

## СИСТЕМА ДИСТАНЦИОННОГО ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ СЕЧЕНИЯ ПРОВОДА КОНТАКТНЫХ СЕТЕЙ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

© 2008 г. В. С. Базин; А. Г. Верхогляд; И. А. Выхристюк; С. В. Каличкин; В. Э. Каликин; С. Н. Макаров; М. Ф. Ступак, канд. физ.-мат. наук; Ю. В. Чугуй, доктор техн. наук

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, г. Новосибирск

E-mail: chugui@tdisie.nsc.ru

На основе метода оптического структурного освещения разработана и создана система автоматического измерения износа и обнаружения дефектов провода контактных сетей железных дорог. Система определяет остаточную высоту контактного провода с погрешностью 0,1 мм, площадь поперечного сечения провода со среднеквадратической погрешностью 1,5 мм<sup>2</sup> при скоростях движения до 60 км/ч, что является достаточным для уверенного принятия решений по замене изношенных участков контактных сетей. Система также может использоваться для измерения износа проводов контактной сети городского транспорта и для технологического контроля геометрических параметров при производстве кабельной и трубной продукции.

Коды OCIS: 120.0120.

Поступила в редакцию 12.07.2007.

### Введение

Безопасность эксплуатации железнодорожного транспорта требует непрерывного контроля геометрических параметров изнашиваемых конструкций, включая контроль износа контактного провода и наличия дефектов основных элементов контактной сети. Вследствие трения токоприемника о провод конфигурация провода подвергается изменению, поэтому необходим мониторинг его состояния. Мониторинг должен осуществляться бесконтактным способом, так как провод находится всегда под высоким напряжением (до 30 кВ). Разрабатываемая система должна быть достаточно компактной и удовлетворять следующим требованиям: возможность контроля до четырех проводов одновременно с пространственным шагом измерений не более 10 мм, остаточная высота провода должна измеряться с погрешностью не более 0,2 мм. Для решения подобных задач часто используется теневой метод [1–4]. Однако он имеет свои известные ограничения. Так, в случае теневых изображений от непрозрачных вогнутых объектов может иметь место потеря информации о геометрии провода. Поэтому такой метод обычно применяется только для контроля непрозрачных объектов, имеющих выпуклую форму. Более того, этот метод предполагает, что источник света и приемник должны быть расположены с разных сторон объекта. Эти обстоятельства затрудняют применение теневого метода для измерения геометрии износа контактного провода и исключают возможность дефектоскопии самой поверхности.

В данной работе использовался метод решения указанной задачи с применением структурного освещения [5], а также лазерной системы для автоматического дистанционного контроля геометрии и дефектов контактных проводов. Ниже дается описание метода, приводятся общая схема измерительного модуля, алгоритмы обработки изображений для определения износа, а также результаты испытаний и тестирования системы на Западно-Сибирской железной дороге.

### Метод измерений

Как известно, в ходе эксплуатации контактного провода (рис. 1а) появляются различные дефекты его геометрии, которые необходимо своевременно обнаружить и устранить (рис. 1б, 1в, 1г). Основным дефектом, ведущим к увеличению удельного сопротивления и вероятности разрыва провода, – уменьшение площади поперечного сечения. Критическими также являются дефекты типа “поворот” (рис. 1в), при котором провод может быть повернут в плос-

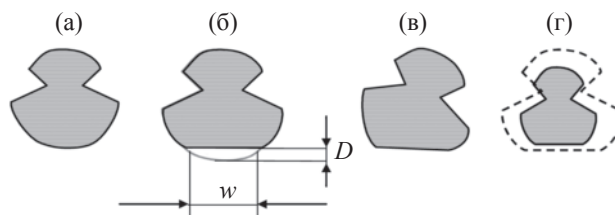
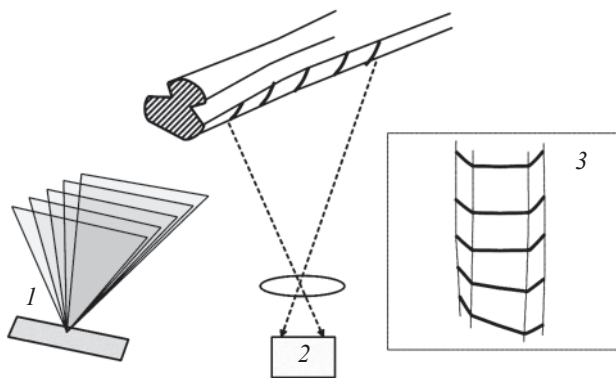


Рис. 1. Форма сечения неизношенного (а) и изношенных проводов (б–г).

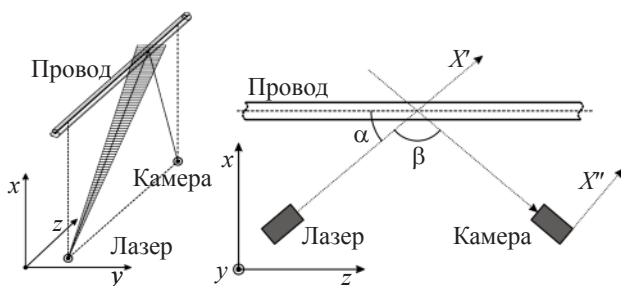
кости сечения, и дефекты типа “шейка” (рис. 1г), когда сечение провода уменьшается по всем направлениям. Износ провода характеризуется двумя основными параметрами, а именно шириной контактной поверхности  $w$  и глубиной износа  $D$  (рис. 1б).

Для обнаружения этих дефектов и измерения основных параметров износа авторами предложен метод структурного освещения (рис. 2). Лазерный осветитель формирует один или несколько параллельных плоских пучков излучения под некоторым углом к контактному проводу. Отраженное от поверхности провода излучение регистрируется цифровой видеокамерой. Полученное изображение представляет собой кривую, которая образована пересечением плоскости пучка с поверхностью контактного провода (рис. 2).

Форма контура сечения определяется углами наклона плоскости луча подсветки и направления наблюдения к оси контактного провода (рис. 3).



**Рис. 2.** Схема определения формы контура сечения с использованием структурного освещения. 1 – лазерный осветитель, 2 – видеокамера, 3 – регистрируемое изображение.



**Рис. 3.** Пространственное расположение провода, осветителя и видеокамеры в координатах  $XYZ$  (а) и вид в плоскости  $XZ$  (б).

Полагая, что поверхность контактного провода в области пересечения с лазерным пучком является частью цилиндрической поверхности и вдоль оси  $Z$  контур сечения провода в плоскости  $X'Y'$  остается неизменным, можно считать, что контур, регистрируемый камерой, соответствует этому контуру. При этом контур сечения провода плоскостью  $X'Y'$  будет получаться из контура сечения плоскостью  $X'Y'$  путем преобразования координаты  $x$  согласно выражению  $x' = x/\sin\alpha$ .

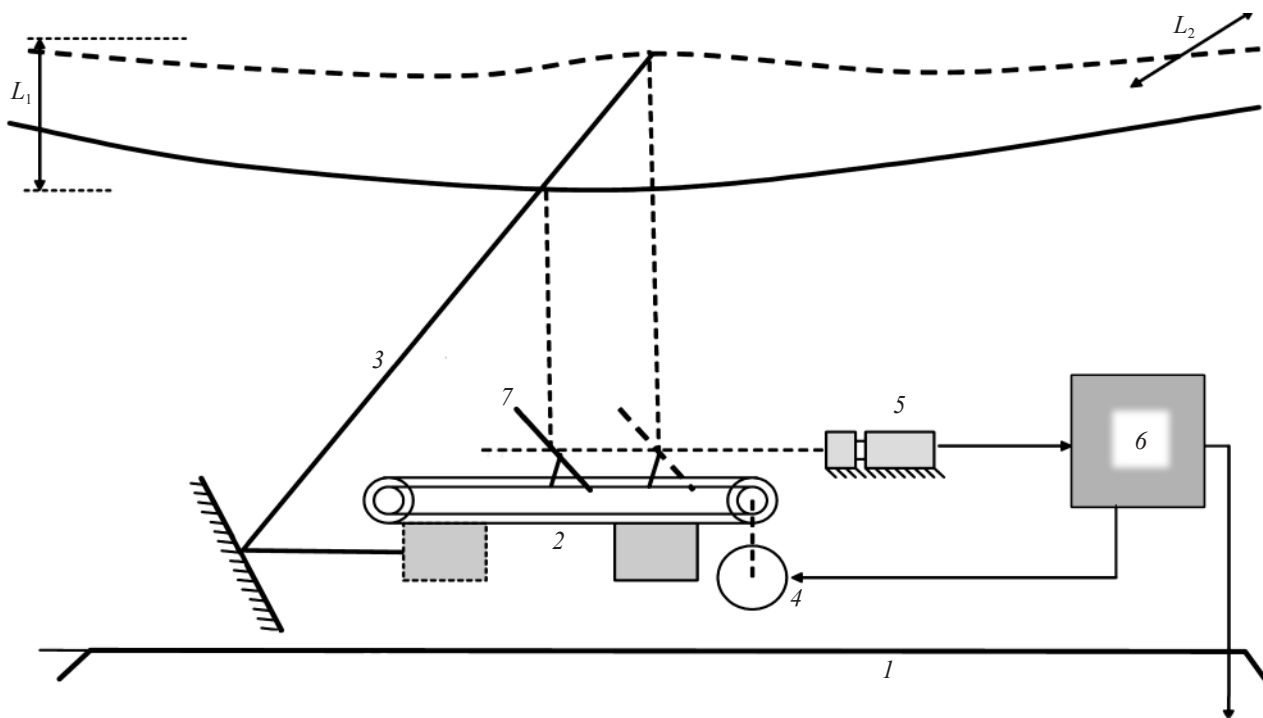
Если оптическая ось камеры пересекается с плоскостью  $X'Y'$  под углом  $\beta$ , то проекция сечения провода в плоскости  $X'Y'$  на плоскость матрицы фотокамеры ( $X''Y''$ ) будет описываться преобразованием  $x'' = x'\sin\beta$ . В результате координаты  $X''$  и  $X'$  связаны соотношением  $x'' = x\sin\beta/\sin\alpha$ . Если углы  $\alpha$  и  $\beta$  равны между собой, то контуры проекций в плоскостях  $X'Y'$  и  $X''Y''$  будут идентичными. Для удобства конструкции углы  $\alpha$  и  $\beta$  выбраны равными  $\pi/4$ . Отметим, что для получения корректных результатов при средней высоте измеряемой поверхности в 6 мм требуется постоянство формы сечения провода на протяжении 8,5 мм, что реализуется на практике.

### Конструкция измерительной системы

Описанный выше метод был положен в основу измерительной системы. Конструктивно она состоит (рис. 4) из измерительного модуля, расположенного на крыше вагона, и станции накопления и обработки данных, расположенной внутри вагона.

Измерительный модуль предназначен для получения первичной видеоинформации, содержащей данные о геометрических параметрах тестируемой контактной линии. Он состоит из осветителя и блока регистрации изображения. Станцией накопления и обработки данных осуществляется сбор информации, полученной из измерительного модуля, ее обработка и вычисление контролируемых параметров, а также архивирование требуемой информации.

При использовании метода структурного освещения лазерный осветитель должен обеспечивать заданное распределение интенсивности света во всем измерительном объеме, который, применительно к контролю геометрических характеристик контактного провода, имеет следующие размеры: примерно 1000 мм по ширине (из-за зигзага провода относительно оси пути) и примерно 1500 мм по протяженности в глубину (из-за возможных изменений высоты провода относительно поверхности железнодорожного полотна). Однако создание такого осветителя представляется практически нереальным. Поэтому было реализовано слежение за



**Рис. 4.** Общая схема измерительного модуля. 1 – крыша вагона-лаборатории, 2 – подвижный лазерный осветитель, 3 – лазерный пучок, 4 – мотор системы слежения, 5 – видеокамеры, 6 – компьютер и контроллер мотора слежения, 7 – подвижное зеркало;  $L_1$  и  $L_2$  – диапазоны отклонения провода по высоте и горизонтали.

смещением провода от точки оптимальной фокусировки следующим образом: с помощью механической системы синхронно с изменением высоты провода проводилось перемещение осветителя так, что длина оптического пути от провода до осветителя оставалась постоянной.

Также с целью снижения требований к глубине резкости объектива регистрирующей системы и устранения необходимости постоянного пересчета получаемых данных при изменении масштаба изображения провода проиодилось (синхронно с перемещением осветителя) перемещение видеокамеры так, чтобы при изменении высоты провода длина оптического пути от видеокамеры до провода также оставалась постоянной и равнялась 2500 мм.

В качестве источника излучения выбран полупроводниковый лазер марки АТС-С4000 с длиной волны излучения 810 нм. Излучение лазера формировалось в плоский пучок с помощью цилиндрической линзы и объектива “Юпитер-8”. При оптимальном расстоянии от осветителя до контролируемого объекта ширина пучка составляла более 1 м, что превышало диапазон поперечных перемещений провода. При этом “толщина” световой плоскости в точке наилучшей фокусировки не превышала 2 мм. В блоке регистрации использовались три

(с целью перекрытия по ширине всей зоны измерения) видеокамеры Pixelink PL-A741 с объективом фирмы COMPUTAR (фокусное расстояние  $F = 50$  мм,  $F/1,3$ ). Для устранения внешних засветок перед объективами видеокамер устанавливались интерференционные светофильтры. Светофильтры рассчитывались так, что при отклонении длины волны излучения от максимума пропускания (810 нм) на 4 нм коэффициент пропускания уменьшался в 100 раз. При данных параметрах и времени накопления примерно 0,1 мс полезный сигнал составлял величину порядка 700 мкВт/см<sup>2</sup>.

#### Алгоритм вычисления геометрии износа провода

Для создания реально работающей системы необходимо учитывать ряд факторов, связанных с недостаточным пространственным разрешением видеокамеры и невозможностью фокусировки излучения в очень тонкую линию на расстояниях порядка 2 м, которые во многом определяют точность измерений. Как показали эксперименты, заданной точности можно достичь, применяя соответствующие алгоритмы обработки. Весь анализ видеоизображения разбивается на несколько этапов.

На первом из них осуществляется нахождение информативных участков видеоизображения, т. е. участков кадра, содержащих изображение сечения провода лазерной плоскостью. Такие участки ищутся как связанные пиксельные области с достаточно большим числом пикселей. Для упрощения поиска эти связанные компоненты отслеживаются на последовательности кадров во время проведения процедуры измерений. Выделенное таким образом изображение, подлежащее дальнейшей обработке, показано на рис. 5а.

Видно, что вместо тонкой линии сечения провода лучом лазера наблюдается ее размытое (в вертикальном направлении) изображение. При дальнейшей обработке предполагается, что сечение провода на расстоянии около 10 мм меняется незначительно (в пределах погрешности измерений), что подтверждается на практике. Это позволяет на втором этапе обработки свернуть (по вертикали) размытое изображение в линию, выполнив операцию нахождения центров масс по яркости для каждого вертикального столбца пикселей изображения (рис. 5б). Далее, путем обработки кривой, представленной найденными центрами масс, определяется профиль сечения провода. Для этого из всех найденных цен-

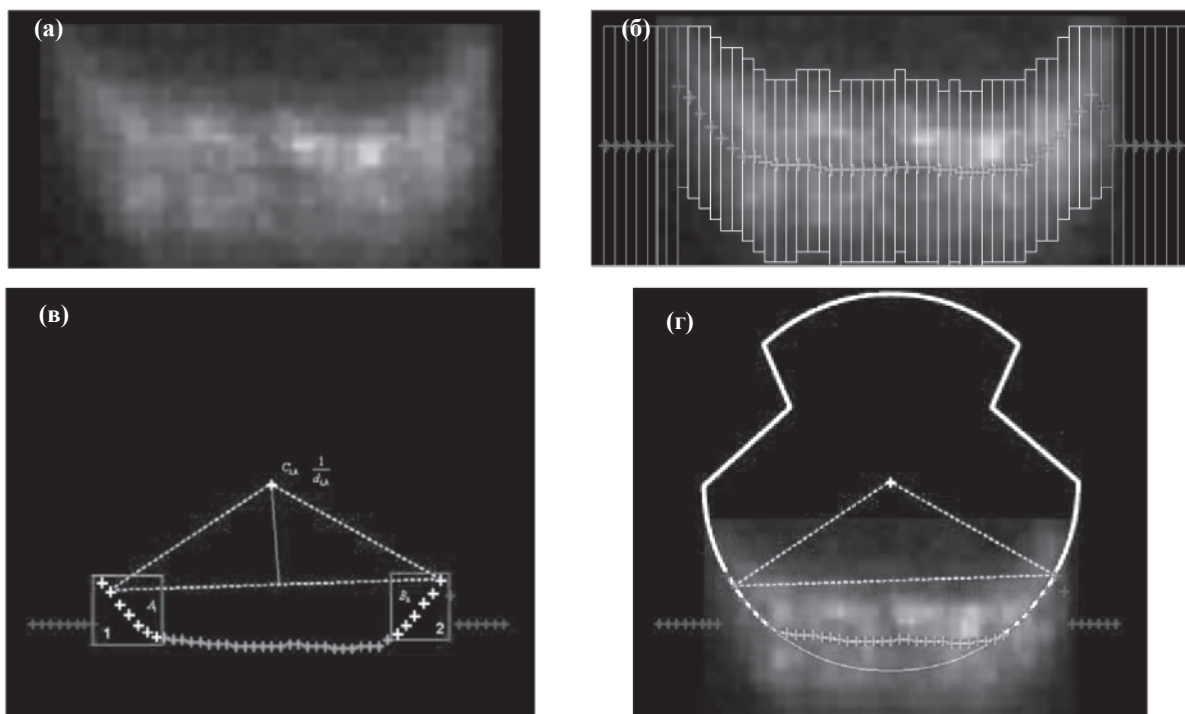
тров алгоритмически выделяются центры, принадлежащие неизношенной части провода (рис. 5в). В этих областях поверхность провода в рассматриваемом сечении имеет округлую форму, что позволяет статистическими методами вычислить центр контура сечения как центр окружности, наиболее близкой к исходному набору точек (рис. 5в), и затем восстановить форму сечения провода (рис. 5г).

Более детально алгоритм вычисления геометрического центра сечения выглядит следующим образом:

а) проводится перебор всех возможных сочетаний  $(A_i, B_k)$ , где  $A_i$  – множество точек, принадлежащих к левой половине провода, а  $B_k$  – множество точек, принадлежащих к правой половине провода, при этом  $A_i$  пробегает все точки первой группы, а  $B_k$  – второй (на рис. 5в данные группы точек обозначены цифрами 1 и 2);

б) для каждого сочетания осуществляется поиск центра окружности  $C_{i,k}$  с известным радиусом  $R$ , содержащим обе точки;

в) вычисляется среднеквадратическое отклонение  $d_{i,k}$  всех точек обеих групп от окружности, определенной на предыдущем шаге;



**Рис. 5.** Этапы обработки видеоизображений. а – исходное изображение информативного участка, б – нахождение центров масс, в – использование групп центров белого цвета для нахождения центра провода, г – восстановление формы сечения провода по найденному центру.

г) после перебора всех комбинаций искомым центр сечения провода определяется по формуле

$$C = \sum_{i,k} C_{i,k} \frac{1}{d_{i,k}} / \sum_{i,k} \frac{1}{d_{i,k}}, \text{ т. е. находится как центр}$$

масс определенных ранее точек  $C_{i,k}$  с весами  $1/d_{i,k}$ .

Предполагается, что размер сечения и критическая высота износа определяются маркой провода и заданы изначально. В случае, если одна из групп вырождается в точку (или в ней слишком мало центров), указанные действия проводятся в пределах оставшейся группы.

В программном обеспечении также учтена проверка эффективности реализованного алгоритма, позволяющая определить, содержало ли изображение информацию об измеряемом нами дефекте. Изображения, содержащие информацию о критическом износе, а также изображения, отсеянные по

посткритериям, вместе с результатами обработки помещаются в специализированную базу данных.

### Результаты испытаний и тестирования системы

Опытный образец автоматизированной системы для обмера провода с использованием метода структурного освещения, созданный в КТИ НП СО РАН, был испытан на Западно-Сибирской железной дороге (станция Сеятель). При сравнительных испытаниях проводились замеры остаточной высоты провода как с помощью описываемой системы, так и штатным способом? вручную (микрометром). Автоматические измерения проводились при скорости движения 5 км/ч, хотя технические характеристики системы позволяют проводить измерения при скоростях движения до 60 км/ч. Скорость измере-

Результаты сравнения измерений остаточной высоты провода системой и микрометром

№	Остаточная высота левой половины провода, автоматические измерения, мм	Остаточная высота правой половины провода, автоматические измерения, мм	Разница результатов измерения остаточной высоты левой половины провода автоматическим и ручным методами, мм	Разница результатов измерения остаточной высоты правой половины провода автоматическим и ручным методами, мм
1	10,26	10,7	0,04	0,05
2	10,26	10,17	-0,01	-0,12
3	10,32	10,18	-0,02	-0,13
4	10,7	10,34	-0,3	-0,14
5	10,35	10,35	-0,15	-0,2
6	10,3	10,63	0,05	-0,03
7	10,23	10,28	0,07	0,07
8	10,77	10,32	0,13	-0,32
9	11,01	10,9	0,09	0
10	9,99	10,58	-0,14	-0,08
11	10,24	10,28	0,21	-0,18
12	10,75	10,41	0	-0,16
13	10,31	10,3	-0,01	-0,1
14	10,38	10,71	0,12	0,04
15	10,22	10,7	0,03	-0,05
16	10,46	10,37	0,04	0,13
17	10,4	10,77	-0,15	-0,02
18	10,03	10,75	0,17	0
19	10,31	11,26	0,09	-0,16
20	10,42	10,61	0,08	0,04
21	10,77	10,98	0,03	-0,03
22	10,75	10,67	-0,05	0,13
Ср. значение ошибки измерения, мм			0,015	-0,04
Стандартное отклонение, мм			0,12	0,12

ний  $\approx 150$  изм./с. Результаты сравнительных испытаний представлены в таблице.

Среднеквадратичная ошибка определения площади износа описываемой системой составляет  $1,5 \text{ мм}^2$  при полном сечении провода в  $100 \text{ мм}^2$ .

### Заключение

Для решения задачи автоматического дистанционного контроля износа контактного провода была разработана и создана лазерная система на основе метода структурного освещения. Результаты предварительных испытаний системы показывают хорошее совпадение полученных данных с результатами прямых (ручных) измерений. Погрешность измерений системы не превышала  $0,15 \text{ мм}$  при частоте измерений примерно  $150$  изм./с, которые проводились через каждые  $5 \text{ мм}$  при скорости движения транспортного средства  $5 \text{ км/ч}$ . Технические характеристики системы позволяют проводить измерения при скоростях движения до  $60 \text{ км/ч}$  при той же частоте измерений. В настоящее время система находится в опытной эксплуатации на Западно-Сибирской железной дороге. Аналоги системы также могут быть применены для измерения износа

проводов контактной сети городского транспорта и для технологического контроля геометрических параметров при производстве кабельной и трубной продукции.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Galiulin Rav. M., Galiulin Rish. M., Bakirov J.M., Bogdanov D.R., Vorontsov A.V., Tumashinov A.V., Petrov S.V.* Optoelectronic computer aided systems for inspection of gas-turbine engine complex objects // Proc. SPIE. 2002. V. 4900. P. 178–184.
2. *Leopold J., Günther H.* Fast 3-D measurement of gear wheels // Proc. SPIE. 2002. V. 4900. P. 185–194.
3. *Weckenmann A., Nalbant K.* Measurement of conformity and wear of cutting tool inserts // Proc. SPIE. 2002. V. 4900. P. 541–547.
4. *Gromilin O.G., Kuchinskii K.I., Ladygin V.I., Yunoshev S.P.* Control System of Industrial Product Geometrical Parameters on the Basis of the Shadow image Analysis // Pattern Recognition and Image Analysis. 1999. V. 9. № 1. P. 141–142.
5. *Skotheim O., Couweleers F.* Structured light projection for accurate 3D shape determination // Proc. of 12<sup>th</sup> Intern. Conf. on Experimental Mechanics (ICEM12). Italy. Bari, McGraw-Hill, 2004.