагона с точки зрения магнитного метода исследования состояния рельсов было использование новой системы намагничивания с увеличенным межполюсным расстоянием. Увеличенное межполюсное расстояние позволяет компенсировать влияние вихревых токов, возникающих в рельсе при движении намагничающей системы относительно рельса и препятствующих проникновению магнитного поля внутрь проводящего ферромагнитного материала. Тем самым обеспечивается получение информации о более глубоко заложенных дефектах. Увеличение

межполюсного расстояния не привело к необходимости использования более мощных электромагнитов в силу более эффективного способа инъекции магнитного потока в рельс через колеса дефектоскопической тележки (рис. 1).

Электромагниты на осях колесных пар с магнитодвижущей силой 40 кА на каждой из осей обеспечивают поток в рельсе в статическом состоянии около 90 мВб (рис. 2). Если намагничающая система неподвижна, поле распределяется практически однородно по сечению рельса – величина индукции составляет порядка 1 Тл. При движении картина распределения поля по сечению рельса существенно отличается: если шейка рельса намагничивается целиком, то в центре головки и подошвы рельса из-за влияния вихревых токов образуются области практически не намагниченного ферромагнетика. Площадь этих областей увеличивается по мере роста скорости и приближении к наезжающему полюсу намагничающей системы. Именно поэтому при высоких скоростях движения (80 км/ч и выше) для того, чтобы получить информацию о глубоко расположенных дефектах, необходимо иметь достаточно большое межполюсное расстояние. Если межполюсное расстояние мало, то за время взаимодействия движущейся намагничающей системы с неподвижной областью рельса последняя не успевает намагнититься на сколь-либо существенную глубину, что исключает возможность получения информации об имеющихся там дефектах. Так, предельная глубина выявления дефектов при использовании старой П-образной намагничающей системы с межполюсным расстоянием 80 см на скорости 80 км/ч составляла 4 мм [2].

Складывающуюся ситуацию с намагничиванием проводящего объекта контроля движущейся намагничающей системой иллюстрирует рис. 3. Показаны результаты расчета распределения магнитной индукции в ферромагнетике с проводимостью 1 МСм/м, над которым движется намагничающая система со скоростью 10 м/с. Расчеты двумерной модели проводились относительно векторного потенциала магнитного поля методом конечных разностей. Видно, что глубина, на которую попало проникло в проводящий ферромагнетик, у наезжающего полюса мала и лишь при приближении к отъезжающему полюсу увеличивается. Грубо оценить глубину проникновения от расстояния до наезжающего полюса можно линейной зависимостью.

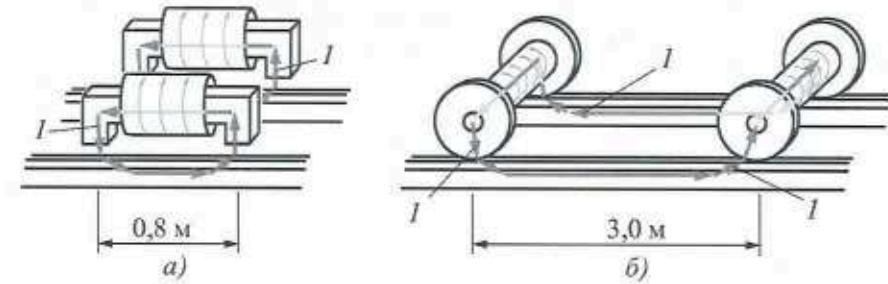


Рис. 1. Схемы намагничивающих систем старого (а) и нового (б) типов (стрелками I показано направление создаваемого магнитного потока)

Если считать зависимость между глубиной проникновения магнитного поля и расстоянием до наезжающего полюса намагничающей системы линейной, то можно предположить, что при увеличении в 3 раза межполюсного расстояния предельная глубина выявления повреждений рельсов с использованием новой намагничающей системы должна вырасти до 12...15 мм. Эти утверждения в целом подтверждаются результатами испытаний намагничающей системы, в ходе которых дефектоскопический вагон неоднократно проезжал с различной скоростью по одному и тому же участку



Рис. 2. Тележка совмещенного дефектоскопического комплекса для контроля рельсов, установленных в путь: 1 – электромагниты на осях колесных пар; 2 – магнитный датчик



Рис. 3. Распределение магнитной индукции в ферромагнетике, формируемое движущейся намагничающей системой

рельсового пути с искусственно изготовленными дефектами. Результаты испытаний приведены в следующем разделе.

Важной особенностью магнитодинамического метода контроля является высокая воспроизводимость сигналов. Дефектоскопические данные в

большей степени зависят от состояния объекта контроля, нежели от иных, зачастую неконтролируемых факторов, таких, скажем, как качество акустического контакта при ультразвуковом контроле. Поэтому если состояние рельса не изменилось, сигналы магнитного канала будут воспроизводиться практически без искажений на протяжении нескольких сеансов контроля, даже разнесенных существенно во времени. Математическая воспроизводимость выражается высоким коэффициентом взаимной корреляции сигналов, полученных от одного и того же объекта в ходе разных сеансов. На основании этой особенности в последнем разделе предложено несколько способов расширения функциональных возможностей мобильного дефектоскопического средства за счет более эффективного использования сигналов магнитодинамического метода контроля.

#### Результаты испытаний новой намагничающей системы

В 2012 г. на железнодорожном тупике полигона «Первомайское» Северо-Кавказской железной дороги ОАО «РЖД» были проведены испытания совмещенного дефектоскопического вагона, оснащенного намагничающей системой на осях колесных пар. Намагничающую систему с магнитными датчиками перемещали несколько раз с различной скоростью по участку железнодорожного пути с искусственно созданными повреждениями, имитирующими естественные дефекты, в том числе поперечные и продольные трещины головки рельсов. Вагон проезжал указанный участок пути со скоростями 30, 40, 50, 60 км/ч, причем для каждой скорости было выполнено по пять отдельных проездов.

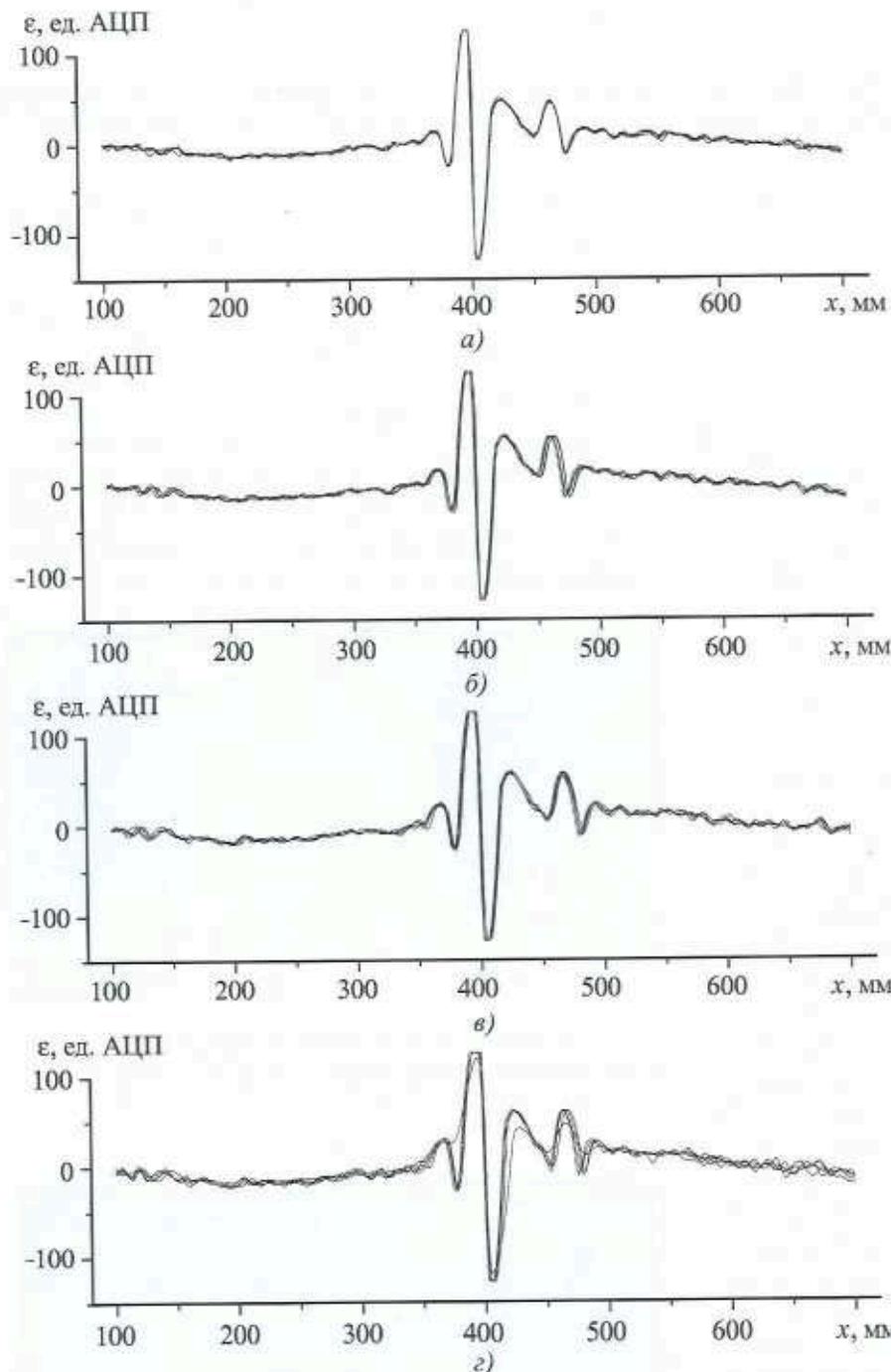


Рис. 4. Сигналы от поперечной трещины с выходом на поверхность глубиной 8 мм при различных скоростях движения. Для каждой скорости выполнено по пять измерений:

а – 30 км/ч; б – 40 км/ч; в – 50 км/ч; г – 60 км/ч; ед. АЦП – единицы аналогово-цифрового преобразователя (АЦП)

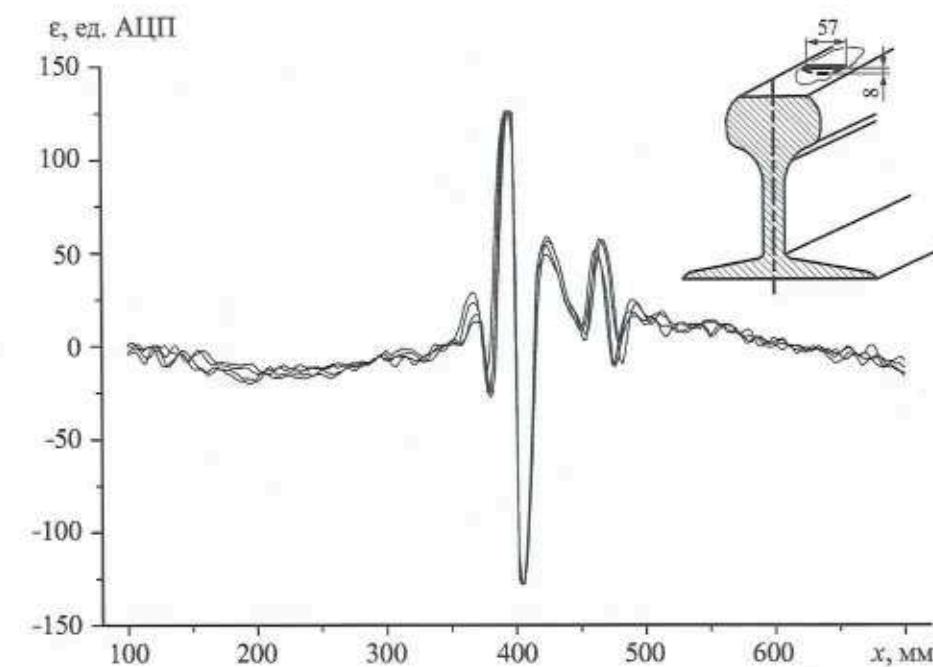


Рис. 5. Усредненные по пяти измерениям сигналы от поперечной трещины глубиной 8 мм (скорости 30, 40, 50 и 60 км/ч)

Для регистрации данных магнитодинамического метода использовали штатный индукционный датчик вагона-дефектоскопа, представляющий собой многовитковую катушку, фиксирующую изменение продольной компоненты индукции на расстоянии 4 мм от поверхности катания рельса.

На рис. 4 и 5 показаны сигналы  $\epsilon$  от поперечного пропила головки рельса глубиной 8 мм со стороны верхней грани на месте пробоковки – поверхностного дефекта естественного происхождения. Рис. 4 отображает все полученные сигналы (для каждой из скоростей по пять отдельных графиков), на рис. 5 сведены сигналы, усредненные по пяти измерениям для каждой скорости. Крупный положительно-отрицательный импульс соответствует пропилу, остальные наблюдаемые импульсы на расстоянии до 10 см от основного порождены поверхностными повреждениями. Амплитуда сигнала от данного дефекта весьма велика, а форма практически не зависит от скорости. Действительно, сигнал формируется возмущением магнитного поля на верхней грани головки рельса, которая находится в непосредственной близости от датчика и промагничивается одинаково хорошо при любых скоростях движения. Поэтому и конфигурация поля рассеяния, фиксируемая датчиком вблизи поверхности катания рельса, не претерпевает существенных изменений с увеличением скорости.

На рис. 6 и 7 отображены сигналы от продольного горизонтального пропила головки рельса, имитирующего горизонтальную трещину (дефект типа 30 по действующей на ОАО «РЖД» НТД). Пропил выполнен с нерабочей боковой грани головки, его максимальная глубина составляла 22 мм, длина около 10 см; верхняя грань пропила находилась в 12 мм от поверхности катания, нижняя – в 15 мм. На всех графиках имеется отчетливый отклик от повреждения, но форма сигнала зависит от скорости движения. Если положительный импульс, соответствующий окончанию пропила, сохранял форму на скоростях 30...60 км/ч, причем амплитуда сигнала дифференциального индукционного датчика возрастала с увеличением скорости, то характер сигнала от начала пропила существенно менялся. Подобные изменения свидетельствуют о том, что различные части повреждения намагничиваются по-разному в зависимости от скорости.

На рис. 8 и 9 представлены сигналы еще от одного дефекта искусственного происхождения – в боковой грани рельса параллельно поверхности катания просверлено отверстие. Ось отверстия находится в 20 мм от верхней грани рельса, радиус изменяется в пределах 6...8 мм (в зависимости от глубины), полная глубина сверления составляла 60 мм. Отверстие имитировало поперечную трещину головки рельса

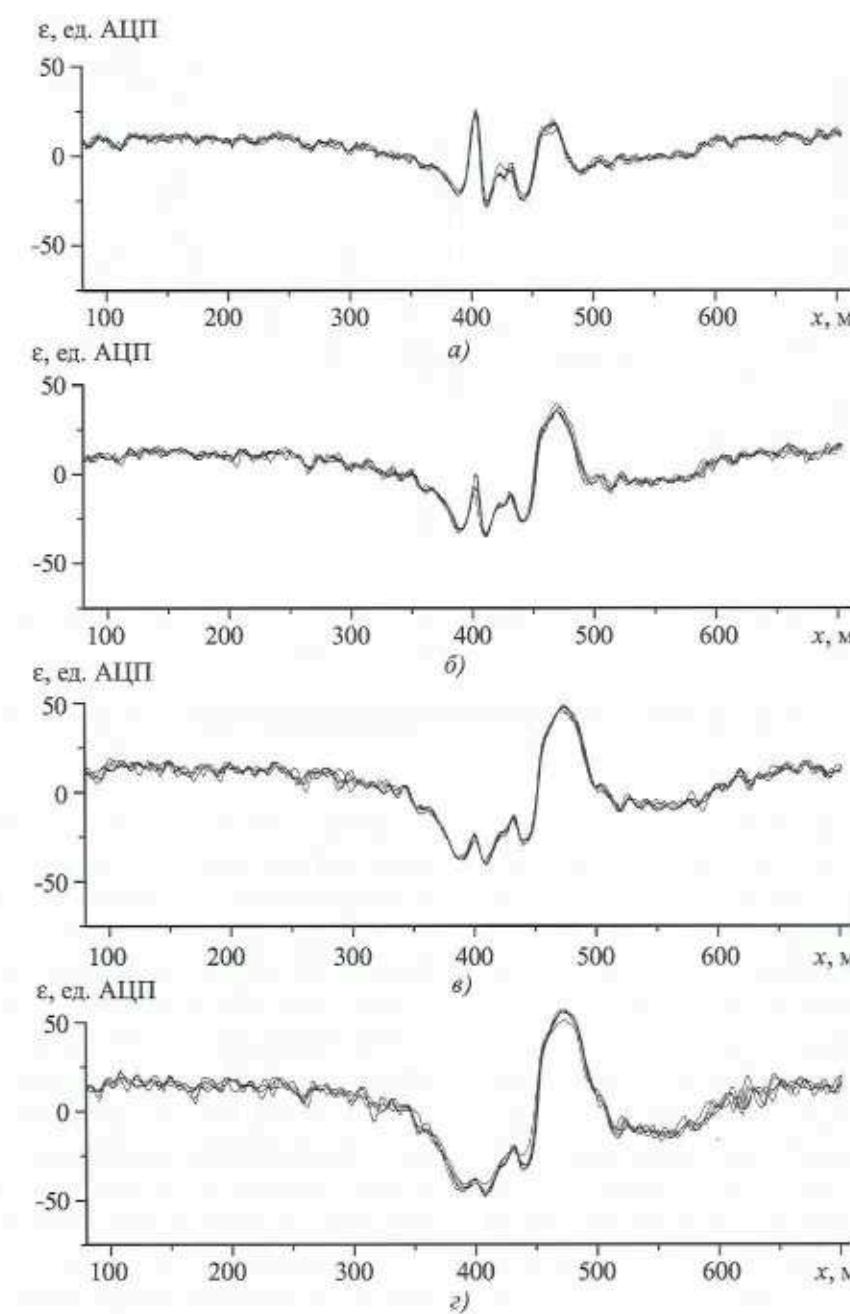


Рис. 6. Сигналы от продольной горизонтальной трещины на глубине 13 мм при различных скоростях движения. Для каждой скорости выполнено по пять измерений:  
а – 30 км/ч; б – 40 км/ч; в – 50 км/ч; г – 60 км/ч

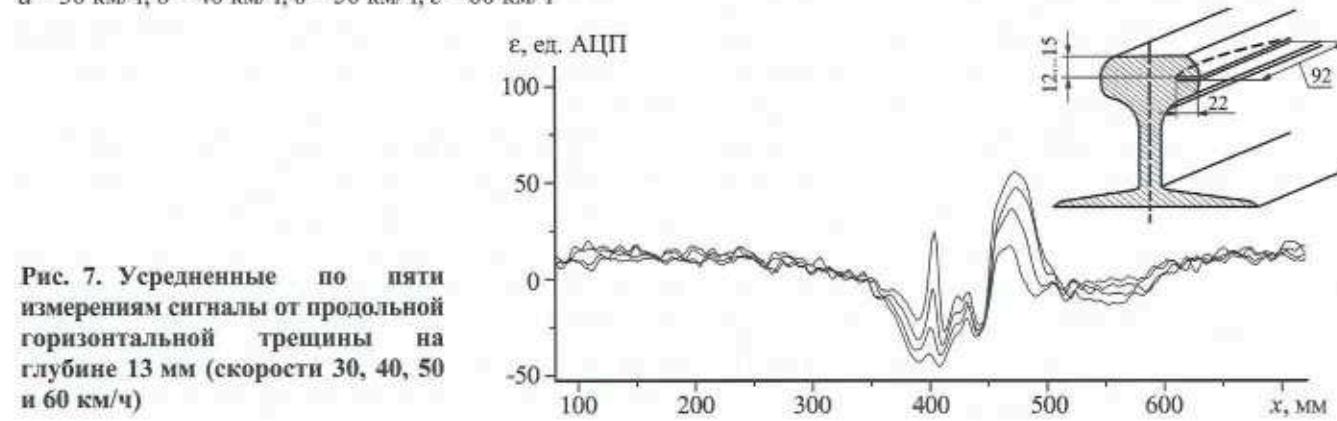


Рис. 7. Усредненные по пяти измерениям сигналы от продольной горизонтальной трещины на глубине 13 мм (скорости 30, 40, 50 и 60 км/ч)

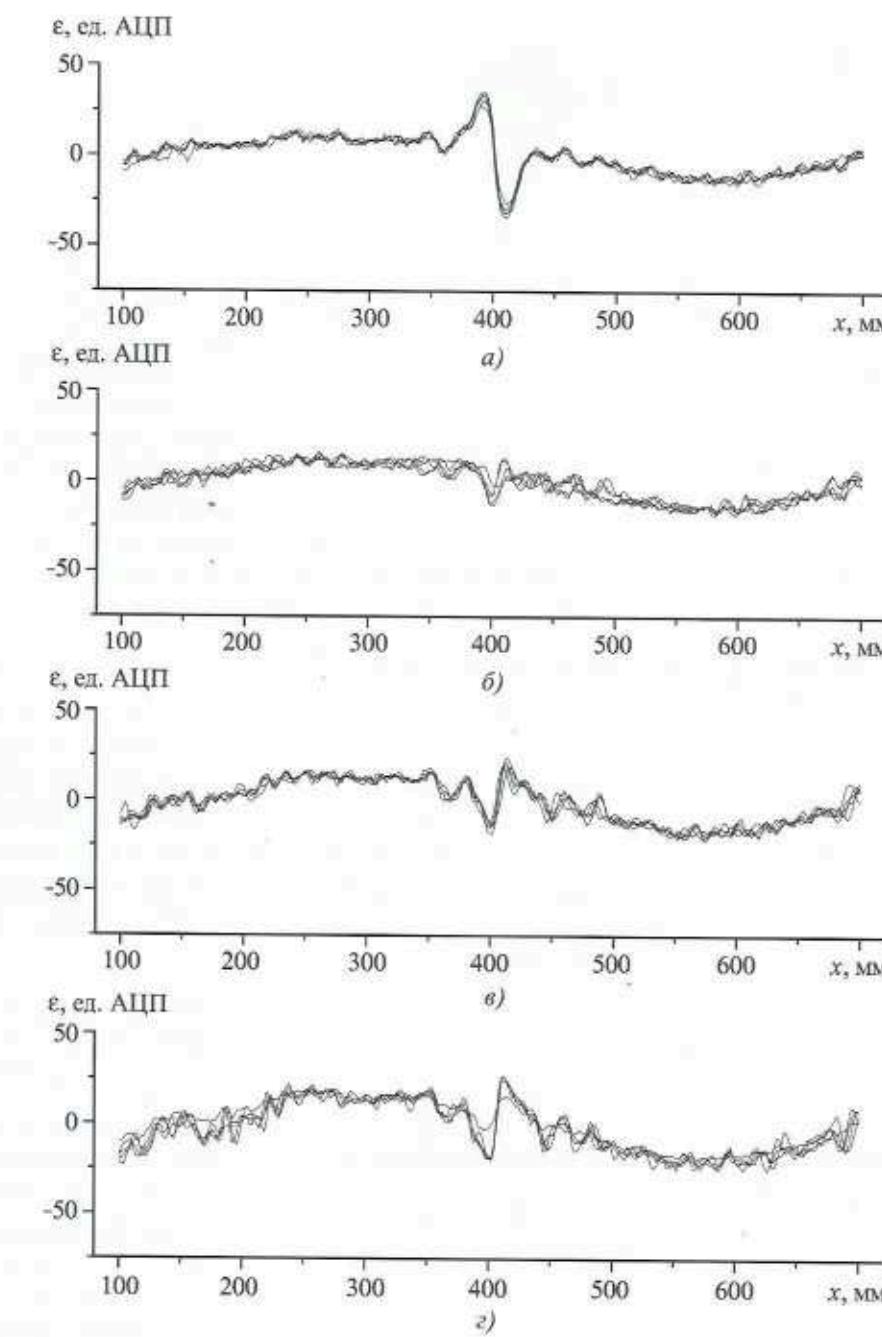


Рис. 8. Сигналы от сверления боковой грани в 20 мм от поверхности катания рельса при различных скоростях движения. Для каждой скорости было выполнено по пять измерений:  
а – 30 км/ч; б – 40 км/ч; в – 50 км/ч; г – 60 км/ч

высотой ~7 мм и глубиной залегания ~16 мм под поверхностью катания (площадь поражения головки рельса составляет около 15 %). То что профиль отверстия отличается от профиля поперечной трещины, вряд ли играет существенную роль, поскольку основным параметром с точки зрения магнитного метода является площадь поперечного сечения, а не толщина препятствия в продольном направлении.

На скорости 30 км/ч стабильно наблюдали предсказуемый положительно-отрицательный импульс. Однако при более высоких скоростях движения вагона картина менялась – амплитуда импульса уменьшалась, и он менял полярность. Очевидно, что при таких скоростях фактор вихревых токов становится определяющим при формировании сигнала для столь глубоко залегающих дефектов.

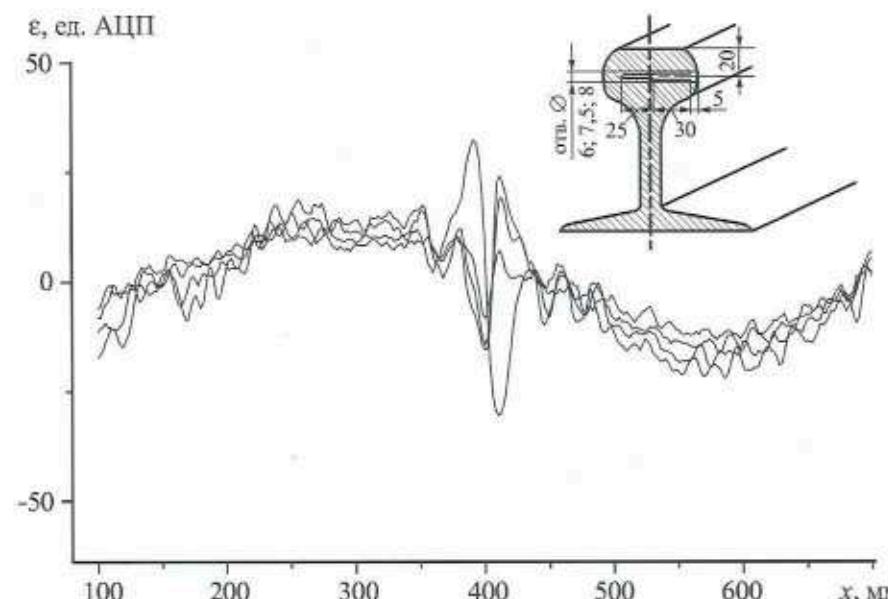


Рис. 9. Усредненные по пяти измерениям сигналы от сверления боковой грани рельса (скорости 30, 40, 50 и 60 км/ч)

Можно предположить, что при еще более высоких скоростях движения, когда глубина промагничивания в зоне, где помещен датчик, будет меньше глубины залегания дефекта, сигнал исчезнет окончательно.

Отметим, что во всех измерениях, выполненных на одинаковой скорости, наблюдается высокая

контроля – рельса. Таким образом, сравнение сигналов, полученных от одного и того же объекта в разное время, позволяет получить важную информацию об изменении (или отсутствии изменений) в его состоянии.

#### Новые возможности метода применительно к дефектоскопии рельсов

Дополнительные исследования, проведенные авторами данной статьи, позволили раскрыть ряд новых возможностей МД-метода, пригодных при диагностике железнодорожной инфраструктуры.

**Автоматизация анализа сигналов от конструктивных элементов пути и дефектов.** Высокая воспроизводимость сигналов магнитного канала позволяет автоматизировано выделять многие конструктивные элементы рельсового пути (болтовые и сварные стыки, стрелочные переводы) с достаточной для практики достоверностью [5]. Последовательность конструктивных элементов используется при формировании топологии (карты) рельсового пути (рис. 10), которая может

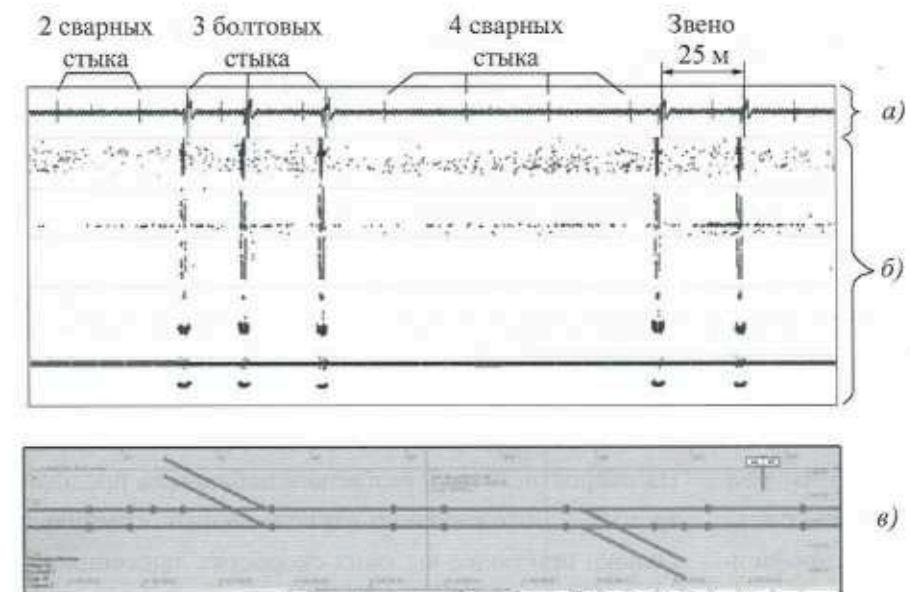


Рис. 10. Дефектограмма участка рельсового пути протяженностью около 200 м со сварными и болтовыми стыками:  
а – сигналы магнитного канала; б – сигналы ультразвуковых каналов;  
в – сформированная по дефектоскопическим сигналам топография пути

быть использована как при со-поставительном анализе сигналов контроля, так и при разработке специфических алгоритмов для выделения сигналов в отдельных зонах рельсовой нитки.

#### Формирование топограммы пути.

Повторяющиеся через каждые 25 м сигналы от сварных стыков рельсов с возможностью их автоматического выделения совместно с сигналами от болтовых стыков (через 800 м) и стрелочных переводов позволяют формировать наиболее достоверную на настоящее время «топограмму» рельсового пути [6]. Это особенно актуально на участках бесстыкового пути с протяженностью плети «до перегона» (на участках Санкт-Петербург – Москва – до 35 км), где «видимые» магнитным методом сварные стыки являются своеобразным репером для «привязки» обнаруженных диагностическими средствами неисправностей рельсового пути.

С точки зрения навигации диагностическая карта в блоке хранения вагона-дефектоскопа может содержать сетку следующих координатных меток:

- GPS/ГЛОНАСС с точностью до нескольких метров;
- километровые и пикетные столбы с точностью до нескольких метров (при наличии соответствующих аппаратных или ручных средств обнаружения и фиксации);
- сварные стыки с периодичностью 12,5 или 25 м и точностью до нескольких миллиметров в точке стыка;
- рельсовые подкладки (шпалы) с периодичностью 30...55 см и точностью до десятка сантиметров;
- датчик пути (одометр) с точностью  $\pm 10\%$ .

Кроме того, в диагностической карте сохраняются все сигналы МД-метода контроля. Навигационная привязка к рельсу и его конструктивным особенностям является регулярной и наиболее точной по сравнению с любыми искусственно созданными магнитными, радио- и другими маркерами и может быть использована для решения разнообразных задач исследования железнодорожной инфраструктуры.

#### Формирование паспорта сварного стыка.

Высокая повторяемость сигналов от сварных стыков рельсов позволяет автоматизировать процесс выделения этих сигналов на дефектограммах контроля рельсовой плети (с вероятностью правильно-го обнаружения до 97 %) [7].

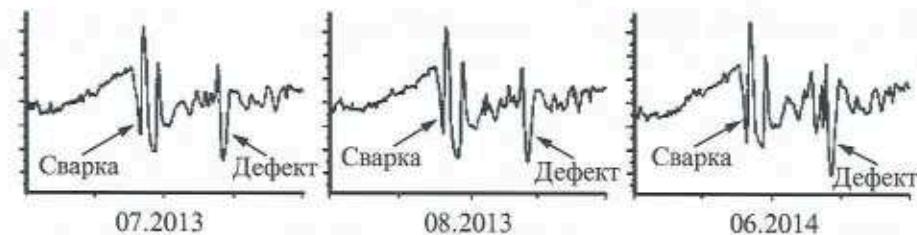


Рис. 11. Форма сигнала от сварного стыка рельса и изменение состояния поверхностного дефекта рядом со стыком в течение года

Однотипные изображения дефектограмм магнитного канала в зоне сварных стыков рельсов (рис. 11) свидетельствуют о стабильной технологии сварки конкретной рельсовой плети (режимы сварочного аппарата, индукционной закалки и даже процессов выпрямки и шлифовки после сварки). При последовательных проездах вагонов-дефектоскопов с магнитным каналом наблюдается высокая повторяемость сигналов от сварных стыков рельсов (для большинства стыков в течение года и более коэффициент корреляции сигналов составляет более 0,93).

Изменение формы сигнала от сварного стыка во времени свидетельствует о появлении нарушений свойств металла рельса в зоне конкретной сварки. Отличия одной дефектограммы в последовательности сигналов от сварных стыков могут быть вызваны:

- нарушениями технологии изготовления данного стыка, что для единичного стыка маловероятно;
- появлением внутреннего дефекта в зоне головки рельсов (код дефекта 26.3);
- появлением неровности на поверхности катания (код 46.3) (смятие головки из-за неравномерности механических свойств металла в месте сварного стыка);
- механическим повреждением поверхности катания рельса, в том числе и колесами проходящего подвижного состава.

Резкое изменение формы сигналов магнитного канала вагона-дефектоскопа от группы сварных стыков по сравнению с формами сигналов основной массы стыков может свидетельствовать о значительных изменениях в технологии изготовления рельсовой плети и требует выяснения причин этих изменений.

Наблюдая за изменением формы сигнала на дефектограмме от зоны сварного стыка во времени (от проезда к проезду вагона-дефектоскопа), можно проследить динамику развития дефектов и свое-

временно принять меры по недопущению нарушений целостности рельсового пути из-за дефектов сварных стыков рельсов (см. рис. 11).

В целях снижения изломов рельсов из-за дефектов в зоне сварных стыков (на сети дорог ОАО «РЖД» за последние 8 лет от 30 до 50 % из всех изломов рельсов) можно предложить создать на каждый сварной стык своеобразный «магнитный паспорт» стыка.

Автоматизированное сопоставление сигналов магнитного канала от проезда к проезду и своевременная фиксация появления изменений в форме сигнала позволит оперативно селектировать аномальные сварные стыки и назначать дополнительные исследования выделенного стыка другими методами (визуальный осмотр, измерение линейности поверхности катания, тщательный контроль с помощью ультразвуковых методов, например многоканальным дефектоскопом МИГ-УКСМ [8, 9]).

**Измерение скорости движения вагона-дефектоскопа.** Одним из побочных эффектов МД-метода является возможность измерения скорости вагона-дефектоскопа [10]. Используя второй индукционный датчик, размещенный на определенном расстоянии от основного, корреляционным методом можно достаточно точно определить скорость движения.

**Мониторинг температурной сдвиги рельсовой плети.** Одним из наиболее острых вопросов для бесстыкового пути является его эксплуатация в период значительных изменений температуры воздуха, которые вызывают рост продольных напряжений в рельсовых плетях. Температурное сжатие в зимнее время может привести к разрыву рельсовой плети, а нагрев в теплый период обуславливает растягивание рельсовой плети, изгибы (угоны) рельсовых плетей, т.е. изменение их геометрии, вызывающее сход подвижного состава с рельсами. Используя магнитный канал вагона-дефектоскопа, весьма простыми способами можно своевременно обнаружить начинаяющуюся температурную деформацию рельсовой плети. Для этого на нерабочей грани головки рельса около специальных маячных шпал необходимо закрепить (прикрепить) небольшие ферромагнитные полоски, а на закрепленных маячных шпалах установить металлические кронштейны высотой до уровня головки рельса [11]. Индукционный датчик вагона при очередном проезде четко фиксирует сигналы от метки и кронштейна. По расстоянию между этими сигналами можно зафиксировать сдвиг рельсовой плети и принять упреждающие меры.

**Синергетический эффект.** Объединение ультразвуковых, магнитных и визуальных методов в одном дефектоскопическом комплексе [12] позволяет повысить точность локализации обнаруженных дефектов на рельсовом пути и повышает достоверность их обнаружения за счет *синергетического эффекта*.

### Выводы

1. Магнитодинамический метод является полноценным методом неразрушающего контроля, позволяющим надежно обнаруживать многие дефекты в головке рельсов (до 50 % из всех обнаруживаемых).

2. В отличие от ультразвуковых методов МД-метод не требует контактирующей жидкости и позволяет контролировать загрязненные и изношенные рельсы.

3. По расчетным данным, реализуемая скорость контроля рельсов МД-методом может составлять 120 км/ч и более.

4. Предложенная система намагничивания обеспечивает новые качества МД-метода:

- обнаружение дефектов, верхний край которых залегает на глубине до 15 мм от поверхности катания, что почти в 4 раза глубже, чем с традиционной системой с П-образным магнитом;

- возможность обнаружения внутренних поперечных трещин на фоне поверхностных микротрещин (Head Checking);

- высокую стабильность и повторяемость сигналов;

- возможность контроля за развитием (мониторингом) отдельных дефектов в рельсах;

- малую зависимость формы сигналов от скорости контроля.

5. Указанные в п. 4 особенности метода позволяют:

- автоматизировать процесс выделения сигналов от конструктивных элементов пути;

- за счет поля рассеяния фиксировать шпальные подкладки, другие конструктивные элементы и обеспечивать точную привязку сигналов от дефекта к реальному пути;

- формировать истинную топограмму пути, пригодную для использования при проведении работ по обслуживанию путевой инфраструктуры.

6. В процессе исследований МД-метода с новой намагничивающей системой выявлены дополнительные возможности метода:

- измерение скорости движения дефектоскопической системы путем корреляционной обработ-

ки сигналов с двух последовательно расположенных по длине рельса индукционных датчиков;

- контроль и предупреждение температурных сдвигов рельсовой плети по сигналам от ферромагнитных меток на нерабочей грани головки рельса и на неподвижных (маячных) шпалах;

- мониторинг состояния сварных стыков рельсов.

7. Стабильность форм сигналов от сварного стыка на магнитограмме в течение нескольких лет позволяет автоматизировано отслеживать состояние сварки и при появлении аномалий своевременно реагировать на появившиеся дефекты в зоне термического влияния.

8. Реализация МД-метода в комплексе с другими методами неразрушающего контроля (ультразвуковые, визуальный) за счет синергетического эффекта повышает вероятность обнаружения сложных дефектов.

### Библиографический список

1. Bubenik T. A., Nestleroth J. B., Eiber R. J., Saffell B. F. (1992). *Magnetic Flux Leakage (MFL) technology for natural gas pipeline inspection*. Chicago: Gas Research Institute, 140 c.
2. Гурвич А. К., Довнар Б. П., Козлов В. Б. и др. Неразрушающий контроль рельсов при их эксплуатации и ремонте / под ред. А. К. Гурвича. М.: Транспорт, 1983. 318 с.
3. Марков А. А. Проблемы скоростной дефектоскопии железнодорожных рельсов, уложенных в путь // Радиоэлектроника и связь. 1999. № 1. С. 23 – 38.
4. Антипов А. Г., Марков А. А. Оценка глубины выявления поперечных трещин магнитодинамическим методом в дефектоскопии рельсов // Дефектоскопия. № 9. 2014. С. 3 – 9.
5. Антипов А. Г., Марков А. А. Автоматизация анализа сигналов магнитодинамического контроля рельсов // В мире неразрушающего контроля. 2014. № 2. С. 25 – 30.
6. Пат. на изобр. № RU 2521095. Способ диагностики рельсового пути / А. А. Марков, Е. А. Кузнецова, А. Г. Антипов, А. Ю. Веревкин. Опубл. 27.06.2014 // Бюл. № 18.
7. Марков А. А., Антипов А. Г. Корреляционный анализ сигналов контроля сварных стыков магнитодинамическим методом // В мире неразрушающего контроля. 2015. № 2. С. 74 – 77.
8. Пат. на изобр. RU 2309402. Способ ультразвукового контроля сварных стыков рельсов / А. А. Марков. Опубл. 22.11.2005.
9. Приезжев С. С., Марков А. А., Козыяков А. Б. Контроль сварных стыков на Куйбышевской дороге // Путь и путевое хозяйство. 2007. № 5. С. 2 – 4.
10. Пат. RU 127703. Магнитный дефектоскоп – измеритель скорости / А. А. Марков, А. Г. Антипов. Опубл. 10.05.2013 // Бюл. 2013. № 13.
11. Пат. RU 2578897. Способ оценки угона рельсовой плети / А. А. Марков, А. Г. Антипов. Опубл. 27.03.2016 // Бюл. № 18.
12. Марков А. А., Политай П. Г., Маховиков С. П. и др. Комплексный анализ состояния рельсового пути с помощью нового вагона-дефектоскопа «АВИКОН-03М» // В мире неразрушающего контроля. 2013. № 3. С. 74 – 79.

### References

1. Bubenik T. A., Nestleroth J. B., Eiber R. J., Saffell B. F. (1992). *Magnetic Flux Leakage (MFL) technology for natural gas pipeline inspection*. Chicago: Gas Research Institute, 140 c.
2. Gurvich A. K. (Ed.), Dovnar B. P., Kozlov V. B. et al. (1983). *Rail NDT evaluation during operational process and repair*. Moscow: Transport.
3. Markov A. A. (1999). Problems of high-speed rails inspection laid in the way. *Radioelektronika i sviaz'*, (1), pp. 23-38.
4. Antipov A. G., Markov A. A. (2014). Evaluation of transverse cracks detection depth in MFL rail NDT. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 50(8), pp. 481-490.
5. Antipov A. G., Markov A. A. (2014). Automation of signal analysis at magnetic flux leakage rail inspection. *V mire NK*, 64(2), pp. 25-30.
6. Markov A. A., Kuznetsova E. A., Antipov A. G., Verevkin A. J. (2014). Railway line diagnosis method. Patent No. RU2521095. Russian Federation.
7. Antipov A. G., Markov A. A. (2015). Application of correlation analysis for weld joint inspection by magnetic flux leakage method. *V mire NK*, 68(2), pp. 74-77.
8. Markov A. A. (2005). An ultrasonic technique of rail welds testing. Patent No. RU2309402. Russian Federation.
9. Priezhev S. S., Markov A. A., Koz'yakov A. B. (2007). Welded joints testing on Kuibishev railways. *Put' i Putevoe Hozyaistvo*, (5), pp. 2-4.
10. Markov A. A., Antipov A. G. (2013). Magnetic NDT vehicle as a speed measurement device. Patent No. RU127703. Russian Federation.
11. Markov A. A., Antipov A. G. (2016). A technique of rail section shift evaluation. Patent No. RU2015108091. Russian Federation.
12. Markov A. A., Politai P. G., Makhovikov S. P., Alekseev D. V., Kuznetsova E. A. (2013). Comprehensive railway testing using new Avikon-03M NDT vehicle. *V mire NK*, 61(3), pp. 74-79.