

БЕСКОНТАКТНЫЙ ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЬ ВЗАИМНОГО ПОЛОЖЕНИЯ РЕЛЬСОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ КОЛЕИ

А.Ю. Лавров¹, А.И. Меркулов¹

¹Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва, Самара, Россия

Аннотация

В работе рассмотрено устройство контроля линейного вертикального, линейного поперечного горизонтального и углового перемещений, а также ширины верха головки рельса. Предложены матричная компоновка и синфазное возбуждение вихретоковых преобразователей, позволяющие создать общее электромагнитное поле, обеспечивающее контроль в широком диапазоне изменения геометрических параметров. Методика распознавания электромагнитного образа рельса основана на селекции контролируемых факторов с помощью цифровой обработки измерительных сигналов.

Ключевые слова: электромеханическая сканирующая система, бесконтактный экспресс-контроль железнодорожной колеи, матричный вихретоковый преобразователь, распознавание электромагнитного образа.

Введение

Ширина железнодорожной колеи определяет безопасность движения транспорта. Рельсы имеют большую протяжённость, подвержены динамическому и климатическому воздействию. Сбор информации об их состоянии для систем управления движением поездов осуществляется с помощью диагностических вагонов-лабораторий, выполняющих комплексную компьютерную диагностику железнодорожного пути с помощью электромеханических сканирующих систем [1]. Наличие стрелочных переводов рельсовой колеи требует одностороннего размещения датчиков над рельсом, что определяет актуальность разработки многоканальной системы автоматического бесконтактного экспресс-контроля взаимного положения рельсов.

За рубежом широкое распространение получили оптические системы контроля состояния колеи. Например, компанией ImageMap, Inc. (E. H. Reeves & Associates, Inc.) выпускается вагон-лаборатория, оснащённый лазерной системой контроля геометрических параметров рельсов. С помощью программного обеспечения Industrial Metric, Inc. определяют геометрические параметры и положение рельса в колее. Экспресс-контроль с использованием оптических методов измерения геометрических параметров рельсовой колеи невозможен в условиях загрязнённой среды. Существенным недостатком оптических измерительных систем является их высокая стоимость и большие габариты измерительных модулей.

Электромагнитные методы контроля применяются в различных отраслях промышленности для бесконтактного измерения перемещений и геометрических параметров изделий сложной формы. Для одновременного контроля большого количества факторов используется многоточечный контроль, при котором над контролируемой поверхностью необходимо разместить не менее $n_{\text{раб}} = b_r/b_m$ преобразователей, где b_r – ширина верха головки рельса, а b_m – ширина одиночного накладного преобразователя (ПН). Надёжная работа преобразователей требует

их установки с максимальным вертикальным зазором безопасности $h_{z\text{п}}$. В методе вихревых токов широко используются компланарные ПН, конструктивные особенности которых не позволяют разместить большое количество преобразователей, обеспечивающих высокие значения $h_{z\text{п}}$, в зоне контроля. Рассматриваемый матричный вихретоковый преобразователь (МВП) включает большое количество катушек индуктивности с сильной электромагнитной связью, что позволяет получить новые характеристики преобразователей и обеспечить измерение геометрических параметров объекта контроля в широком диапазоне изменения их значений.

Контролируемые факторы и размещение устройства контроля над колёй

Определение ширины колеи $b_{\text{кл}}$ в процессе движения подвижного состава требует размещения устройства контроля на тележке вагон-лаборатории. В системе координат $X_0Y_0Z_0$, связанной с колёсной парой, фиксируем координаты центров рабочих поверхностей корпусов ПН левого и правого рельсов колеи, как объекта контроля (ОК), задающих системы координат XYZ преобразователей (рис. 1, 2, система координат $X_0Y_0Z_0$ не показана). Ширина $b_{\text{кл}}$ может быть определена как линейные перемещения $h_{y\text{лр}}$, $h_{y\text{пр}}$ и ширина $b_{r\text{лр}}$, $b_{r\text{пр}}$ левого и правого рельсов:

$$b_{\text{кл}} = (b_{\text{км}} + 2b_{\text{ко}}) - (b_{\text{ш}} + h_{y\text{лр}} + \frac{1}{2}b_{r\text{лр}} + h_{y\text{пр}} + \frac{1}{2}b_{r\text{пр}}),$$

где $b_{\text{км}}$ – расстояние между внутренними торцами колёс, $b_{\text{ко}}$ – ширина колеса, $b_{\text{ш}}$ – ширина металлического корпуса ПН, рабочая поверхность которого параллельна плоскости XY , представляющие собой конструктивные параметры.

Вертикальное h_z и горизонтальное h_y перемещения поверхности катания каждого рельса относительно преобразователей вычисляются автономно, как отклонения систем координат $X_rY_rZ_r$, связанных с серединой поверхности катания рельсов от систем координат XYZ преобразователей: $h_z = z - h_{z\text{п}}$, $h_y = y$.

Ширина $b_{ш}$ корпуса ПН должна быть больше суммы ширины b_r рельса и диапазона $h_{y\max}$ поперечных перемещений: $b_{ш} > b_r + h_{y\max}$, а для безопасности работы при движении вагона-лаборатории $b_{ш}$ меньше ширины $b_{ко}$ колеса вагона.

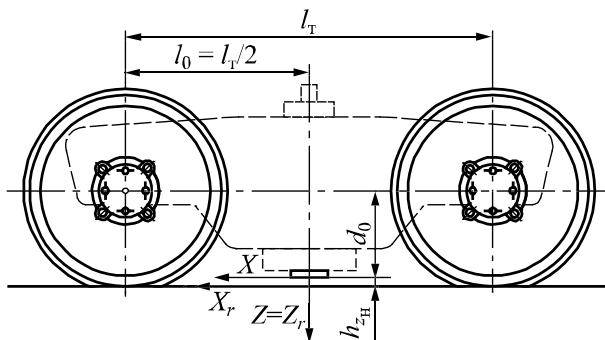


Рис.1. Установка корпуса преобразователей на тележке вагона-лаборатории

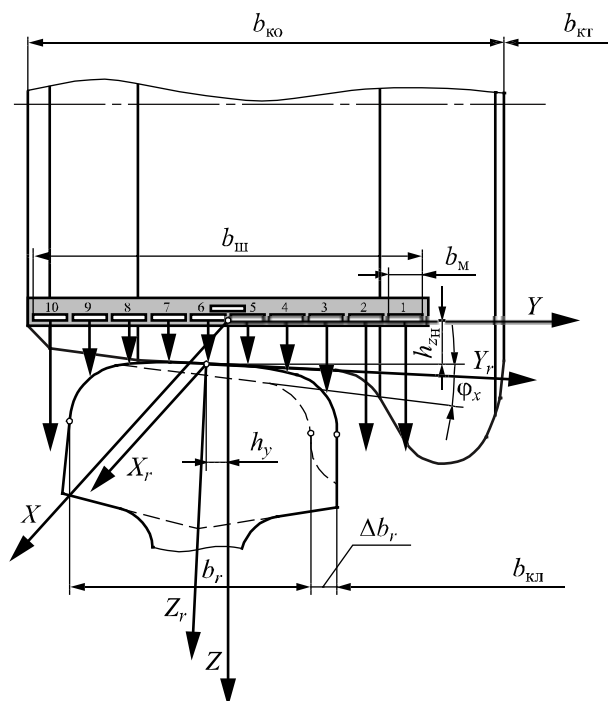


Рис.2. Взаимное положение рельса и преобразователей

Средние преобразователи удалены от краев рельса и имеют доминирующую чувствительность к вертикальным перемещениям h_z . Крайние преобразователи, расположенные вблизи краёв рельса, чувствительны к h_z и h_y . Установка промежуточных преобразователей позволяет дополнительно контролировать угловые отклонения поверхностей катания рельса и колеса, влияющих на динамику износа профиля рельса. Угловое положение можно определить по формуле:

$$\varphi_x = \arctg \frac{h_{z\text{нл}} - h_{z\text{пл}}}{b_\varphi},$$

где $h_{z\text{нл}}$, $h_{z\text{пл}}$ – текущие вертикальные зазоры промежуточных ПН; b_φ – расстояние между их центрами.

Таким образом, задача сводится к определению значений вектора $\vec{P} = (h_z, h_y, b_r, \varphi_x)$, задающего геометрические параметры рельса в пространстве факторов. Размещение $n_{\text{раб}}$ преобразователей в малой зоне контроля требует разработки матричных электромагнитных преобразователей.

Конструкция матричного вихретокового преобразователя

В работе [2] проведена идентификация электромагнитных преобразователей по параметрам конструктивной топологии. Для компланарных ПН (рис. 3а) диапазон контролируемых перемещений связан с величиной диаметра эквивалентного контура вихревых токов $D_3 \approx D_k$, где D_k – диаметр катушки ПН, и коэффициентом связи K_T :

$$D_3 = \frac{6h_z}{\ln L_{\text{внн}} - \ln L_{\text{вн}}}, \quad K_T = L_{\text{вн}} / L_{\text{внн}}, \quad (1)$$

где $L_{\text{внн}}$ – максимальная, а $L_{\text{вн}}$ – текущая вносимые индуктивности преобразователей. Диаметр $D_3 \approx b_k$ характеризует ослабление поля с увеличением h_z , а коэффициент связи K_T – величину вносимых параметров преобразователей при зазоре $h_{z\text{н}}$. Диаметр D_3 компланарных ПН определяется меньшей стороной b_k прямоугольного токового контура, поэтому при больших $h_{z\text{н}}$ над поверхностью рельса возможна установка только одного преобразователя.

Размеры корпуса ПН выбираются так, что высота катушки d_k всегда намного меньше глубины d_z установочного паза, иначе вихревые токи экрана ослабляют возбуждающее поле ПН. Использование $n_{\text{раб}}$ значительно увеличивает габариты корпуса экранированных преобразователей, что исключает возможность применения ПН в труднодоступных зонах.

Для контроля поверхности конструктивных элементов применяют матричные вихретоковые преобразователи (МВП). Известны МВП, разработанные компанией ASEA-Brown Boveri, представляющие собой трансформаторные преобразователи на мягкой подложке [3]. ПН установлены так, что их взаимное влияние минимально. При этом ограничивается возможность выполнения контроля взаимосвязанных факторов.

Решение поставленной задачи достигается использованием экранированных ортогональных преобразователей (рис. 3б). Изменяя соотношение площадей $l \times b$, $l \times d$, $b \times d$, определяющих электромагнитное поле ПН по заданному направлению, можно осуществить многовариантность соотношений чувствительностей к контролируемым факторам. Длина $l_m \approx D_3$ магнитопровода катушки определяет дальность действия возбуждающего электромагнитного поля преобразователя. Длина рельса намного превышает l_m , а потому легко реализуется заданный диапазон

$h_{z\max}$ изменений зазоров между поверхностью катания рельса и преобразователями.

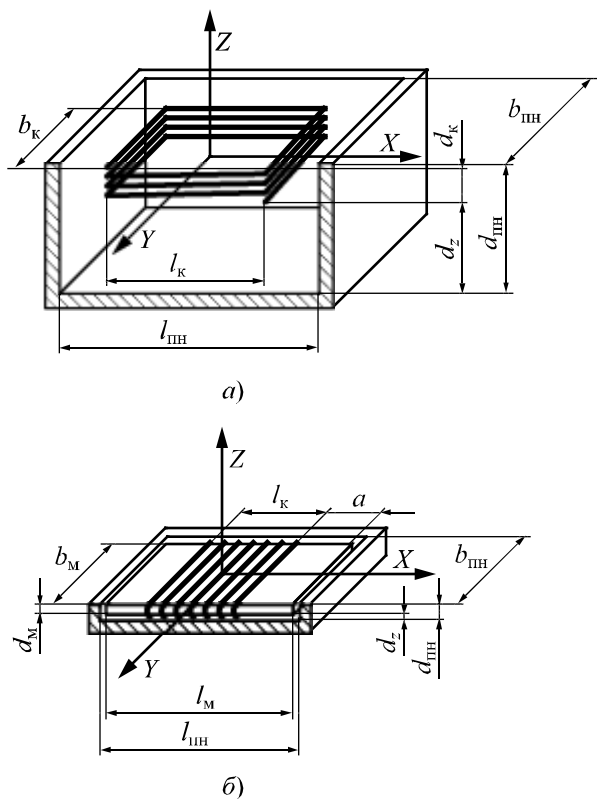


Рис.3. Конструктивные размеры компланарных и ортогональных ПН

Многоточечный контроль геометрических факторов определяет использование модульного принципа схемно-конструктивной компоновки ортогональных ПН, который позволяет:

1. организовать переменную или периодическую структуру возбуждающего электромагнитного поля, исходя из задач контроля и особенностей форм изделия;
2. повысить производительность контроля путем выбора рационального количества унифицированных модулей ортогональных ПН и зон контроля;
3. получить повышенные K_T и D_3 каждого ПН к контролируемому фактору;
4. использовать интегральную технологию изготовления катушек ортогональных ПН с магнитопроводом;
5. размещать ПН в пазах единого проводящего корпуса для локализации электромагнитного поля в зоне контроля и снижения погрешности от взаимного влияния пространственных компонент перемещений и от других факторов, например, температуры;
6. получить новые характеристики преобразователей, позволяющие расширить функциональные возможности средств.

Применение модульного принципа компоновки МВП позволяет реализовать пространственную селекцию влияющих факторов за счёт увеличения $n_y = b_w/b_m$ количества ПН, а размещение их в прово-

дящем корпусе устройства экранирует ПН, что локализует поле в зоне контроля и снижает влияние внешних полей на погрешности измерений. ПН расположены в плоскости и образуют дискретную шину с общим электромагнитным полем, что обеспечивает высокое значение D_3 .

Расчёт индуктивности сильносвязанных электромагнитных преобразователей

Исследование характеристик преобразователей выполнено на основе численных расчётов начальных L_n и вносимых $L_{вн}$ индуктивностей каждого преобразователя МВП. При этом магнитный поток, создаваемый ТЭ дискретной шины, удобно представить в виде совокупности элементарных трубок с малым сечением ΔS_m и постоянной напряжённостью \vec{H} магнитного поля. Начальная индуктивность L_n ПН составляет:

$$L_n = \sum_1^{n_x} \left(\sum_1^{m_x} \sum_1^{m_y} \Phi_{i_x} + \sum_1^{n_x n_y} \sum_1^{m_z} \sum_1^{m_y} \Phi_{j_m} \right) / I_k, \tag{2}$$

где $\Phi_{i_x} = \mu H_{i_x} \Delta S_m$ – магнитный поток, создаваемый i -м ТЭ; Φ_{j_m} – магнитный поток, создаваемый j -м ТЭ и охватывающий i -й ТЭ; $(n_x \times n_y)$ – количество ТЭ дискретной токовой шины в плоскости оси XU ; m_z, m_y – количество трубок магнитного потока в направлении осей Z и Y . Количество $n_x = l_k/\Delta l_k$ определяется шагом Δl_k размещения ТЭ вдоль оси X по длине l_k катушки ПН, а n_y – количество ПН, образующих МВП.

Элементарную топологию магнитного поля имеет вихретоковый преобразователь в виде проводника $b_w \rightarrow \infty$. Если направление тока совпадает с осью Y , то в плоскости XOZ силовые линии плоскопараллельного поля представляют семейство окружностей, задающих трубки возбуждающего магнитного потока. В плоскости YOZ проекции силовых линий определяют дальность D_3 действия поля, а их угловое положение принимаем за нулевое направление $\varphi_m = 0$. Величина сечения магнитного потока ТЭ определяется его длиной b_m и дальностью действия поля: $S_m = b_m D_3$.

Исследование параметров электромагнитного поля ТЭ осложняется его трёхмерным характером. Известно много компьютерных программ (ANSYS, FEMLAB, ELCUT и др.), которые автоматически разбивают моделируемое пространство на конечные элементы при заданных границах сечений магнитных потоков. Однако для рассматриваемой задачи границы полей автономных ПН неизвестны, что требует разработки новых алгоритмов численных расчётов их характеристик. Расчет функций пространственного распределения магнитного поля токовых элементов, с использованием принципа суперпозиции полей, показывает, что магнитные трубки с большой плотностью магнитной энергии обладают повышенным давлением $p = 0,5\mu_0 H^2$.

Поэтому в плоскости ZOY наклон силовых линий трубок φ_u увеличивается с удалением Y зоны контроля поля. Следовательно, необходимо учитывать увеличение b_s трубки при удалении по Z и Y , т. е. поле каждого ТЭ размером b_m имеет переменное сечение магнитного потока (рис. 4).

Расчёт напряжённости \vec{H} магнитных потоков ТЭ, представленных совокупностью $n_x \times n_y$ линейных проводников конечного размера b_m , выполнен с помощью закона Био-Савара: $d\vec{H} = I_k d\vec{b}_m \times h_0 / 4\pi |h|^3$, где $I_k d\vec{b}_m$ – ТЭ, создающий напряжённость \vec{H} в рабочем пространстве, а h – радиус-вектор, проведённый от ТЭ в точку определения напряжённости \vec{H} поля. Сечение трубки $\Delta S_m = \Delta b_s \Delta h_z$, где Δb_s , Δh_z – ширина и высота элементарной трубки магнитного потока.

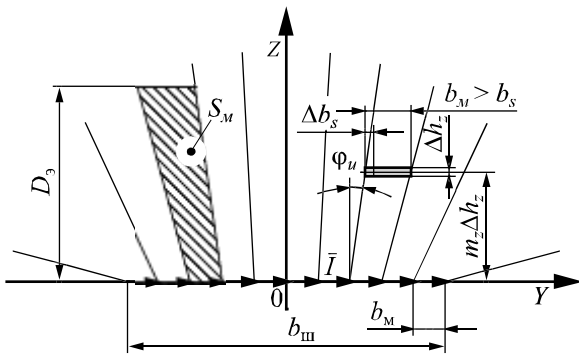


Рис.4. Сечения магнитных потоков ПН шины

Для расчёта Φ_i количество m_z трубок магнитного потока в направлении оси Z составляет $m_{z_i} = (0.5l_m - |x_{k_i}|) / \Delta x_k$, где l_m – длина магнитопровода; x_{k_i} – координата i -го ТЭ ПН; Δx_k – шаг размещения ТЭ вдоль оси X . Для расчёта Φ_{ij} используем выражение $m_{z_{ij}} = |x_{k_j} - x_{k_i}| / \Delta x_k$, где x_{k_j} – координата j -го ТЭ ПН.

Для определения границ синфазных квазистационарных конструктивно неограниченных электромагнитных полей ПН используется условие:

$$\sum_1^k H_{x_i} = \sum_{k+1}^{n_x} H_{x_i}, \tag{3}$$

где $\sum_1^k H_{x_i}$, $\sum_{k+1}^{n_x} H_{x_i}$ – суммы напряжённостей полей ПН, расположенных соответственно слева и справа от границы между k -м и $(k+1)$ -м преобразователями; k – порядковый номер ПН в МВП. Проекция силовых линий магнитной индукции на плоскость YZ , определяемая по условию (3), имеет нелинейный характер, но на рабочем участке может быть аппроксимирована прямыми линиями (рис. 4). Ширина сечения $b_s = f(h_z)$ определяется как:

$$b_{s_{ki}} = b_m + m_{z_{ki}} \Delta h_z (tg \varphi_{u_k} - tg \varphi_{u_{k-1}}), \tag{4}$$

где φ_{u_k} , $\varphi_{u_{k-1}}$ – углы отклонения проекций силовых линий магнитного потока от нормали к ТЭ k и $k-1$ преобразователей. Выражение (4) позволяет определить количество m_y учитываемых трубок магнитного потока вдоль оси Y : $m_y = b_s / \Delta b_s$. Погрешность численных расчётов индуктивности ПН зависит от выбора Δb_s . Однако уменьшение Δb_s ведёт к существенному росту времени вычислений.

Вносимая индуктивность ПН определяется вихревыми токами, наводимыми на поверхности ОК. Разбивая русло вихревых токов на дискретные элементы, определяем величину тока на участках поверхности рельса:

$$I_\sigma = \left(2 \sum_1^{n_x n_y} H_x \right) \Delta l_\sigma,$$

где Δl_σ – шаг дискретизации токовых элементов русла вихревых токов на поверхности ОК. Вносимая индуктивность $L_{\text{вн}}$ вычисляется по аналогии с (2):

$$L_{\text{вн}} = \sum_1^{n_x} \left(\sum_1^{n_x n_y} \sum_1^{m_z} \sum_1^{m_y} \Phi_{ik_m} \right) / I_\sigma, \tag{5}$$

Φ_{ik_m} – магнитный поток, создаваемый k -м ТЭ русла вихревых токов и охватывающий i -й ТЭ дискретной шины. Используя (2) и (5), для результирующей индуктивности преобразователя имеем:

$$L_p = L_n - L_{\text{вн}}.$$

Рассмотренный подход расчёта индуктивности сильносвязанных электромагнитных преобразователей реализован в программе моделирования полей дискретной токовой шины [4], с помощью которой получены характеристики $U_{\text{вн}} = f(h_z, h_y, \varphi_x)$, показывающие, что линейное размещение преобразователей позволяет получить различные чувствительности к контролируемым факторам, обеспечивающие пространственную селекцию геометрических параметров рельса. На рис. 5 показаны расчётные графики функций распределения вносимых индуктивностей $L_{\text{вн}}/L_{\text{вн}m} = f(h_y)$ ПН при вариации h_z . Из графиков видно, что максимальное значение $L_{\text{вн}}/L_{\text{вн}m} = f(h_z)$ имеет преобразователь, расположенный над серединой ОК (средний ПН — $y_k = 30$ мм). Для ПН, находящихся над краями ОК, функция $L_{\text{вн}}/L_{\text{вн}m} = f(h_y)$ имеет наибольшую крутизну.

Использование выражений (2), (5) при вариации значений вектора $\vec{P} = (h_z, h_y, b_r, \varphi_x)$ позволяет моделировать полевое взаимодействие МВП и ОК. Графики функций $L_{\text{вн}}/L_{\text{вн}m} = f(h_y, h_y)$ существенно отличаются от характеристик слабосвязанных ПН. Анализ функций $L_{\text{вн}}/L_{\text{вн}m} = f(h_y)$ (рис. 5) показывает, что для преобразователей, находящихся за пределами ОК, $L_p > L_n$. В соответствии с (3), данный результат можно объяснить тем, что компенсация возбуждающего поля, закрытого ПН полями вихревых токов ОК при $h_z \rightarrow 0$ уменьшает $\sum_{S_m} H_x$,

действующую на поле соседнего открытого ПН, при этом сильное увеличение $\sum_{S_m} \Delta S_m$ открытого ПН приводит к росту его L_p , что позволяет сделать вывод о доминирующем влиянии S_m на величину L_p .

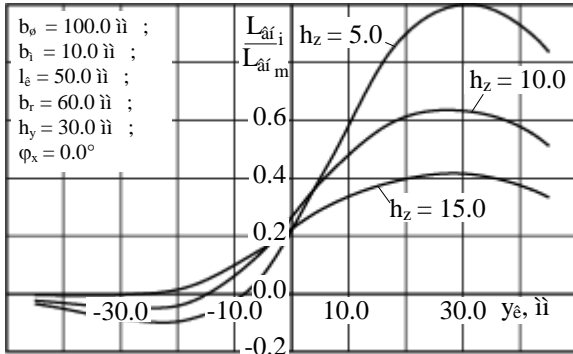


Рис.5. Функции распределения вносимой индуктивности $L_{вн}/L_{вн\ m} = f(h_z)$ при вариации h_z

Специализированный лабораторный стенд вихрекового контроля геометрических параметров объектов

Для проверки достоверности полученных теоретических результатов создан лабораторный стенд, учитывающий особенности разработанного МВП, структурная схема которого показана на рис. 6.

Разработанный МВП расположен над рельсом 1 и состоит из рабочих 2 и компенсационного 3 преобразователей, которые размещены в едином проводящем корпусе. Высокое значение частоты f генератора 5 соответствует распределению вихревых токов только на поверхности ОК, с глубиной проникновения $d_{эм} \rightarrow 0$. Для синфазного возбуждения переменных полей все преобразователи питаются от источника постоянного напряжения 8, а переменные токи создаются переходными колебательными процессами при коммутации цепи питания с LC-контурами с помощью синхронных ключей 4, управляемых от генератора 5. Преобразователи имеют одинаковое значение начальной индуктивности L_n . Период колебаний LC-контуров с рабочим и компенсационным преобразователями составляет $T_p = 2\pi\sqrt{L_p C}$ и $T_k = 2\pi\sqrt{L_k C}$. В устройстве 6 формирования выходных напряжений определяется разность $\Delta T = T_k - T_p$ и выполняется усреднение $\Delta \bar{T} = \sum_1^n \Delta T_i / n$, что позволяет снизить случайные погрешности. Выходной сигнал каждого измерительного канала определяется как $U = U_{эм} \Delta \bar{T} / T_s$, где $U_{эм}$ – напряжение источника питания; T_s – период, задаваемый генератором 5. Выходные напряжения U_i передаются в компьютер 7 для последующей обработки.

В качестве ОК использовались модели в виде плоских пластин различной ширины b_r , выполненные из алюминиевого сплава. Перемещения h_z, h_z, ϕ_x ОК относительно МВП задавались с помощью инструментального микроскопа ММИ-1.

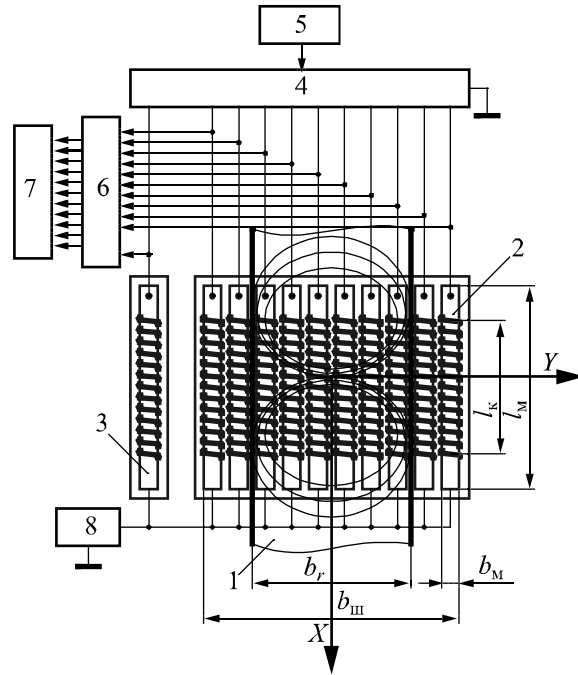


Рис.6. Структурная схема устройства контроля

На рис. 7 показана совокупность нелинейных характеристик $U_i = f(h_y)$ сильно связанных ПН МВП, полученных на лабораторном стенде. При перемещении h_y ОК относительно МВП только $n_{раб}$ ПН расположены над контролируемой поверхностью.

Основная погрешность δ_z измерения:

$$\delta_z = \sqrt{\delta_{сл}^2 + \delta_r^2 + \delta_{нл}^2},$$

где $\delta_{сл}$ – случайная погрешность, обусловленная слабо действующими факторами; δ_r – погрешность гистерезиса; $\delta_{нл}$ – погрешность нелинейности характеристик функций отклика. Ввиду усреднения U_i величиной $\delta_{сл}$ пренебрегаем. Погрешностью δ_r также пренебрегаем. Учитывается только погрешность $\delta_{нл}$ нелинейности при кусочно-линейной аппроксимации характеристик функции отклика, которая должна быть меньше допустимой и определяет шаг дискретизации по контролируемым факторам.

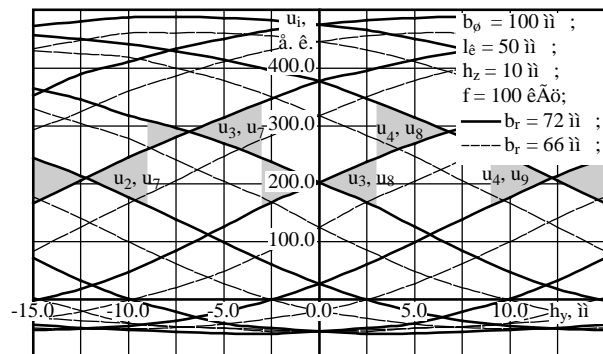


Рис.7. Характеристики $U_i = f(h_y)$ градуировочных массивов данных

Массив градуировочных сигналов относится к так называемой обучающей выборке. Объем N массива градуировочных сигналов

$$N = n_y (n_{pz} \cdot n_{py} \cdot n_{pb} \cdot n_{p\phi}),$$

где n_y – количество измерительных каналов, n_{pz} , n_{py} , n_{pb} , $n_{p\phi}$ – количество градуировочных точек по каждому фактору, определяемое шагом дискретизации градуировочных характеристик. Для заданных диапазонов изменения контролируемых факторов и выбранных шагов их дискретизации с учётом переналадок стенда общее время градуировки превышает 4 часа.

В алгоритмических методах процедура обработки экспериментальных данных формулируется как задача распознавания образов, в которой вектор контролируемых факторов $\bar{P}_s = \bar{P}_0 + \Delta\bar{P}_s$, где $\Delta\bar{P}_s$ – отклонение вектора \bar{P}_s контролируемых факторов от известного положения \bar{P}_0 в факторном пространстве. Представим вектор сигнальных напряжений $\bar{U}(\bar{P}_s)$ как отклонение от вектора напряжений $\bar{U}(\bar{P}_0)$ в градуировочной точке \bar{P}_0 факторного пространства:

$$\bar{U}(\bar{P}_0 + \Delta\bar{P}_s) = \bar{U}(\bar{P}_0) + \nabla\bar{U}\Delta\bar{P}_s + \varepsilon,$$

где $\bar{U}(\bar{P}_0 + \Delta\bar{P}_s) = \bar{U}(\bar{P}_s)$ – вектор сигнальных напряжений ПН блока; $\nabla\bar{U}$ – матрица, определяющая чувствительность ПН по каждому контролируемому фактору; ε – погрешность определения факторов. Выражая отклонение $\Delta\bar{P}_s$, получим:

$$\Delta\bar{P}_s = (\nabla\bar{U})^{-1} [\bar{U}(\bar{P}_0 + \Delta\bar{P}_s) - \bar{U}(\bar{P}_0)].$$

В линейном приближении, выбирая малый шаг дискретизации $\Delta\bar{P}$ факторного пространства, в котором чувствительность ПН к каждому фактору остаётся постоянной. Тогда коэффициенты $K = (k_z, k_y, k_b, k_\phi)$ отклонения вектора $\bar{U}(\bar{P}_s)$ от $\bar{U}(\bar{P}_0)$ равны коэффициентам отклонения \bar{P}_s от \bar{P}_0 . Для определения K по всем факторам выбираем дополнительные точки факторного пространства, отстоящие на шаг градуировки от \bar{P}_0 и ближайшие к \bar{P}_s . В каждой такой точке имеем вектора напряжений:

$$\begin{aligned} \bar{U}(\bar{P}_z) &= \bar{U}(h_{z_0} \pm \Delta h_z, h_{y_0}, b_{r_0}, \phi_{x_0}), \\ \bar{U}(\bar{P}_y) &= \bar{U}(h_{z_0}, h_{y_0} \pm \Delta h_y, b_{r_0}, \phi_{x_0}), \\ \bar{U}(\bar{P}_b) &= \bar{U}(h_{z_0}, h_{y_0}, b_{r_0} \pm \Delta b_r, \phi_{x_0}), \\ \bar{U}(\bar{P}_\phi) &= \bar{U}(h_{z_0}, h_{y_0}, b_{r_0}, \phi_{x_0} \pm \Delta\phi_x). \end{aligned} \quad (6)$$

Используя вектора напряжений (6), составляем систему линейных уравнений:

$$\begin{aligned} \bar{U}(\bar{P}_s) - \bar{U}(\bar{P}_0) &= k_z (\bar{U}(\bar{P}_z) - \bar{U}(\bar{P}_0)) + \\ &+ k_y (\bar{U}(\bar{P}_y) - \bar{U}(\bar{P}_0)) + k_b (\bar{U}(\bar{P}_b) - \bar{U}(\bar{P}_0)) + \\ &+ k_\phi (\bar{U}(\bar{P}_\phi) - \bar{U}(\bar{P}_0)), \end{aligned} \quad (7)$$

из которой находим коэффициенты отклонений вектора сигнальных напряжений по всем факторам. Количество уравнений соответствует количеству n_y ПН, поэтому система линейных уравнений (7) является переопределённой. Значения коэффициентов K определяем методом наименьших квадратов, реализованным во многих широко распространённых программах обработки экспериментальных данных. Условием существования решения системы (7) является наличие известных и различных $U_i = f_i(P)$, что обеспечивается заданной асимметрией в пространственном размещении ПН МВП относительно контролируемых факторов, приводящей к отличию от нуля функционального определителя (Якобиана):

$$\partial(U_1, U_2, \dots, U_n) / \partial(h_z, h_y, b_r, \phi_x) \neq 0.$$

При этом шаг размещения ПН в МВП определяется величиной b_m , связанной с начальным зазором безопасности h_{zn} .

Каждый фактор определяется как:

$$\begin{aligned} h_z &= h_{z_0} + k_z \Delta h_z, \quad h_y = h_{y_0} + k_y \Delta h_y, \\ b_r &= b_{r_0} + k_b \Delta b_r, \quad \phi_x = \phi_{x_0} + k_\phi \Delta \phi_x. \end{aligned}$$

Программное обеспечение [5] лабораторного стенда реализовано в среде Matlab с помощью интерпретатора со встроенного языка программирования вычислений, что позволяет без дополнительной перенастройки стенда изменять алгоритм обработки измерительных сигналов ПН. Быстродействие разрабатываемого устройства экспресс-контроля определялось с помощью специально разработанного тестового модуля. Время измерения составляет 20 мс, что при скорости движения подвижного состава 100 км/ч составляет не менее 15 отсчётов по длине рельса.

Выводы

Проведённый в ходе исследований сравнительный анализ известных систем контроля перемещений и геометрических параметров верха головки железнодорожного рельса в загрязнённой среде показывает перспективность разработки и применения матричных вихрековых преобразователей в устройствах многофакторного экспресс-контроля железнодорожной колеи. Выделенные контролируемые факторы характеризуют состояние (образ) рельса в колее.

Разработана математическая модель для численных расчётов электромагнитных полей матричных преобразователей, реализованных на дискретных токовых элементах. В отличие от известных моделей расчёт индуктивностей выполнен на основе оценки границ сечений конструктивно неограниченных магнитных потоков сильно связанных преобразователей.

Разработан компьютеризированный лабораторный стенд для экспериментальных исследований и градуировки многоканальной аппаратуры контроля перемещений и геометрических параметров объектов сложной формы, работающий в широком диапазоне линейных и угловых перемещений. Полученные характеристики подтверждают достоверность

теоретических расчётов. Алгоритм определения контролируемых факторов, представляющих образ объекта контроля, включает в себя решение системы линейных уравнений. Предлагаемое устройство позволяет повысить экономическую эффективность экспресс-контроля состояния железнодорожной колеи за счёт снижения затрат на оборудование диагностической системы.

Работа выполнена в соответствии с протоколом о намерениях по внедрению устройства экспресс-контроля железнодорожной колеи, заключённым с филиалом ОАО «РЖД Куйбышевская железная дорога». Лабораторный стенд используется в учебном процессе.

Литература

1. Компьютеризированные путеизмерительные вагоны-лаборатории и система мониторинга пути / С.В. Архангельский [и др.] // Информационные технологии в транспортных системах и управлении предприятиями:

сб. науч. тр. / под ред. С.В. Архангельского. - М.: Транспорт, 2000. - С. 8-16.

2. Меркулов, А.И. Электромагнитные преобразователи устройств измерения многокомпонентных перемещений изделий. Автореф. дисс. д. т. н. – Самара, 2000. – 36 с.
3. Пат. 2072519 РФ, МКИ G 01N 27/90. Устройство вихретокового неразрушающего контроля поверхности материала конструктивных элементов / А. Шольц (DE), Р. Шмидт (DE) - № 4742954/28; Заявл. 31.01.90; Опубл. 27.01.97.
4. Лавров, А. Ю. Моделирование вихретокового устройства экспресс-контроля изделий сложной формы. / А. Ю.Лавров // Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 9378 от 26.10.2007. М.: ВНИИЦ — № 50200402380
5. Лавров А. Ю. Монитор экспресс-контроля геометрических параметров изделий сложной формы PVGR1a v.2.03 / А. Ю.Лавров // Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 9304 от 20.10.2007. М.: ВНИИЦ — № 50200702321

THE CONTACTLESS EXPRESS TRAIN-CONTROL MUTUAL POSITION OF RAILS OF THE RAILWAY TRACK

A.J. Lavrov¹, A.I. Merkulov¹

¹S.P. Korolyov Samara State Aerospace University, Samara, Russia

Abstract

In article the device of the control of linear vertical, linear cross-section horizontal and angular movings, and also width of top of a head of a rail is considered. Matrix configuration and inphase excitation eddy current the converters is offered, allowing to create the common electromagnetic field providing the control over a wide range of change of geometrical parameters. The technique of recognition of an electromagnetic image of a rail is based on selection of controllable factors by means of digital processing measuring signals.

Keywords: electromechanical scanning system, noncontact express-monitoring of railway track, matrix eddy-current transducer, electromagnetic pattern recognition.

Citation: Lavrov AJu, Merkulov AI. The contactless express train-control mutual position of rails of the railway track. *Computer Optics* 2008; 32(3): 270-6.

References

- [1] Arkhangelskiy SV, ed. Computerized track-measurement test cars and track monitoring systems [In Russian]. Information Technology in Transport Systems and Companies Management Systems Proceedings. Moscow: Transport 2000; 8-16.
- [2] Merkulov AI. Electromagnetic transformers for measuring devices of multiple movings [In Russian]. Extended Abstract of Doctor of Sci. (Eng.) Dissertation. Samara 2000; 36 p.
- [3] Scholtz A, Schmidt R. Eddy current non-destructive testing device for structural parts material surface. Patent 2072519 RF, MKI G 01N 27/90 No.4742954/28. Patent Application (January 31, 1990). Issue (January 27, 1997).
- [4] Lavrov AYu. Modeling of eddy current express-testing device for shaped goods [In Russian]. Certificate of industrial invention registration No. 9378 dated October 26, 2007. Moscow: VNTITs (Russian National Research and Technology Information Centre) — No. 50200402380.
- [5] Lavrov AYu. Express-control monitoring of geometrical parameters of shaped goods PVGR1a v.2.03. Certificate of industrial invention registration No. 9304 dated October 20, 2007. Moscow: VNTITs (Russian National Research and Technology Information Centre) — No. 50200702321.