

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАГНИТНОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗАЗОРОВ В БОЛТОВЫХ СТЫКАХ РЕЛЬСОВОГО ПУТИ

© 2023 г. А.Г. Антипов¹, А.А. Марков^{2,*}, Е.А. Максимова²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Россия 199034 Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

² АО «Радиоавионика», Россия 190005 Санкт-Петербург, Троицкий пр., 4Б
E-mail: *anarmarkov@gmail.com

Поступила в редакцию 23.01.2023; после доработки 20.04.2023

Принята к публикации 05.05.2023

Периодическая оценка величин зазоров болтовых стыков рельсов позволяет прогнозировать надежность бесстыкового пути и предотвратить его температурные деформации. Цель исследований — поиск простого и надежного способа оценки стыковых зазоров, позволяющего определять искомые величины при высокоскоростном сканировании в автоматическом режиме в широком диапазоне температур. Приведен краткий обзор технических решений и методик оценки стыковых зазоров, основанных на разных физических принципах. В предлагаемом способе использован метод вытеснения магнитного потока (MFL) с размещением электромагнитов на осях колесных пар двухосной тележки. Такие системы намагничивания в настоящее время применяются на вагонах-дефектоскопах и обеспечивают стабильный магнитный поток в контролируемых рельсах.

С помощью трехмерной магнитоэлектростатической модели отрезка рельса с болтовым стыком исследованы характеристики полей рассеяния при изменении величины стыкового зазора во всем практическом диапазоне. Отобраны характеристики, наиболее чувствительные к изменению зазора и по которым можно установить его величину. При малых значениях величин зазоров в качестве информативного параметра предложено использовать амплитуду сигнала магнитного датчика, а при больших зазорах — расстояние между экстремумами сигнала. Результаты компьютерного моделирования влияния величины стыкового зазора на параметры магнитного сигнала от него качественно совпадают с результатами натурных измерений, выполненных при скоростях контроля до 60 км/ч.

Ключевые слова: магнитный метод, рельсовая дефектоскопия, разрыв рельса, болтовой стык, стыковой зазор, бесстыковой путь, намагничивающая система, магнитные датчики.

DOI: 10.31857/S0130308223060027, EDN: ZVSIZQ

1. АКТУАЛЬНОСТЬ

Безопасность движения поездов как по звеньевому, так и по «бесстыковому» рельсовому пути в значительной мере зависит от состояния болтовых стыков.

Бесстыковой путь состоит из сварных рельсовых плетей, обычно — длиной 800 м, которые разделяются уравнительными пролетами (две-три пары разрядных рельсов на обеих нитках пути, скрепленных болтовыми стыками), изолирующими стыками, зонами стрелочных переводов и станционных звеньевых путей [1]. Концы сварной плети изменяют свою длину в зависимости от температуры окружающего воздуха. Кроме того, на бесстыковых путях имеются и места временного восстановления плети (при обнаружении дефекта в рельсе участок плети длиной 8—11 м вырезается и устанавливается временный рельс на два болтовых стыка).

Несмотря на укладку бесстыкового пути (более 75 % главных путей), на сети дорог ОАО «РЖД» к 2022 г. все еще имеется более 9,5 млн. болтовых стыков (рис. 1).

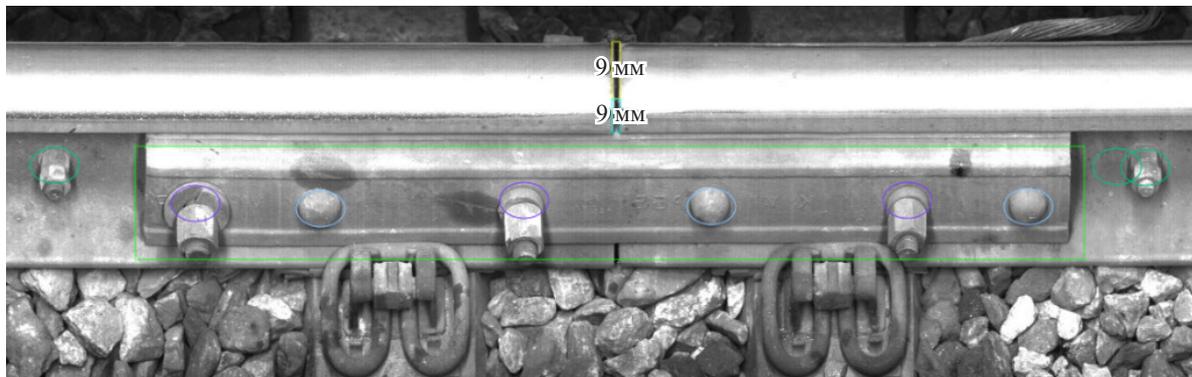


Рис. 1. Болтовой стык рельсов в стальных накладках со стыковым зазором 9 мм.

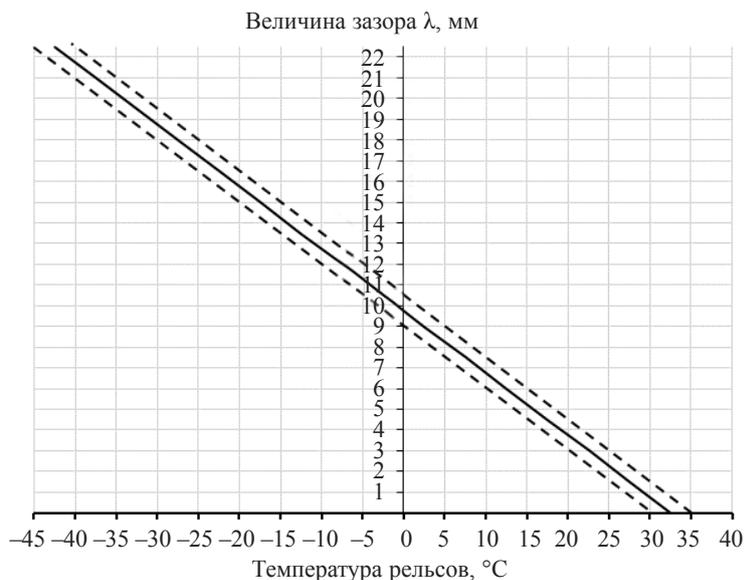


Рис. 2. Номинальные величины стыковых зазоров в болтовых стыках рельсов длиной 25 м.

В холодное время года рельсы укорачиваются, а в жаркое время — удлиняются. В болтовых стыках рельсов при их укладке оставляют стыковые зазоры с тем, чтобы при колебаниях температуры рельсы могли изменить свою длину во избежание возникновения значительных температурных напряжений в сварных рельсовых плетях (летом — напряжений сжатия, зимой — растяжения).

На рис. 2, построенном по данным [1], показаны номинальные значения конструктивных зазоров λ от температуры рельсов для резко континентального климата (с годовой амплитудой температуры рельсов более 100 °C).

В теплое время года неконтролируемое температурное расширение рельсовой плети может привести к так называемому внезапному «выбросу» пути и к сходу подвижного состава с рельсов. По действующим нормам [1] для боковой устойчивости звеньевое пути в летнее время не допускается наличие более двух подряд нулевых зазоров для рельсов длиной 25 м или более четырех нулевых зазоров при рельсах длиной 12,5 м. При наличии нулевых зазоров движение поездов закрывают и немедленно приступают к исправлению пути. При низких температурах, для предупреждения разрыва рельсовых стыков на концах плети (из-за среза стыковых болтов, скрепляющих стык в накладках), зазоры не должны превышать 22 мм (для рельсов длиной 25 м с диаметрами отверстий 36 мм). До производства работ по регулировке зазоров скорости движения поездов ограничивают. Изменение суммы зазоров на 52 мм при трех уравнильных рельсах требует замены одного из них [2].

Периодическая оценка величин стыковых зазоров позволяет прогнозировать надежность рельсового пути и предотвратить нежелательные последствия при наступлении экстремальных и близких к ним температур. В зависимости от времени года возникают две принципиально разные задачи при мониторинге состояния стыковых зазоров: при низких температурах нельзя допускать увеличения стыковых зазоров более конструктивной величины, а при высоких положительных температурах — уменьшения зазоров до нулевых значений. При этом для практики не столь важны точные значения измеряемых величин, а важна динамика изменения зазоров во времени, особенно в период экстремальных изменений температур воздуха.

2. ВОЗМОЖНЫЕ МЕТОДЫ И ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ЗАЗОРОВ В БОЛТОВЫХ СТЫКАХ

Учитывая важность задачи мониторинга зазоров в болтовых стыках рельсов, в мировой практике предложены множество технических решений и методик, основанных на разных физических принципах.

В работе [3] предложен акустический способ обнаружения неисправностей рельсового пути, где по параметрам акустических импульсов, возникающих в результате механического удара колес подвижной единицы о кромки болтового стыка, оценивают величину стыкового зазора.

В способе обнаружения температурных напряжений в рельсах [4] одной из основных операций является определение стыкового зазора с помощью системы видеорегистрации болтовых стыков. На современных российских диагностических вагонах-путеизмерителях [5] и вагонах-дефектоскопах [6] установленные устройства сплошной видеорегистрации рельсового пути позволяют измерять величину стыковых зазоров. Существуют также предложения размещать устройства видеорегистрации для измерения зазоров в кабинах локомотивов поездов [7] и даже на беспилотных летательных аппаратах [8]. Однако зависимость получаемых фотоизображений рельсов от климатических условий (снег, дождь, тени на рельсах от объектов инфраструктуры), грубые ошибки из-за наплывов или сколов металла на концах рельсов, а также сложность автоматического распознавания изображений стыков, обуславливают низкую достоверность и надежность данных технических решений.

Весьма распространены устройства и способы оценки стыковых зазоров с помощью вихретоковых преобразователей [9—12]. Однако они требуют создания специальной аппаратуры, результаты значительно зависят от положения датчиков относительно поверхности катания рельса (величины подвеса датчиков) и обладают недостаточной достоверностью, преимущественно оценивая значительные (выше 26 мм) величины стыковых зазоров [13].

Достаточно новые способы обнаружения разрыва рельсового пути (например, [14]) с использованием укладываемых вдоль рельсов оптоволоконных кабелей требуют значительных первоначальных вложений и не обеспечивают возможность определения величин зазоров с требуемой точностью.

Таким образом, до настоящего времени специалисты, занимающиеся текущим содержанием рельсового пути, вынуждены регулярно проводить измерение стыковых зазоров вручную с помощью металлического мерного клина с миллиметровой шкалой. Эксплуатируемые на сети ОАО «РЖД» вагоны-путеизмерители с вихретоковой системой измерения позволяют надежно фиксировать только стыковые зазоры со значительным раскрытием [13]. В результате имеет место низкая достоверность и производительность ручных измерений и ограниченные возможности автоматизированных систем контроля искомых величин.

Целью настоящих исследований является поиск простого и надежного метода оценки зазоров болтовых стыков рельсов, позволяющего оценивать зазоры с высокой достоверностью в автоматическом режиме в широком диапазоне температур.

3. ОБОСНОВАНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

На российских железных дорогах многие годы успешно эксплуатируются мобильные диагностические комплексы — вагоны-дефектоскопы, реализующие магнитный метод контроля рельсов. Метод предполагает формирование в объекте контроля магнитного потока высокой плотности (1,0—1,2 Тл в статических условиях) при помощи внешних источников постоянного магнитного поля — намагничивающей системы. Сформированный магнитный поток рассеивается на несплошностях в объекте контроля, в результате чего вблизи поверхности последнего образуется возмущения магнитного поля, фиксируемые датчиками.

Магнитный метод показал высокую эффективность обнаружения поверхностных и внутренних дефектов в головке рельсов на глубине залегания до 20 мм при скоростях контроля до 60 км/ч [15]. Выявлена высокая воспроизводимость сигналов магнитного канала от различных конструктивных элементов рельсового пути (болтовых и сварных стыков рельсов, элементов стрелочных переводов и т.п.).

Наличие эффективной системы намагничивания критически важно при реализации магнитного метода, поскольку использование только остаточной намагниченности рельса, возникающей в магнитном поле Земли при периодических нагрузках, не приводит к появлению сигналов датчиков, достаточно стабильных и несущих в себе информацию о характеристиках несплошности [16]. Высокая воспроизводимость и устойчивость сигналов магнитного метода при контроле рельсов достигается благодаря оригинальной конструкции системы намагничивания. Система основана на использовании осей колесных пар подвагонной тележки в качестве сердечников электромагнитов, колеса тележки в таком случае играют роль магнитных полюсов [19]. Колеса прокатываются по контролируемым рельсам и инжектируют магнитный поток в объект контроля непосредственно через пятна контакта колесо—рельс.

Фиксацию магнитных полей рассеяния над конструктивными элементами и дефектными сечениями рельсов осуществляют с помощью магниточувствительных датчиков (индукционных ка-

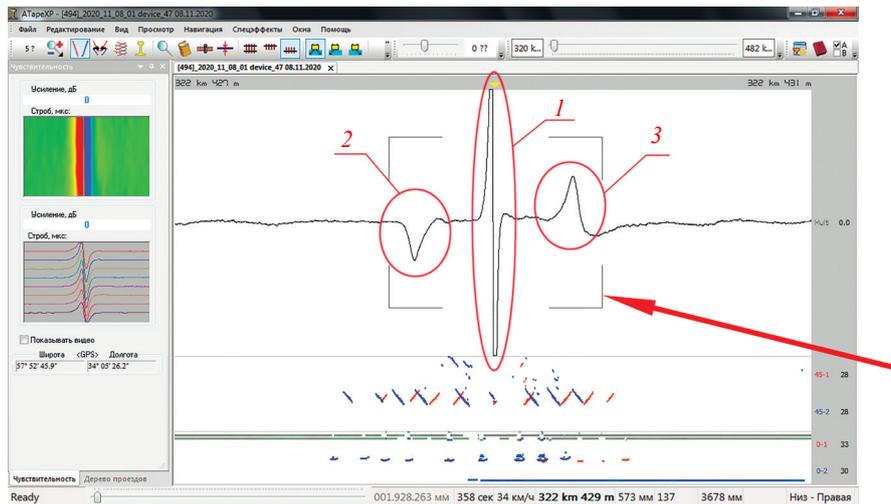


Рис. 3. Фрагмент реальной дефектограммы участка рельса длиной около 4 м (стрелкой показана автоматически распознанная программой зона болтового стыка):

1 — сигнал магнитного датчика от стыкового зазора; 2, 3 — импульсы от концов стыковых накладок (см. рис. 1).

тушек или датчиков Холла), расположенных над поверхностью катания рельса между полюсами электромагнитов вблизи заднего (относительно направления движения) колеса. В зоне болтового стыка в непосредственной близости от стыкового зазора происходит выброс распространяющегося в рельсе магнитного потока в воздух. Магниточувствительный датчик реагирует на это, формируя характерный сигнал значительной амплитуды на дефектограмме (рис. 3).

Попытки использования магнитного метода для обнаружения и оценки разрыва рельсов железнодорожного пути предпринимались и ранее [17, 18]. Однако они основаны на использовании в качестве информативного параметра величины магнитного потока в цепи, включающей в себя стыковой зазор. Поскольку магнитная цепь содержит элементы с плохо контролируемым и значительным магнитным сопротивлением, такие как зазор между полюсами намагничивающей системы и рельсом, при практической реализации подобного подхода возникают проблемы либо недостаточной стабильности показаний, либо недостаточной чувствительности. Мы предлагаем использовать иной способ определения ширины зазора болтового стыка, основанный на данных рассеяния магнитного потока на разрыве рельса. Иначе говоря, извлекать информацию об искомой ширине не из величины магнитного потока, а из характеристик распределения магнитного поля в окрестности зазора. Такой способ является традиционным для магнитного метода контроля, когда речь заходит об определении параметров дефектов, таких, например, как глубина залегания поперечных трещин головки рельса [19]. Принципиальная возможность оценки параметров дефектов, исходя из характеристик магнитного поля рассеяния, была обоснована теоретически еще в 60-х годах прошлого века при использовании моделей магнитных диполей [20, 21].

Положительные качества магнитного метода (всепогодность, стабильность и воспроизводимость сигналов и др.) и возможность автоматического распознавания сигналов от элементов рельсового пути делают задачу определения величины стыкового зазора по данным магнитного контроля вполне реализуемой. Для решения поставленной задачи сигналы магнитного метода контроля в зоне стыковых зазоров предварительно изучены на трехмерной компьютерной модели. После выбора тех параметров сигналов, которые содержат в себе наибольшую информацию о величине зазора, выполнена проверка возможности использования указанных параметров для определения ширины зазоров болтовых стыков в реальных условиях контроля.

4. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССЕЙЯНИЯ МАГНИТНОГО ПОТОКА В ЗОНЕ БОЛТОВОГО СТЫКА

Для выбора параметра сигнала магнитного датчика, наиболее информативного с точки зрения определения величины зазора, выполнено компьютерное моделирование процесса рассеяния магнитного потока в зоне болтового стыка. За основу взята трехмерная магнитостатическая модель, которая применялась ранее [15] для изучения рассеяния магнитного потока на поперечной

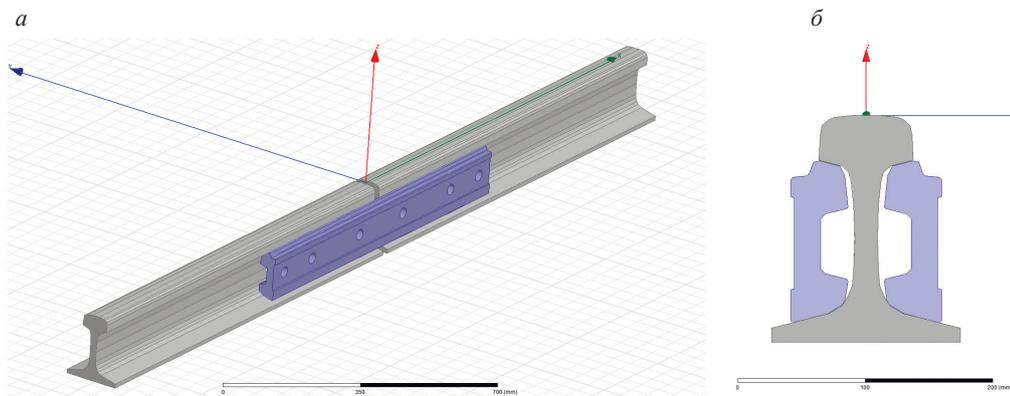


Рис. 4. Используемая при расчетах трехмерная модель:
a — рельс с зазором и накладками; *б* — вид с торца рельса.

трещине головки рельса. Однако модель дополнена рельсовыми накладками длиной 1 м, а вместо поперечной трещины головки в ней фигурировал поперечный разрыв рельса переменной ширины, затрагивающий головку, шейку и подошву рельса (см. рис. 4*а*, *б*). Разрыв рельса располагался ровно по центру накладки по продольной координате.

Как и в [15], рассматриваемая расчетная область представляла собой цилиндр. Диаметр цилиндра составлял 1 м, длина — 2,5 м. Ось цилиндра была сонаправлена направляющей рельса и находилась в продольной плоскости симметрии в 10 см ниже поверхности катания. На боковой поверхности цилиндра ставилось условие наличия только продольной, сонаправленной оси цилиндра составляющей вектора магнитной индукции. Величина напряженности магнитного поля на боковой поверхности цилиндра в воздухе задавалась равной 2000 А/м, что соответствует магнитной индукции в рельсе 1,1—1,2 Тл. Подобные уровни намагниченности рельса наблюдаются при использовании реальных намагничивающих систем рельсовой дефектоскопии [15, 19]. На торцевых гранях цилиндра задавалось граничное условие наличия только нормальной составляющей вектора магнитной индукции. Задание продольной намагниченности рельса за счет граничных условий позволяет абстрагироваться от конкретного вида намагничивающей системы, применяемой для генерации магнитного потока в реальных условиях.

Расчет модели проводился методом конечных элементов в специализированном программном пакете Ansys Maxwell. В этом пакете тетраэдрическая сеть узлов, для которых вычисляются компоненты векторов магнитной индукции и напряженности магнитного поля, адаптируется в итерационном процессе расчета.

На рис. 5*а* показано полученное в результате моделирования распределение магнитной индукции на поверхности рельса и накладок в области стыка случая, когда стыковой зазор равен 8 мм. В находящемся между накладками отрезке рельса, наблюдается уменьшение уровня намагниченности приблизительно на 40 % по сравнению с участком рельса, где накладки отсутствуют.

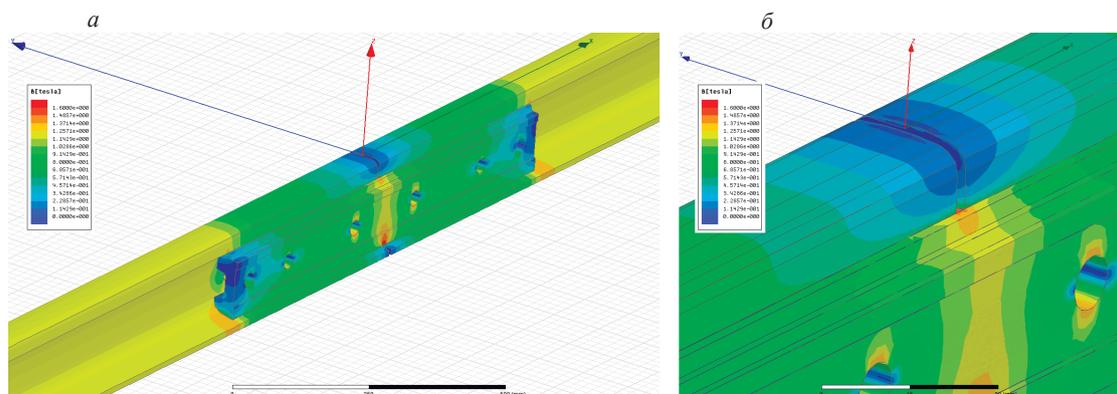


Рис. 5. Намагниченность ферромагнитных элементов модели, полученная в результате расчета, при ширине зазора 8 мм:
a — распределение магнитной индукции на поверхности рельса и накладок; *б* — в непосредственной близости от зазора.

Это обусловлено перераспределением магнитного потока из рельса в рельсовые накладки, сопровождаемое снижением уровня напряженности магнитного поля по всему поперечному сечению рельса. Перераспределение магнитного потока в накладки происходит постепенно — так, концы накладок оказываются намагниченными довольно слабо. В непосредственной близости от зазора (рис. 5б) происходит еще большее уменьшение намагниченности рельса из-за перехода магнитного потока в воздух. Так, намагниченности в центре головки рельса снижается до уровня приблизительно 0,05 Тл, что равно уровню индукции непосредственно в воздушном зазоре.

Изменения намагниченности головки рельса сопровождаются изменением уровня индукции в воздухе над поверхностью катания — там, где обычно размещаются датчики при магнитном контроле состояния рельсов, уложенного в путь. Снижение намагниченности рельса в результате перераспределения потока в накладки приводит к уменьшению уровня магнитной индукции в воздухе вблизи поверхности рельса. Уменьшение намагниченности головки рельса в непосредственной близости от зазора, напротив, сопровождается увеличением уровня магнитной индукции над поверхностью катания из-за выхода части магнитного потока из рельса в воздух.

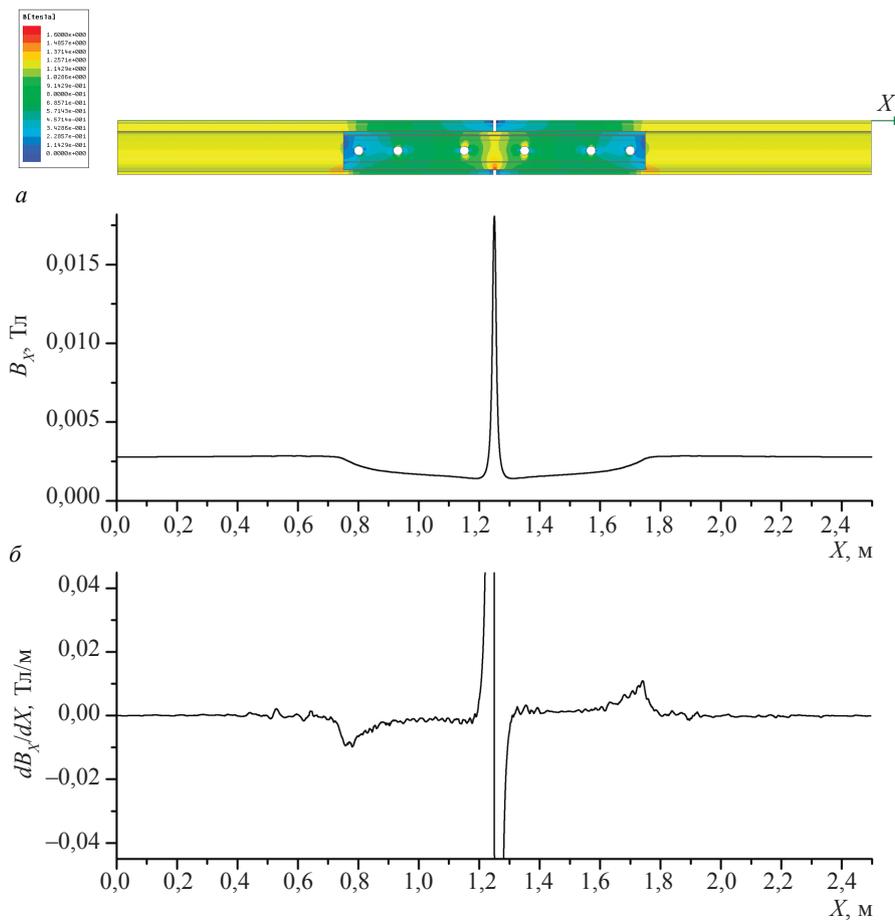


Рис. 6. Распределение магнитного поля в воздухе в 5 мм над поверхностью катания рельса, полученное в результате расчета, при ширине зазора, равной 8 мм: зависимости продольной компоненты индукции (а) и ее производной продольной (б) от продольной координаты.

На рис. 6а показано распределение продольной компоненты магнитной индукции B_x по продольной координате X в 5 мм над поверхностью катания. Фактически, именно такой сигнал должен выдать магнитный датчик, фиксирующий непосредственный уровень магнитной индукции в воздухе (например, датчик Холла), движущийся вместе с намагничивающей системой вдоль рельса. Поскольку реальный датчик измеряет уровень поля над головкой рельса по всему поперечному

сечению, изображенная на рис. 6а величина есть результат осреднения восьми отдельных величин, каждая из которых описывает распределение поля на разном удалении от центрального продольного сечения рельса, а именно ± 5 мм, ± 15 мм, ± 25 мм, ± 35 мм. Там, где присутствуют накладки — на расстоянии до 0,5 м от зазора ($0,75 < X < 1,75$ м, сам зазор соответствует координате $X = 1,25$ м), на рис. 6а наблюдается снижение уровня индукции в воздухе приблизительно с 2,8 до 1,5 мТл. Однако в непосредственной близости от зазора ($1,2 < X < 1,3$ м) происходит резкое увеличение уровня индукции. Максимум достигается непосредственно над центром зазора — продольная компонента индукции в этой точке равна около 18 мТл.

При контроле рельсов для записи продольной компоненты магнитной индукции в воздухе над поверхностью катания, помимо датчиков Холла, применяются индукционные датчики. Сигнал индукционного датчика пропорционален не непосредственному уровню индукции, а изменению последнего за промежуток времени. При использовании индукционных датчиков фактически речь идет об аналоговом дифференцировании уровня индукции по времени. Если считать скорость движения датчика постоянной, то дифференцирование по времени можно заменить дифференцированием по продольной координате.

На рис. 6б показана имитация сигнала индукционного датчика, движущегося в 5 мм над поверхностью катания, — результат численного дифференцирования сигнала, представленного на рис. 6а. Когда начинаются стыковые накладки ($0,7 < X < 0,9$ м) уровень поля над поверхностью рельса уменьшается, и индукционный датчик выдает отрицательный импульс. Когда накладка заканчивается ($1,6 < X < 1,8$ м), уровень поля восстанавливается до значения, характерного для рельса без накладок, в этот момент индукционный датчик выдает положительный импульс. В непосредственной близости от зазора уровень поля вначале резко увеличивается, затем — резко уменьшается. Индукционный датчик реагирует на это двумя мощными разнополярными импульсами равной амплитуды — в начале идет положительный импульс, затем — отрицательный.

Именно такая картина наблюдается на рис. 6б. Амплитуда сигнала индукционного датчика непосредственно от стыкового зазора на два порядка превышает амплитуду сигналов при входе и выходе из накладок и по абсолютной величине равна приблизительно 1,2 Тл/м — при выбранном на рис. 6б масштабе по вертикальной оси большая часть импульсов от зазора не видна. Основные качественные и количественные характеристики сигнала индукционного датчика, полученного в результате моделирования, соответствуют сигналам, наблюдаемым на практике (рис. 3), что подтверждает адекватность используемой модели.

Изменение ширины стыкового зазора в компьютерной модели приводит к изменениям в распределении магнитного поля в окрестности разрыва рельса и, следовательно, может вносить коррективы в характеристики сигналов виртуальных датчиков. Действительно, на рис. 7 видно влияние величины зазора на форму сигналов датчиков, фиксирующих как непосредственно уровень поля над головкой рельса (рис. 7а), так и производную уровня поля (рис. 7б).

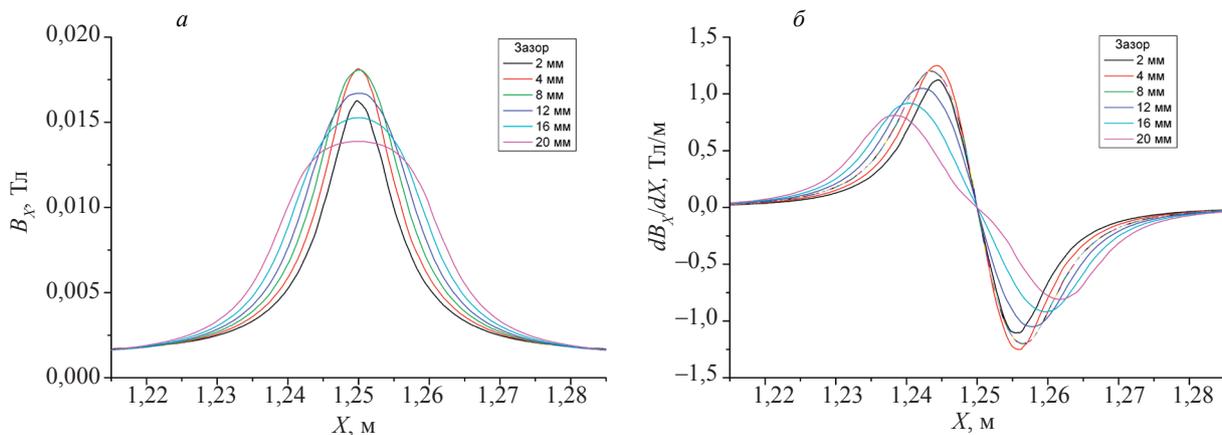


Рис. 7. Результаты расчета: распределения магнитного поля в воздухе в 5 мм над поверхностью катания рельса при различных значениях ширины зазора:

а — сигнал виртуального датчика Холла — распределение продольной компоненты индукции по продольной координате; б — сигнал виртуального индукционного датчика — распределение производной продольной компоненты индукции по продольной координате.

Если перемены в некоторой характеристике сигнала с изменением зазора действительно имеют место, то такая характеристика оказывается полезной с точки зрения решения обратной задачи, а именно — определению величины зазора по значению характеристики сигнала.

Более полезными при определении величины зазора являются те характеристики, которые в наибольшей степени чувствительны к изменению последнего — быстро монотонно растут (либо убывают) при его увеличении. Кроме того, стоит обращать внимание на инъективность отображения зазора в характеристику: если окажется, что одному и тому же значению характеристики соответствует несколько значений зазора, то однозначное решение обратной задачи оказывается невозможным. В этом случае приходится сужать диапазон рассматриваемых величин зазора, что не всегда приемлемо.

Характеристики сигнала можно отнести к трем различным группам. Первая группа включает в себя амплитудные характеристики сигнала — собственно амплитуду, размах, дисперсию по амплитуде и др. Амплитудные характеристики пропорционально растут с увеличением коэффициента усиления и не меняются при растяжении сигнала по продольной координате. Ко второй группе относятся пространственные характеристики — такие как ширина импульса на полувысоте амплитуды, расстояние по продольной координате между экстремальными значениями сигнала, дисперсия по продольной координате. Пространственные характеристики, в отличие от амплитудных, не зависят от коэффициента усиления, но чувствительны к растяжению сигнала по координате.

Наконец, третья группа включает в себя смешанные, интегральные характеристики, которые сочетают в себе как пространственные, так и амплитудные компоненты, например, площадь импульса. Интегральные характеристики реагируют как на изменения коэффициента усиления, так и на продольное растяжение сигнала.

Как амплитудные, так и пространственные, а также интегральные характеристики могут содержать информацию о стыковом зазоре. Однако можно предположить, что связь величины зазора и значения характеристики могут существенно отличаться в зависимости от принадлежности к той или иной группе характеристик. При этом связи зазора и характеристики внутри каждой группы будут иметь схожий вид.

На рис. 8 показаны зависимости амплитудных характеристик, а именно — размаха и дисперсии амплитуды сигнала индукционного датчика от величины зазора.

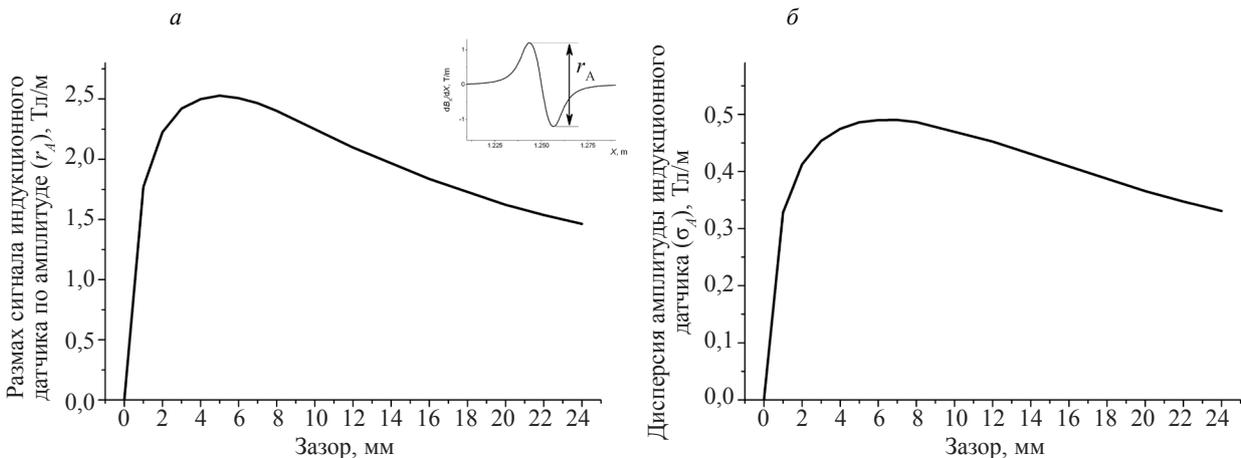


Рис. 8. Зависимости амплитудных характеристик сигнала от величины зазора:

a — размах сигнала индукционного датчика по амплитуде; *б* — дисперсия амплитуды индукционного датчика.

Размах r_A представляет собой разность между максимальным и минимальным значениями сигнала, а амплитудная дисперсия вычислялась по формуле:

$$\sigma_A = \sqrt{\frac{\int_{x_s}^{x_e} (s(x))^2 dx}{x_e - x_s}}$$

на промежутке длиной 10 см вокруг центра зазора ($x_s = 1,2$ м, $x_e = 1,3$ м). Обе зависимости имеют почти одинаковый вид. При малых зазорах обе амплитудные характеристики резко возрастают; постепенно, с увеличением зазора, рост замедляется. При зазоре около 5-7 мм наблюдается максимальное значение характеристик, после чего начинается медленное монотонное снижение обоих показателей. Амплитудные зависимости не удовлетворяют требованию инъективности: например, значению размаха $r_A = 2$ Тл/м соответствуют два различных значения зазора — 2 и 13 мм. Однозначный ответ возможен лишь при малых зазорах — шириной до 1,5 мм.

Если априорно полагать, что зазор малый, то амплитудные характеристики оказываются пригодными для измерения зазоров в диапазоне от 0 до 5 мм. Если изначально известно, что зазор имеет не малое значение (превышает 5 мм), то амплитудные характеристики не слишком подходят для его оценки, поскольку наклон кривой в области средних и больших зазоров невелик и точность измерения может оказаться невысокой. Из двух представленных характеристик более предпочтительной выглядит размах сигнала по амплитуде, поскольку его значение для реального сигнала вычислять проще.

Зависимости пространственных характеристик от величины зазора на рис. 9 имеют вид, принципиально отличный от вида амплитудных зависимостей.

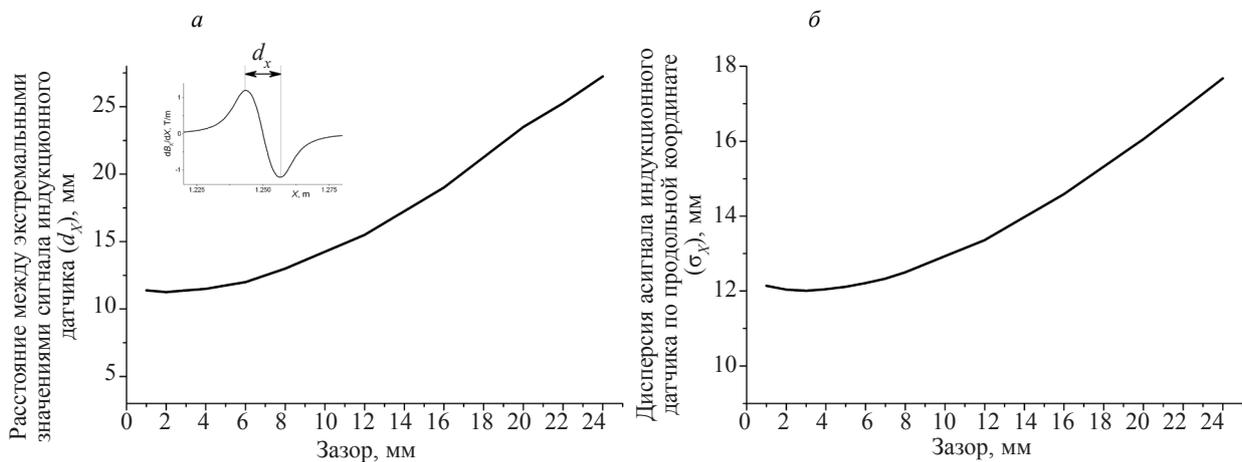


Рис. 9. Зависимости пространственных характеристик сигнала индукционного датчика от величины зазора: *a* — расстояние между экстремальными значениями; *b* — дисперсия сигнала по продольной координате.

Как расстояние между экстремумами d_x (рис. 9*a*), так и дисперсия сигнала индукционного датчика по продольной координате (рис. 9*b*), вычисляемая по формуле:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\int_{x_s}^{x_e} |s(x)|(x - \bar{x})^2 dx}{\int_{x_s}^{x_e} |s(x)| dx}}, \quad \bar{x} = \frac{\int_{x_s}^{x_e} |s(x)| x dx}{\int_{x_s}^{x_e} |s(x)| dx},$$

при малых зазорах (до 5-6 мм) практически не зависят от величины зазора. Лишь при средних значениях зазоров начинается рост показателей, переходящий при больших зазорах в почти линейную зависимость. Исходя из вида зависимостей пространственных характеристик сигнала, видно, что они позволяют измерять зазор лишь при средних и больших величинах зазора — не менее 5-6 мм. Из двух представленных характеристик более предпочтительной с точки зрения измерения зазора выглядит расстояние между экстремумами. Оно более чувствительно к изменению зазора: при увеличении зазора с 6 до 24 мм величина d_x возрастает более чем в 2 раза, в то время как дисперсия по продольной координате увеличивается лишь в 1,5 раза.

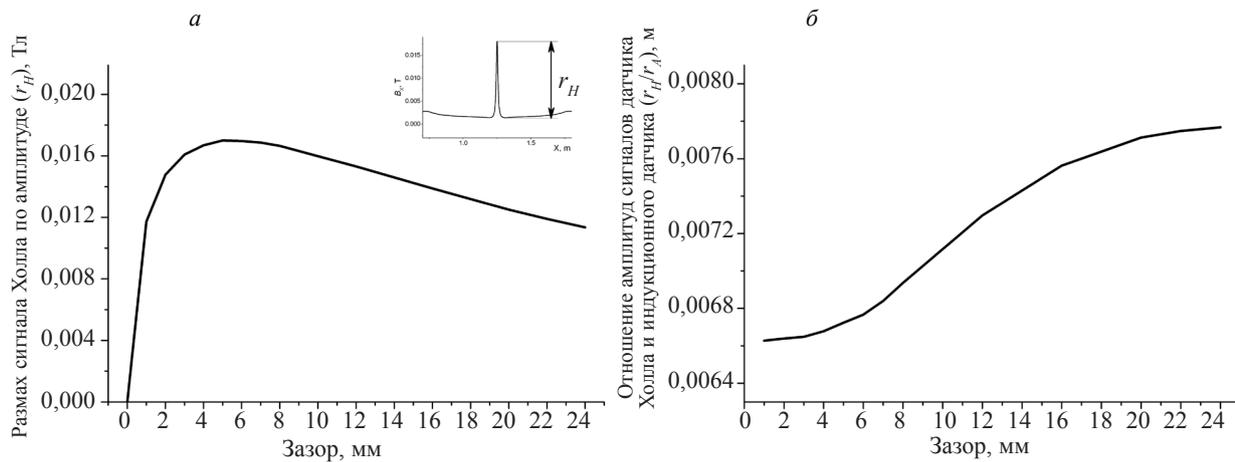


Рис. 10. Зависимости смешанных характеристик сигнала от величины зазора: *а* — размах сигнала датчика Холла; *б* — отношение размахов сигналов датчика Холла и индукционного датчика.

На рис. 10 показаны зависимости от зазора тех характеристик, которые одновременно отражают информацию и об амплитуде, и о пространственной протяженности сигнала. Размах сигнала датчика Холла по амплитуде (рис. 10*а*) по своему определению и по внешнему виду зависимости, на первый взгляд, относится к чисто амплитудным характеристикам. Однако если речь идет об анализе сигнала индукционного датчика, то данная характеристика является смешанной — интегральной.

Действительно, сигнал индукционного датчика есть производная сигнала датчика Холла, поэтому размах по амплитуде последнего есть площадь импульса первого, т. е. учитывает не только амплитуду, но и протяженность сигнала индукционного датчика по продольной координате. Тот факт, что внешний вид зависимости оказался весьма похожим на вид зависимости для амплитудных характеристик (см. рис. 8), свидетельствует о слабой корреляции между шириной импульса индукционного датчика и величиной зазора. Последнее не противоречит наблюдаемому на рис. 9 уверенному росту пространственных характеристик сигнала индукционного датчика от стыкового зазора в целом, а картина на рис. 10*а* описывает отдельный импульс — положительный или отрицательный. Т.е. с ростом зазора импульсы расходятся, увеличивая расстояние между экстремумами и дисперсию сигнала по продольной координате, но ширина самих импульсов при этом изменяется незначительно. Об этом же свидетельствует рис. 10*б*, на котором показана зависимость отношения амплитуд сигналов датчика Холла и индукционного датчика.

Фактически, представленное отношение есть результат очистки интегральной характеристики импульса индукционного датчика от амплитудной компоненты. На то, что в данном случае мы имеем дело с преимущественно пространственной характеристикой, указывает размерность отношения амплитуд (м). Внешне вид зависимости отношения от зазора похож на вид зависимости пространственных характеристик (см. рис. 9), но рост отношения с увеличением зазора оказывается не столь значительным. Так, при увеличении зазора с 6 до 24 мм отношение амплитуд вырастает лишь на 15 %, в то время как пространственные характеристики сигнала индукционного датчика, как отмечалось выше, увеличиваются в аналогичной ситуации в 1,5-2 раза. Из-за слабой чувствительности к изменению величины, которую требуется оценить, отношение амплитуд датчика Холла и индукционного датчика выглядит не слишком перспективным с точки зрения оценки значения зазора.

Исходя из результатов моделирования, можно сделать вывод, что ни одна из представленных выше характеристик сигнала, рассматриваемая изолированно от других, не пригодна для оценки стыкового зазора во всем практическом диапазоне значений от 0 до 25 мм. Пространственные характеристики сигнала не годятся для оценки малых зазоров, а амплитудные — непригодны для измерения средних и больших зазоров.

Однако если рассматривать как пространственные, так и амплитудные характеристики сигнала в совокупности, то ситуация меняется, поскольку они хорошо дополняют друг друга. Так, для оценки больших и средних зазоров можно воспользоваться какой-либо пространственной харак-

теристикой, например, расстоянием между экстремумами сигнала индукционного датчика по продольной координате d_x . Для малых зазоров целесообразно использовать амплитудную характеристику, например, размах сигнала индукционного датчика по амплитуде r_A .

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ ЗАЗОРОВ МАГНИТНЫМ МЕТОДОМ

Для проверки возможности оценки величины зазора в реальных условиях проведены исследования, в ходе которого регистрировались сигналы магнитных датчиков от болтовых скреплений с известным значением зазора. Исследования позволили уточнить вид зависимостей между характеристиками сигналов и шириной зазора болтового стыка.

В ходе планового проезда мобильного дефектоскопического средства — вагона-дефектоскопа, оснащенного намагничивающей системой на осях колесных пар [19], проводилась регистрация распределения продольной компоненты магнитной индукции над поверхностью катания рельса посредством набора линейных биполярных датчиков Холла с чувствительностью 30 мВ/мТл. Дефектоскопическое средство также было оборудовано одомером — прибором для измерения расстояний по продольной координате. Скорость движения намагничивающей системы и датчиков составляла от 30 до 60 км/ч.

Набор из 8 датчиков располагался в 5 мм над поверхностью катания так, что расстояние между датчиками по поперечной координате составляло 1 см. Таким образом, линейка датчиков, ориентированная перпендикулярно направляющей рельса, позволяла записывать распределение поля, как над центром головки, так и со стороны рабочей и нерабочей граней. Показания всех 8 датчиков оцифровывались с шагом по продольной координате 2 мм, далее производилось осреднение и дифференцирование цифрового сигнала. В полученных данных в автоматическом режиме выявлялись участки сигнала, соответствующие зонам болтовых стыков, и для каждого участка вычислялись две характеристики импульсов от стыкового зазора: размах по амплитуде и расстояние между экстремумами по продольной координате.

В ходе проезда производилась видеозапись линейной камерой, фиксирующей состояние исследуемого рельса, которая синхронизировалась с записью сигналов магнитных датчиков. В результате появилась возможность оценивать реальные величины стыковых зазоров, которые имели место непосредственно в момент регистрации магнитных данных. Значения стыковых зазоров измерялись по полученным качественным изображениям на координате, соответствующей области, выделенной по записям магнитных датчиков как зона болтового стыка.

В ходе эксперимента проанализированы сигналы от 609 болтовых стыков с зазорами от 1 до 26 мм. В рассмотренном наборе в достаточной степени представлены стыки как с малым зазором (менее 5 мм), так и с большим — более 20 мм.

На рис. 11 показана зависимость между параметром d_x и измеренными по видеоизображению величинами зазоров рассмотренных болтовых стыков. Поскольку ширина зазора по видеоизображению измерялась с точностью до 1 мм, а дискретность оцифрованного сигнала составляла 2 мм, поле графика разбито на прямоугольные области размером 1×2 . Градация яркости прямоугольников показывает количество обнаруженных стыков с соответствующей парой значений параметров (монохромная цветовая шкала справа на рис. 11). Большое количество стыков с зазором 8–9 мм объясняется наличием т. н. изолирующих стыков с вкладками из немагнитного материала, делающих невозможным уменьшение зазора ниже толщины вкладки. Черная линия на рис. 11 есть результат осреднения значений расстояния между экстремумами, полученными для стыков с диапазоном зазоров 3 мм.

Из рис. 11 следует, что экстремумы сигнала индукционного датчика наблюдаются дальше от центра зазора, нежели торцы рельсов. Однако при большой ширине зазора разница между положением экстремумов и торцов рельсов сходит на нет. При малой ширине зазора, напротив, эта разница возрастает, поскольку расстояние между экстремумами перестает зависеть от реального значения зазора, стабилизируясь на уровне около 13 мм. В целом зависимость между параметром d_x и величиной зазора, полученная в ходе эксперимента, хорошо согласуется с зависимостью, введенной ранее по результатам компьютерного моделирования (см. рис. 9а). Некоторые отличия можно объяснить имеющими несоответствием между использованной моделью и реальными условиями, в которых производилось намагничивание записи сигналов датчиков. В задействованной модели не учитывались магнитодинамические эффекты, такие, как влияние возникающих в рельсе вихревых токов. Учет этих факторов возможен в более сложной магнитодинамической модели, рассмотренной, например, в [22].

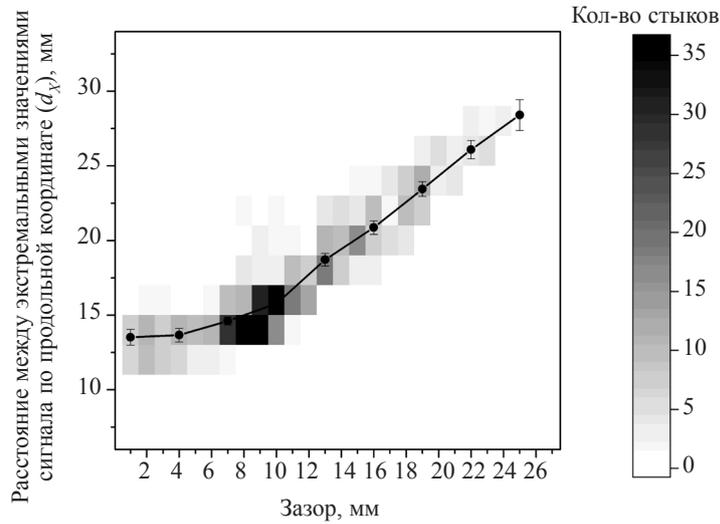


Рис. 11. Зависимость расстояния между экстремумами сигнала по продольной координате от величины зазора по данным эксперимента.

Для оценки малых зазоров, как показывают результаты компьютерного моделирования, следует использовать амплитудные характеристики сигналов. На рис. 12 приведена зависимость между размахом сигнала по амплитуде r_A и измеренной по видеоизображению величиной зазоров в рассмотренных болтовых стыках. Черной линией показано среднее значение размаха по амплитуде, полученное при каждом значении измеренного зазора. Отклонение размаха от среднего значения может быть весьма большим, однако среднее значение размаха при увеличении зазора от 0 до 4 мм демонстрирует вполне уверенный рост. Аналогичную тенденцию мы видим и на зависимости, полученной по результатам компьютерного моделирования (см. рис. 8а). Наблюдаемый рост характеристики дает возможность оценивать величины критически малых (до 4 мм) зазоров по размаху сигналов по амплитуде r_A .

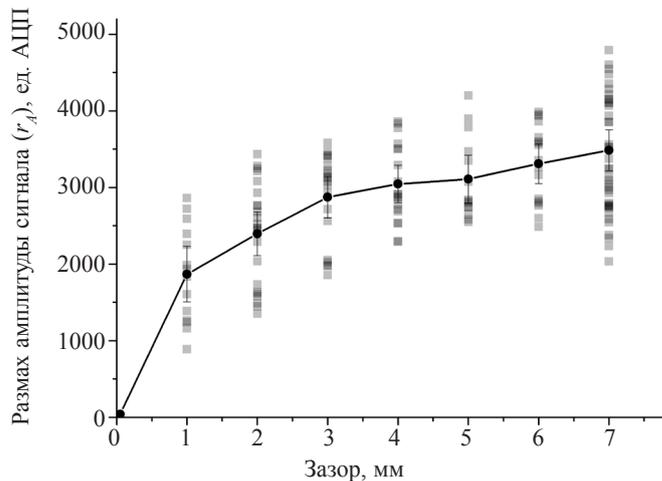


Рис. 12. Зависимость размаха сигнала по амплитуде от величины зазора по данным эксперимента.

На рис. 13 обе рассматриваемые в эксперименте характеристики сигнала сведены воедино (результат двумерной интерполяции множества из всех 609 точек, полученных в процессе эксперимента). По горизонтальной шкале отложено расстояние между экстремумами сигнала d_x , по вертикальной — размах сигнала r_A . Каждому полученному в ходе эксперимента сигналу от зазора

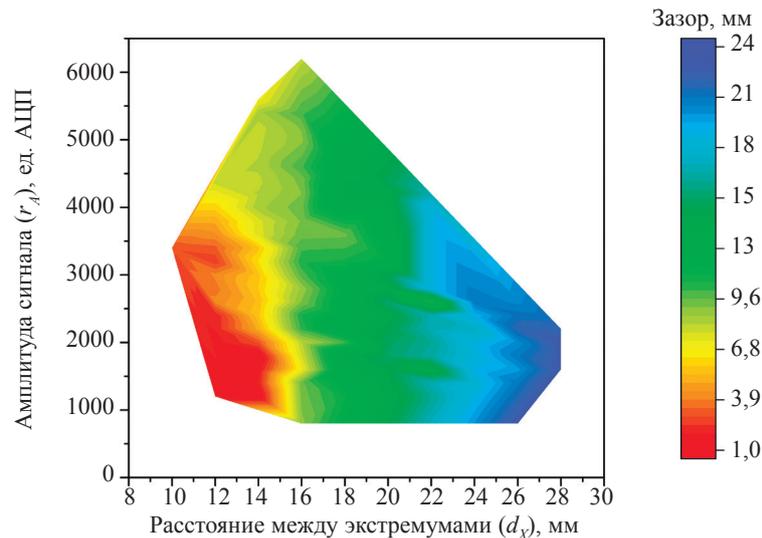


Рис. 13. Зависимость величины зазора болтового стыка от характеристик сигнала — расстояния между экстремумами и размаха по амплитуде.

болтового стыка соответствует определенная точка на плоскости. Цвет этой точки определяется величиной зазора, измеренного по видеоизображению (цветовая шкала справа на рис. 13). Если в непосредственной близости от некоторой точки отсутствуют экспериментальные данные (иначе говоря, сигналов от зазоров с похожим соотношением d_x и r_A в эксперименте обнаружено не было), то такая точка остается белого цвета.

По изображенному на рис. 13 образу можно решить обратную задачу: по заданным характеристикам сигнала оценить величину зазора. Так, если расстояние между экстремумами d_x велико ($23 < d_x < 28$ мм), то это однозначно указывает на критически большую величину зазора (синяя область). Причем, сигналы от больших зазоров не имеют большого размаха по амплитуде (ни одного сигнала с большим значением расстояния между экстремумами и большой амплитудой в эксперименте не зафиксировано). Если расстояние между экстремумами сигнала имеет среднее значение ($16 < d_x < 23$ мм), то и зазор будет средним (зеленая область). Но в отличие от больших зазоров, амплитуды сигналов от зазоров средней величины могут быть и весьма большими. Однако в ситуации, когда расстояние между экстремумами имеет среднее значение, большая амплитуда сигнала не свидетельствует об увеличенной ширине зазора.

Когда расстояние между экстремумами сигнала мало ($11 < d_x < 16$ мм), амплитуда сигнала уже играет важную роль: если она велика, то ширина зазора оказывается несколько меньше среднего значения, но не является критически малой (желтая область). Но если малое расстояние между экстремумами сочетается с малой амплитудой сигнала, то мы попадаем в красную область с критически низкими значениями стыкового зазора. Последнее может свидетельствовать о возможности появления значительных температурных напряжений в рельсовой плети, представляющих угрозу безопасности движения поездов.

6. К ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ПРЕДЛАГАЕМОГО МЕТОДА

Таким образом, в процессе движения скоростного диагностического средства, оснащенного системой намагничивания и магниточувствительными датчиками, из потока регистрируемых сигналов автоматически выделяются сигналы от зон болтовых стыков, определяются параметры сигналов от стыковых зазоров (параметры d_x и r_A) и по измеренным параметрам оценивают величины стыковых зазоров болтовых соединений рельсового пути. В условиях значительных отрицательных температур (ниже -20 °C), из процедуры анализа можно исключить этап измерения амплитуд сигналов, дополнительно упрощая реализацию метода.

Сигналы от болтовых стыков могут быть выделены из потока поступающих сигналов по их характерным признакам (см. рис. 3): наличию сигналов от концов стыковых накладок и двухполярного сигнала значительной амплитуды от стыкового зазора между накладок. Амплитуды сигналов от стыковых зазоров имеют значительно большие значения, чем от сварных стыков и потенциальных дефектов рельсов.

Вопросы определения амплитуд r_A сигналов от стыкового зазора и расстояния d_X между экстремумами (при известной скорости движения диагностического средства) не представляют трудностей и выполняются методами цифровой обработки сигналов.

Введение предлагаемого способа оценки зазора в практику периодического осмотра состояния пути позволяет дополнительно автоматизировать ряд измерительных процессов, выполняемых в настоящее время в основном вручную:

- определение наличия двух и более стыков с нулевыми зазорами;
- фиксацию изменения суммы зазоров более чем на 52 мм при трехзвеньевых уравнильных пролетах;
- мониторинг состояния стыковых зазоров в процессе скоростного сканирования диагностическими средствами.

Важно отметить, что предлагаемую методику можно реализовать без прерывания основной функции скоростного дефектоскопического средства: выявление опасных дефектов в головке рельсов. Предложенные подходы реализуются путем введения дополнительной автоматической обработки сигналов контроля, получаемых в процессе проезда диагностического средства. В дополнение к выявлению дефектов, реализация предлагаемой методики позволяет оценивать с достаточной для практики точностью величину зазоров в болтовых стыках рельсового пути.

7. ВЫВОДЫ

1. Показана принципиальная возможность измерения зазоров болтовых стыков рельсового пути в автоматическом режиме на скоростях до 60 км/ч магнитным методом. Магнитный метод потенциально менее подвержен воздействию мешающих факторов (загрязненность поверхности, сколы и наплывы металла на торцах рельсов и др.) по сравнению с применяющимися сейчас методами.

2. В качестве источника информации о величине зазора можно использовать параметры поля рассеяния магнитного потока, регистрируемые магнитными датчиками вблизи разрыва рельса. В настоящее время данные о распределении продольной компоненты магнитной индукции над поверхностью катания рельса собираются в ходе плановых проверок рельсового пути дефектоскопическими средствами.

3. В результате исследований не удалось определить единственный параметр сигнала магнитного датчика, позволяющий оценивать стыковые зазоры во всем диапазоне возможных значений. Предложено при малых значениях зазоров в качестве информативного параметра использовать амплитуду сигнала датчика, регистрирующего продольную компоненту магнитной индукции, а при больших зазорах — расстояние между экстремумами сигнала.

4. Результаты компьютерного моделирования влияния величины стыкового зазора на параметры магнитного сигнала от него качественно совпадают с результатами натуральных измерений, выполненных при скоростях контроля до 60 км/ч.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути: утв. Распоряжением ОАО «РЖД» от 14.11.2016 г. № 2288р.

2. *Стоянкович Г.М., Пупатенко В.В.* Температурные деформации в зоне уравнильных пролетов бесстыкового пути // Путь и путевое хозяйство. 2019. № 6. С. 34—37.

3. *Черепанов А.Н., Сергеев В.И., Масягутов Р.К., Огарко А.В.* Акустический способ обнаружения неисправности рельсового пути / Патент RU 2511644. Оpubл. 10.04.2014. Бюл. № 10.

4. *Snead E. de S.* Rail stress detection system and method / Патент US 8934007B2. 2012.

5. *Архангельский С.В., Розенбаум Л.Б., Козин М.П., Шиханов А.А., Мавроди П.Б., Розенбаум Г.Л.* Устройство видеоконтроля состояния поверхности рельсов и рельсовых креплений / Патент RU 101851. Оpubл. 27.01.2011. Бюл. № 3.

6. *Шилов М.Н., Третьяков А.А., Алексеев Д.В.* Средства и технологии автоматизированной системы видеоконтроля объектов железнодорожной инфраструктуры // Путь и путевое хозяйство. 2021. № 9. С. 11—12.

7. *Goda W., Itoi K., Nagamine N., Tsubokawa Y.* Rail Joint Gap Measurement Method using Train Frontal Images Captured by a Handy Video Camcorder // IEEE Transactions on Industry Applications 2023. V. 143. Iss. 1. P. 46—55.

8. *Yilmazer M., Karakose M., Aydin I.* Detection and Measurement of Railway Expansion Gap with Image Processing / 2021 International Conference on Data Analytics for Business and Industry. 2021. P. 515—519.

9. Mizuno T., Mochizuki D., Kawasaki S., Watanabe S., Enoki S., Yamada H. Measurement of singular joint gap of the rails by means of rail joint gap sensor with detecting coil which is crossed to the exciting coil / IEEE International Magnetism Conference. 2002. P. FV2.
10. Архангельский С.В., Козин М.П., Розенбаум Л.Б., Шиханов А.А. Устройство для величины стыковых зазоров и вертикальных ступенек железнодорожного пути / Патент RU 55716. Оpubл. 27.08.2006. Бюл. № 24.
11. Запужалов В.Г., Егизарян А.В., Редькин В.И., Рябцев В.К., Туробов Б.В. Устройство для многопараметрового контроля объектов путей сообщения / Патент RU 2082640. Заявка: 96 96108055. 05.05.1996.
12. Туробов Б.В., Дрындрожик Д.Э., Дегтярев О.Ю. Устройство для измерения тепловых зазоров в стыках рельсов железнодорожного пути / Патент RU 2192982. Оpubл. 20.11.2002. Бюл. № 32.
13. Инструкция по оценке состояния рельсовой колеи путеизмерительными средствами и мерам по обеспечению безопасности движения поездов: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 28.02.2020 № 436р.
14. Machado M., Ricci E.L.B. System and method for detecting a break in a railway track / Патент US 11130509B2. 2018.
15. Антипов А.Г., Марков А.А. Выявляемость дефектов в рельсах магнитным методом // Дефектоскопия. 2019. № 4. С. 21—29.
16. Антипов А.Г., Марков А.А. Сравнительный анализ методов активного и остаточного намагничивания в дефектоскопии рельсов // Дефектоскопия. 2016. № 3. С. 35—42.
17. Park J.M., Beak Y.S., Choi J.H. Inductive sensor for the measurement of the rail joint gap // Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference. 2010. P. 733—734.
18. Blair S. Method and System for Detecting a Material Discontinuity in a Magnetisable Article / Патент US 11249047B2. 2022.
19. Антипов А.Г., Марков А.А. Оценка глубины выявления поперечных трещин магнитодинамическим методом в дефектоскопии рельсов // Дефектоскопия. 2014. № 8. С. 57—68.
20. Зацепин Н.Н., Щербинин В.Е. К расчету магнитостатического поля поверхностных дефектов. Ч. 1. Топография полей моделей дефектов // Дефектоскопия. 1966. № 5. С. 50—59.
21. Щербинин В.Е., Пашагин А.И. Влияние протяженности дефекта на величину его магнитного поля // Дефектоскопия. 1972. № 4. С. 74—82.
22. Antipov A.G., Markov A.A. Using a Tail Field in High-Speed Magnetic Flux Leakage Testing // Journal of Nondestructive Evaluation. 2022. V. 41. Art. No. 2