

Ю. В. Чугуй

ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРИМЕНЕНИЙ

Представлены результаты работ Конструкторско-технологического института научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук (КТИ НП СО РАН) по разработке, созданию и поставке новейших измерительных и лазерных технологий и систем для решения проблем безопасности в ядерной энергетике, на железнодорожном транспорте, в нефтедобывающей промышленности и в других отраслях. Приводятся технические характеристики ряда созданных приборов и систем.

Ключевые слова: оптические измерительные технологии, лазерные технологии, безопасность, ядерный реактор, дистанционирующая решетка, метод структурного освещения, триангуляционный метод.

Повышение безопасности стратегических объектов в ведущих отраслях страны, улучшение качества продукции и снижение ее себестоимости – одна из неотложных задач российской экономики. Для решения этой задачи КТИ НП разработаны, созданы и внедрены на предприятиях страны десятки новейших измерительных систем. Перечислим наиболее значимые среди систем контроля геометрии трехмерных промышленных изделий и объектов: для железнодорожного транспорта – автоматизированная система контроля геометрии колесных пар грузовых вагонов на ходу поезда, автоматическая система измерения износа контактного провода при движении; для атомной промышленности – серия различных оптико-электронных систем измерения геометрических размеров и поверхностных дефектов элементов топливных сборок ядерных реакторов; для космической отрасли – программируемый цеховой комплекс контроля в реальном времени формы ответственных крупногабаритных 3D-изделий на основе распределенных оптоэлектронных датчиков; для нефтегазодобывающей отрасли – автоматическое оптико-электронное устройство круглосуточного измерения смещений и деформаций элементов механических и инженерных конструкций. Они выгодно отличаются от своих аналогов не только по совокупности параметров, но и по идеям, лежащим в основе технических решений, использованных для разработки этих систем, что подтверждается как их апробацией на различных международных конференциях, так и надежной многолетней промышленной эксплуатацией.

Приведем описание и технические характеристики некоторых систем.

Оптико-электронная лазерная измерительная машина контроля основных геометрических параметров дистанционирующих решеток. Система (рис. 1) предназначена для автоматического бесконтактного трехмерного контроля с микронным разрешением всех геометрических параметров дистанционирующих решеток (ДР) тепловыделяющих сборок ядерных реакторов (количество ячеек > 300 шт.).

Принцип действия лазерной измерительной машины (ЛИМ) основан на анализе изображений ячеек ДР, освещенных тремя матрицами в виде 12×13 световых пучков. Рассеянный поверхностями ячейки свет воспринимается тремя ПЗС-камерами, сигнал с которых передается в компьютер для вычисления геометрических параметров

ячейки. Использование двухкоординатного прецизионного сканирующего стола позволяет получить информацию о всех ячейках ДР и ее геометрии в целом. Производительность такой машины в 300 раз больше, чем производительность существующих координатно-измерительных машин. Система с 2003 г. находится в промышленной эксплуатации в ОАО «НЗХК» для выборочного контроля решеток типов ТВСА, ТВС-2 и отладки технологических процессов. Погрешность измерений ЛИМ в зависимости от контролируемого параметра составляет 10–100 мкм.



Рис. 1. Внешний вид лазерной измерительной машины для контроля дистанционирующих решеток

В последнее время номенклатура выпускаемых шестигранных ДР значительно расширилась. При этом заметно возросли требования к точности измерений. Более того, с выходом российских предприятий на мировой рынок началось производство ТВС с квадратными ДР западного типа. В связи с этим возникла потребность в создании новой универсальной ЛИМ. Такая ЛИМ по заказу корпорации «ТВЭЛ» была создана для ОАО «НЗХК» [1]. В настоящее время идет ее подготовка к производственным испытаниям. В новой ЛИМ для контроля ДР использован метод структурного освещения на основе осесимметричного дифракционного оптического элемента (ДОЭ). При этом освещение объекта формируется в виде колец. Освещенная поверхность ячейки проецируется на фотоприемную матрицу камеры с помощью специального объектива, имеющего большую кривизну поля и дисторсию. Он фокусирует различные сечения по глубине в плоскость фотоприемника; при этом, чем ближе сечение объекта, тем больше радиус его изображе-

ния. Для измерения всех геометрических параметров ДР используется прецизионный двухкоординатный стол в целях ее перемещения в плоскости, перпендикулярной оптической оси системы. Измерение разных типов ДР обеспечивается сменой ДОО с помощью револьверного механизма.

Система дефектоскопии урансодержащих таблеток «Дефект». Она предназначена для обнаружения и распознавания поверхностных дефектов топливных таблеток и их автоматической отбраковки (рис. 2).

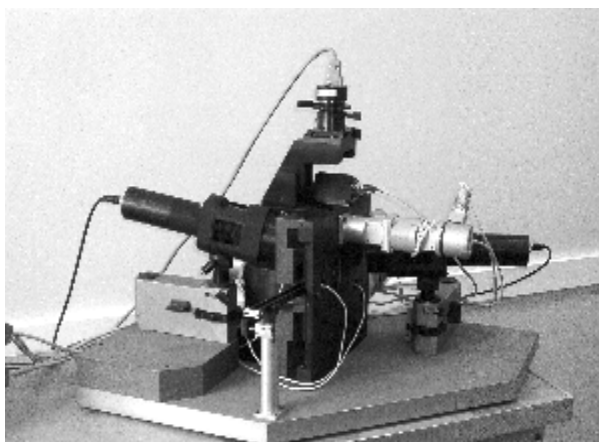


Рис. 2. Система дефектоскопии урансодержащих таблеток «Дефект»

В основе метода измерения – формирование путем специального освещения высококонтрастных изображений поверхностей таблетки, ввод их в ЭВМ с помощью матричных фотоприемников на ПЗС и обработка в реальном времени. На базе разработанного метода и программного обеспечения (совместно с ИМ СО РАН) впервые в мире была создана система дефектоскопии урансодержащих таблеток «Дефект».

Два блока с помощью ПЗС-камер регистрируют изображение торцевых поверхностей таблетки. Третий блок, использующий линейную ПЗС-камеру, регистрирует изображение боковой поверхности таблетки. Отбраковщик дефектных таблеток установлен на выходе системы. Таблетки перемещаются с помощью транспортирующего механизма с шаговым приводом в старстопном режиме с периодом примерно 1 с. Управление системой осуществляется от контроллера. Развертка боковой поверхности производится за счет вращения таблетки и сканирования с помощью камеры на ПЗС-линейке. Полученные изображения поверхностей таблеток обрабатываются в компьютере.

Алгоритм обработки изображения торца включает следующие этапы: поиск внешних контуров белых участков, построение границы белого участка, коррекция границы плоской части торца, поиск границы отверстия, поиск дефектов, отбраковка [2]. Решение об отбраковке изделия принимается с помощью методов распознавания образов по следующему логическому решающему правилу:

$$\text{If } (s > s_1), \vee (S > S^*), \text{ then («Брак»),} \quad (1)$$

где s – площадь очередного дефекта; s_1 – допустимая площадь отдельного дефекта; S – сумма площадей дефектов;

S^* – допустимая суммарная площадь дефектов.

Алгоритм обработки изображения боковой поверхности включает следующие этапы: поиск границ боковой поверхности, отбраковка по ширине изображения, отбраковка по проскальзыванию, выделение темных дефектов, выделение светлых дефектов, определение размеров дефектов, исключение мелких и ложных дефектов, исключение вложенных дефектов. Решение об отбраковке изделия по трещинам и другим дефектам принимается в соответствии со следующим логическим правилом:

$$\text{If } (s_{i\max} > s_o), \vee (S_p > S_{p0}), \vee (l_{j\max} > l_o), \vee (L_q > L_{q0}), \\ \text{then («Брак»),} \quad (2)$$

где s_i – площадь i -го дефекта; s_o – допустимая площадь отдельного дефекта; S_p – суммарная площадь всех p дефектов; S_{p0} – допустимая суммарная площадь всех дефектов; l_j – длина j -й трещины; l_o – допустимая длина отдельной трещины; L_q – суммарная длина всех q трещин; L_{q0} – допустимая суммарная длина всех трещин.

Система имеет следующие характеристики: высота контролируемой таблетки – от 9 до 12 мм; диаметр таблетки – от 7,5 до 7,6 мм; производительность – 1 таблетка/с при минимальном размере обнаруживаемого дефекта 100 мкм; виды обнаруживаемых дефектов – дефекты на торцевых поверхностях в соответствии с атласом дефектов; вероятность обнаружения дефектных таблеток не менее 0,95. Система успешно испытана на имитаторах и реальных таблетках в ОАО «МСЗ» в 2005 г.

Автоматическая система контроля геометрии колесных пар грузовых вагонов на ходу поезда. В течение семи лет в КТИ НП активно ведутся работы по решению актуальных задач железнодорожной отрасли. Институту удалось в предельно сжатые сроки разработать и создать уникальную всепогодную систему «Комплекс» (рис. 3) – автоматическую систему контроля геометрии колесных пар грузовых вагонов на ходу поезда (до 60 км/ч) [3]. Система предназначена для контроля более десятка геометрических параметров колесных пар вагонов с быстроедействием до ста тысяч измерений в секунду. Она выгодно отличается от своих зарубежных аналогов по ценовым параметрам и функциональным характеристикам.

В основе технического решения при создании системы «Комплекс» лежит принцип самосканирования колесной пары (рис. 3) с использованием набора активных лазерных дальномеров (триангуляционного типа), при котором каждое из колес параллельно и независимо сканируется двумя измерительными датчиками – внутренним и наружным, установленными внутри рельсового пути и снаружи соответственно.

При движении колесной пары каждый из датчиков измеряет текущее расстояние до поверхности колеса (вдоль заданного направления измерения). В итоге формируются сигналы, отражающие текущий профиль колесной пары в некотором сечении, угол и высота которого определяются направлениями измерения датчиков.

Данные сечения соответствуют сечениям колесной пары плоскостями, наклоненными к горизонтальной плоскости под некоторыми известными (заранее определенными) углами установки датчиков. Далее эти сечения в системе отсчета датчиков пересчитываются в общую (гло-

бальную) ортогональную систему отсчета, в которой ось X направлена вдоль оси пути, ось Y – поперек оси пути, ось Z – вертикально вверх. Затем, получив координаты точек на поверхности колеса в глобальной системе координат и используя дополнительные параметры взаимного расположения датчиков, полученные при калибровке системы «Комплекс», рассчитываются координаты точек в системе отсчета колеса. Таким образом восстанавливается поперечное сечение (разрез) колесной пары. Типичный профиль восстановленного поперечного сечения приведен на рис. 4. Затем по восстановленному профилю вычисляются требуемые геометрические параметры, при этом алгоритм расчета параметров повторяет методику их измерения при помощи стандартного контактного инструмента.

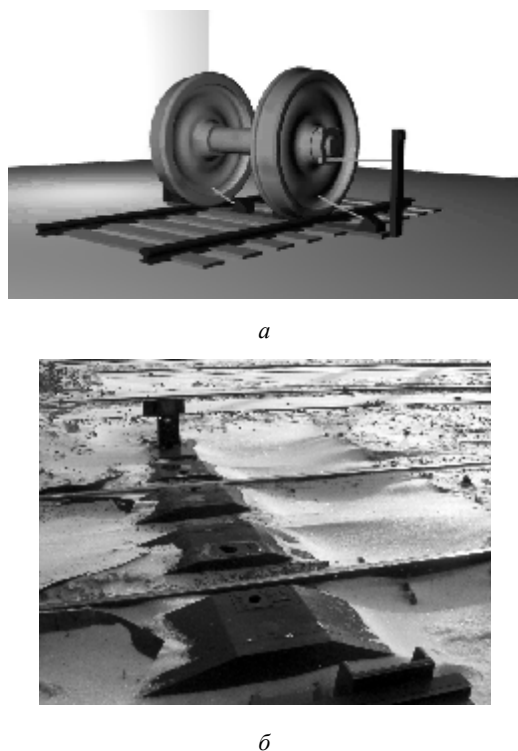


Рис. 3. Система «Комплекс»: а – принцип лазерного автосканирования геометрических параметров колесной пары системой; б – внешний вид измерительной части системы

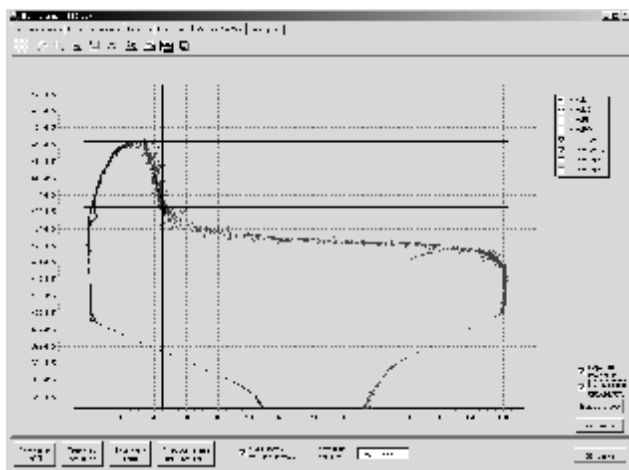


Рис. 4. Восстановленный поперечный профиль колеса

На Западно-Сибирской железной дороге первая система заработала в 2002 г., а сегодня уже 53 системы успешно эксплуатируются на одиннадцати железных дорогах России (всего поставлено 64 системы «Комплекс»). За это время с помощью системы «Комплекс» несколько десятков тысяч грузовых вагонов было отцеплено для замены «стершихся» колес, которые могут привести к сходу поезда.

Система дистанционного оптического контроля сечения провода контактных сетей железных дорог. На основе метода оптического структурного освещения (рис. 5) создана система автоматического измерения износа и обнаружения дефектов провода контактных сетей железных дорог [4]. Этот метод предусматривает освещение под некоторым углом контрольного провода узкой полоской в виде «светового ножа» (секущим веерным лучом) с шириной менее 1 мм и длиной более 1 000 мм.

Иллюстрация оптического метода регистрации геометрии провода

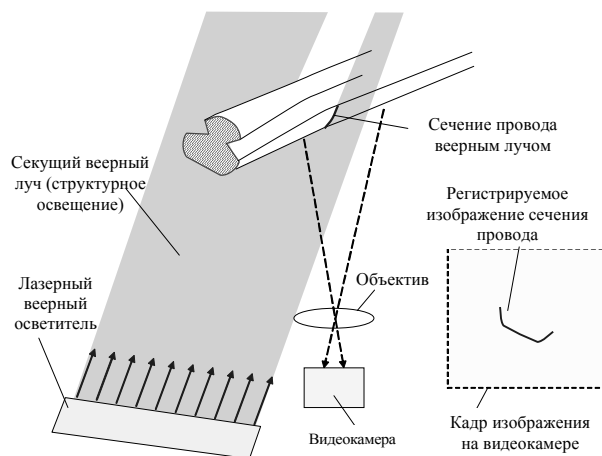


Рис. 5. Метод контроля сечения провода

С другого направления, не совпадающего с направлением освещения, след световых полос на проводе фиксируется видеокамерой с двумерным матричным фотоприемником, которая принимает изображение сечения провода веерным лучом. Затем происходит обработка изображения и вычисление необходимых геометрических параметров. Система измеряет остаточную высоту контактного провода с погрешностью $\sim 0,1$ мм при скорости транспортного средства 5 км/ч, площадь поперечного сечения провода со среднеквадратической погрешностью $\sim 1,5$ мм², что является достаточным для уверенного принятия решений по замене изношенных участков контактных сетей.

Конструктивно измерительная система состоит из измерительного модуля, расположенного на крыше вагона, и станции накопления и обработки данных, расположенной внутри вагона. Измерительный модуль предназначен для получения первичной видеoinформации, содержащей данные о геометрических параметрах тестируемой контактной линии. Станция накопления и обработки данных предназначена для сбора этой информации, ее обработки, вычисления интересующих геометрических параметров и архивирования.

Видеоизображения следа луча на новом и изношенном проводах, а также результат восстановления профиля проводов по видеоизображению представлены на рис. 6 и 7.

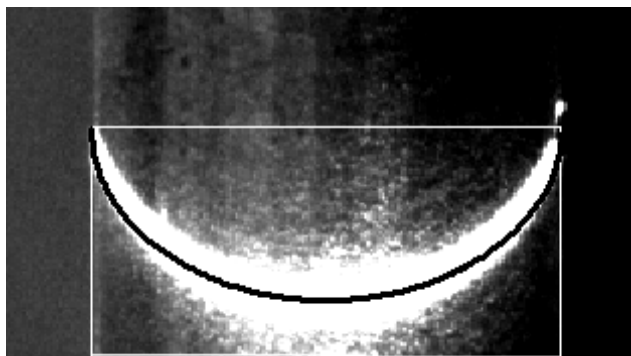


Рис. 6. Результаты восстановления поверхности контактного провода

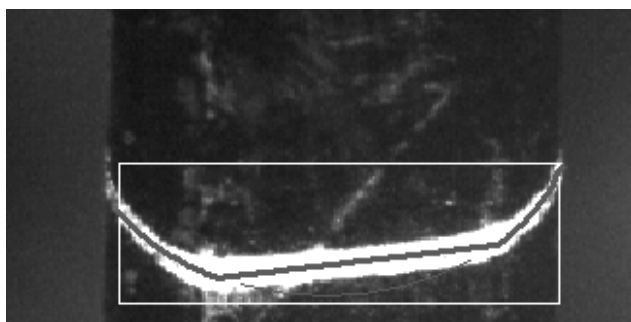


Рис. 7. Результаты восстановления поверхности изношенного контактного провода

Разработанная система также может быть применена для измерения износа проводов контактной сети городского транспорта и для технологического контроля геометрических параметров при производстве кабельной и трубной продукции.

Система круглосуточного контроля смещений и деформаций элементов механических и инженерных конструкций. Как известно, добыча нефти и газа на шельфах осуществляется с помощью буровых платформ. Платформа является чрезвычайно массивным и инертным объектом. Для защиты платформы от возможных механических нагрузок, действующих на основание, используются четыре маятниковых подшипника скольжения. Они обеспечивают защиту платформы от сейсмических колебаний, движений льда, механических нагрузок при бурении, нагрузок, возникающих в связи с тепловым расширением, и др. При прохождении пути, в среднем равного 3 км, подшипники изнашиваются. Частая замена подшипников – очень трудоемкий и дорогостоящий процесс. С другой стороны, наличие изношенного подшипника представляет большую угрозу для эксплуатации платформы и окружающей среды.

В связи с этим чрезвычайно важно отслеживать путь, пройденный подшипником. Для этой цели была создана автоматическая система измерения смещения подшипников скольжения [5]. Ее основное назначение – постоянное бесконтактное наблюдение положения подшипника и измерение пройденного подшипником пути за указанный интервал времени. Система сертифицирована как средство измерения, а также по взрывобезопасности.

Конструкция системы выполнена следующим образом (рис. 8). На вершине опоры жестко закрепляется ее пассивная часть, называемая мишенью. Оптико-электронный датчик, регистрирующий смещения мишени относительно его оптической оси, располагается над мишенью в шахте в теле платформы. Информация о перемещениях мишени, а также сервисная информация передается на рабочую панель, размещенную в одном из помещений платформы.

Электронный блок датчика и встроенное в него программное обеспечение позволяют производить измерение опоры путем анализа изображения мишени и обеспечивают взаимодействие с остальной частью измерительной системы по сети. Существенно, что датчик используется в автономном режиме, что объясняется некоторыми конструкционными сложностями по его извлечению.

В датчике используется высокопроизводительная монохромная промышленная цифровая камера фирмы PIXELINK PL-A741, работающая без фрейм-граббера по firewire (ieee1394a) интерфейсу.

Осветитель собран на импульсных светодиодах, излучающих на длине волны в 650 нм, что соответствует пику чувствительности цифровой матрицы камеры.

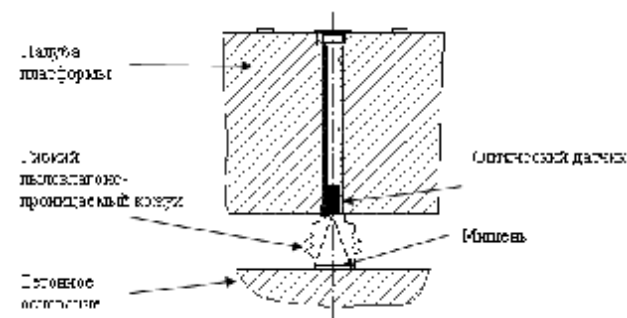


Рис. 8. Взаимное размещение оптико-электронного датчика и мишени

Мишень состоит из цельного стального листа размером 800 мм, прошедшего пескоструйную обработку поверхности, и вмонтированных отражателей в виде семи кругов из световозвращающей пленки, позиционированных с микронной точностью.

Благодаря удачно разработанной системе освещения удается получить изображение с хорошим соотношением сигнал/шум. Обрабатываемое изображение имеет разрешение 1 000×1 000 пикселей при глубине 8 бит и состоит из черного фона, на котором расположены яркие 4-связные сегменты-круги, являющиеся образами круглых пятен мишени.

Задача измерения смещений состоит в распознавании мишени на каждом кадре и нахождении координат центра большого пятна мишени по соответствующему сегменту. Измерения проводятся в системе координат, связанной с заранее заданным нулевым положением мишени.

На программном уровне решение задачи происходит в два этапа: 1) нахождение множества связанных компонент на изображении в виде списка хранящих информацию о статистике компоненты структур данных; 2) фильтрация полученного списка компонент для нахождения полезных сегментов и проверки геометрии их расположения.

Конечные координаты положения мишени получают преобразованием пиксельных центров в физические координаты центра пятна.

Во время испытаний система показала достаточно высокую стабильность обнаруживаемых пиксельных центров. Разрешение системы составляет 0,04 пиксела, что для идеальной оптики составляет 0,032 мм. С использованием библиотеки калибровок достигнута результирующая неопределенность измерения смещений $\pm 0,6$ мм во всем диапазоне перемещений ± 350 мм.

Система рассчитана на круглосуточную работу в течение тридцати лет. Приведем ее технические характеристики: диапазон измерений смещения по осям X и $Y \pm 350$ мм с погрешностью $\pm 0,6$ мм; скорость измерений более 10 измерений/с; возможный диапазон скоростей перемещений без ухудшения точности до 4 м/с; рабочая температура для стойки управления от 0 до $+40$ °С, рабочая температура для оптоэлектронного блока и мишени от -39 до $+40$ °С.

Система прошла тестовые испытания и принята заказчиком в эксплуатацию (рис. 9). Без значительных доработок данная система может также использоваться для круглосуточного измерения смещений и деформаций различных элементов механических и инженерных конструкций и выдачи оповещений об опасности.



Рис. 9. Внешний вид системы измерения: оптоэлектронный блок, мишень и стойка управления

Программируемый цеховой комплекс контроля в реальном времени формы ответственных крупногабаритных 3D-изделий на основе распределенных оптоэлектронных датчиков. Впервые в стране разработан конкурентоспособный программируемый цеховой комплекс контроля в реальном времени формы ответственных крупногабаритных 3D-изделий с погрешностью измерения менее 50 мкм.

В состав комплекса (рис. 10, 11) входят система питания, сбора, обработки и представления информации от оптических триангуляционных датчиков, система распределенных оптоэлектронных датчиков расстояния (до 1 688 единиц), протяженная кабельная сеть подключения и сбора информации со всей совокупности датчиков (до 25 м).

Отличительными особенностями комплекса являются следующие:

- большое количество одновременно и независимо контролируемых точек поверхности изделия (до 1 688);
- внешне программируемые, высокотехнологичные и высоконадежные оптоэлектронные бесконтактные датчики расстояния с низкой себестоимостью для заданных метрологических параметров с возможностью внешнего перепрограммирования датчика и его калибровочных данных в системе, без необходимости его физического отключения от измерительного комплекса;
- высокая скорость контроля – до 10 тыс. отсчетов в секунду, 10 полных обмеров всем количеством датчиков в секунду;
- высокая помехоустойчивость оптоэлектронных датчиков к внешним засветкам и электромагнитным помехам;
- высокая помехоустойчивость пространственно распределенной системы измерения комплекса к электромагнитным наводкам в длинных кабельных линиях;
- удобный и гибкий графический интерфейс пользователя, разработанный под конкретную пользовательскую задачу.



Рис. 10. Измерительные датчики



Рис. 11. Стойка питания и связи с датчиками

Оптические бесконтактные измерительные системы и лазерные технологии (с микронным разрешением и быстродействием от 500 до 10 000 измерений/с), разработанные в КТИ НП СО РАН, успешно применяются в течение многих лет как штатная Hi-Tech продукция для решения актуальных проблем безопасности в ядерной энергетике, на железнодорожном транспорте, в нефтедобывающей промышленности и других отраслях. Их применение позволяет повысить качество и конкурентоспособность изделий. Научно-технический, конструкторский и производственный потенциал КТИ НП, положительный опыт эксплуатации разработанных систем на различных предприятиях создают реальные предпосылки для более тесного сотрудничества КТИ НП с традиционными отраслями-заказчиками, а также с космической отраслью.

Библиографические ссылки

1. Трехмерный бесконтактный контроль геометрических параметров дистанционирующих решеток ядерных реакторов / О. И. Битюцкий [и др.] // Автометрия. Т. 39. 2003. № 5. С. 4–18.
2. Оптико-электронная система автоматического контроля внешнего вида топливных таблеток / Л. В. Финигонов [и др.] // Дефектоскопия. 2007. № 10. С. 68–79.
3. Автоматический контроль колесных пар на ходу поезда / А. Н. Байбаков [и др.] // Автометрия. Т. 40. 2004. № 5. С. 94–103.
4. Система дистанционного оптического контроля сечения провода контактных сетей железных дорог / В. С. Базин [и др.] // Приборы. 2006. № 12. С. 40–44.
5. Оптико-электронная система измерения смещений и деформаций элементов механических и инженерных конструкций для нефтегазовых платформ / В. С. Базин [и др.] // Приборы. 2006. № 12. С. 15–19.

Yu. V. Chugui

OPTICAL MEASURING SYSTEMS AND LASER TECHNOLOGIES FOR INDUSTRIAL APPLICATIONS

Novel research results of the Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS (TDI SIE SB RAS) on development, production and delivery of up-to-date optical measuring and laser technologies and systems for solving the actual tasks, including safety problems for atomic, railway, oil and other fields are presented in the article. Technical characteristics of some developed systems and devices are given as well.

Keywords: optical measuring technologies, laser technologies, safety, nuclear reactor, spacer grid, structured illumination method, triangulation method.

© Чугуй Ю. В., 2010

УДК 621.798.1-034

А. Ш. Герюков, В. В. Богданов, С. В. Назаров

ИССЛЕДОВАНИЯ ГИБРИДНОЙ ТЕХНОЛОГИИ БЕСКОНТАКТНОГО АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Приведены результаты экспериментального исследования по бесконтактно-акустическому контролю изделий. Предложен прогрессивный способ возбуждения ультразвуковых колебаний в материалах. Описаны конструктивные особенности электромагнитно-акустического преобразователя для радиационно-акустического контроля.

Ключевые слова: бесконтактная генерация, электронный пучок, ультразвуковые колебания, регистрация сигналов.

Обеспечение высокого и стабильного качества изделий специального машиностроения, в том числе аэрокосмической техники, является в настоящее время одной из основных технологических проблем, на решение которой направлены усилия многих научно-исследовательских и конструкторско-технологических организаций.

Одним из главных факторов, влияющих на качество изделий, являются дефекты внутреннего строения. Большая часть возникающих отказов при испытаниях и эксплуатации изделий связана именно с проявлением ранее

не обнаруженных дефектов изготовления. Поэтому неразрушающий контроль (НК) играет важную роль как в процессе производства, так и в процессе технологической обработки изделий. Форма конструкций, наличие большого числа недоступных и труднодоступных мест для традиционных средств НК, при требовании максимальной чувствительности и высокой разрешающей способности, а также особые условия производства – все это предъявляет жесткие требования к используемым методам и средствам НК и зачастую ограничивает при-