

Р. М. Галиулин*(Уфа)***ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ
ДЛЯ РАЗМЕРНОГО КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ**

Представлены новые автоматизированные оптоэлектронные системы для контроля геометрических параметров изделий сложной формы, в том числе элементов газоздушного тракта газотурбинных двигателей. Приведены основные технические характеристики систем, их отличительные особенности и примеры внедрения в различные отрасли промышленности.

Введение. С развитием новых информационных технологий возрастает актуальность создания компьютерных систем технического зрения (СТЗ) для проведения бесконтактных измерений геометрических параметров объектов сложной формы в промышленных технологических процессах [1, 2]. Создан ряд систем технического зрения для контроля элементов ядерных реакторов [1, 3]. Дефицит СТЗ имеет место в авиационной и нефтяной промышленности при решении ряда задач контроля массовых и трудоемких объектов сложной формы: лопаток газотурбинных двигателей (ГТД), наружной резьбы труб и внутренней резьбы муфт, мембран и т. п.

Рассмотрим задачу контроля лопаток ГТД. Сложность их производства в значительной степени определяется трудоемкостью изготовления газоздушного тракта [4–6]. Он включает в себя более десятка ступеней из рабочих колес и направляющих (сопловых) аппаратов, каждый из которых содержит до нескольких сотен лопаток. Причем лопатки имеют допуски по геометрии пера менее 0,03–0,06 мм. В целом на ГТД приходится от 1000 до 5000 лопаток десятков типоразмеров. Каждый элемент газоздушного тракта требует контроля множества параметров, включая контроль оптимальной раскладки лопаток в лопаточных решетках по комплектам ГТД. Вследствие этого средства контроля занимают значительную часть в себестоимости двигателя и существенно влияют на время подготовки производства новых ГТД. Традиционные приборы, имеющие паспортную погрешность более 0,05 мм, не пригодны для контроля таких изделий [4]. Существующие координатно-измерительные машины (КИМ) (погрешность менее 0,01 мм) не обеспечивают необходимой производительности измерений. Кроме того, погрешность измерения реальных лопаток на контактных КИМ многократно выше их паспортной погрешности и в значительной степени зависит от диаметра шупа и величины отклонения формы реальной детали от расчетных данных [7, 8]. К

инструментальным погрешностям КИМ добавляются еще погрешности измерений баз-реперов (от 0,1 до 0,15 мм), которые возникают из-за ограниченных физических возможностей оператора КИМ [8].

Современные средства контроля геометрии лопаток должны отвечать следующим основным требованиям: производительность контроля не менее 100 лопаток в час, погрешность измерений менее 0,01 мм, возможность быстрого перехода на другие типоразмеры. На базе персональных компьютеров СТЗ должны быть полностью автоматическими (с регистрацией, отображением, документированием и сохранением результатов измерений в базе данных и передачей их по компьютерной сети).

Другой важной задачей является создание бесконтактных средств автоматического контроля геометрических параметров резьбовых соединений, от качества которых зависит надежность большинства промышленных систем. В частности, в таких средствах особенно нуждается нефтяное машиностроение, где требуется обеспечить высокое качество резьбовых соединений труб для откачки нефти. Большинство существующих способов контроля качества резьбы основано на контактных методах (с помощью калибров, слепков, шаблонов) и не отвечает современным требованиям. С помощью калибров нельзя произвести объективный контроль годности резьбы, так как не анализируются конусность, местный износ и даже шаг резьбы. При определенной комбинации параметров совершенно негодная резьба может быть признана годной. Фактически с помощью калибров контролируется только один виток с наибольшим относительным диаметром резьбы трубы (или с наименьшим диаметром резьбы муфты). Этот способ контроля не дает ответа на вопрос о причинах негодности резьбы, не позволяет детально узнать о таких важнейших параметрах, как высота и шаг витков, радиусы закругления вершин и впадин зубцов резьбы, углы наклона сторон витков и др. На контроль резьбы калибрами в значительной степени влияют субъективные факторы и условия работы контролера. Причем время ручного контроля одной резьбы с помощью калибра составляет 5 мин (в сутки необходимо контролировать до 2500). Контроль калибрами таких параметров, как высота резьбы, форма и значения радиусов впадин или вершин, которые обеспечивают прочность и герметичность резьбовых соединений, весьма затруднен. Поэтому для контроля выборочно делают с нее слепки, которые далее измеряют с помощью микроскопов. Данный способ контроля длителен (до двух суток) и связан с большими погрешностями измерений вследствие большой усадки слепков.

Устранение большинства указанных недостатков и резкое повышение производительности измерительных процедур достигается при использовании разработанных в Научно-внедренческом предприятии «ОПТЭЛ» (Уфимский авиационный технический университет (УГАТУ)) новых измерительных технологий на основе оптоэлектронных систем технического зрения. Они обеспечивают трехмерный контроль геометрических размеров, профилей, координат, диаметров, ориентации, углов, толщины, перемещений, скорости, температуры и др. [3, 9–20].

1. Блок-схема систем «ОПТЭЛ». Системы «ОПТЭЛ» включают в себя следующие измерительные комплексы.

1. Лазерный аппаратно-программный комплекс для измерений геометрии лопаток и технологической оснастки различных типоразмеров.

2. Программный комплекс раскладки лопаток по комплектам роторов (статоров) с селекцией по углам установки лопаток, по массе, по статистическому моменту и т. д. по базе данных.

3. Лазерный аппаратно-программный комплекс для бесконтактных измерений фактических параметров установки лопаток в роторах и статорах различных типоразмеров: углов установки (разворота) лопаток, критического (проходного) сечения решетки и др.

4. Лазерный аппаратно-программный комплекс для бесконтактных измерений профиля дисков и колец рабочих колес.

5. Лазерный аппаратно-программный комплекс для бесконтактных измерений параметров резьбовых соединений.

Системы «ОПТЭЛ» построены по единой структурной схеме (рис. 1) и включают в себя набор оптоэлектронных измерительных головок, электронный блок, лазерный сканирующий оптико-механический блок, компьютер IBM PC (класса Pentium) и развитое специализированное программное обеспечение (СПО) для контроля геометрии изделий сложной формы. Сканирующий блок имеет в своем составе координатный и поворотный столы, управляемые от компьютера. Принцип действия оптоэлектронных головок основан на применении теневых, триангуляционных и других методов измерений с использованием полупроводниковых развертывающих фотоприемников [2, 12]. Электронный блок устройства обеспечивает развертку выходного сигнала интегрального многоэлементного фотоприемника и соответствующую обработку видеосигнала для выделения информации о проекции изображений в требуемом динамическом диапазоне изменений интенсивности.

Высокая скорость измерений (тысячи раз в секунду) обеспечивает возможность проведения практически непрерывных измерений даже при взаимном движении оптоэлектронных головок и контролируемого изделия. Измеренные координаты изделия непрерывно вводятся в компьютер, где рассчитываются, отображаются, регистрируются значения фактического профиля изделия и сравниваются с профилем, заданным чертежом.

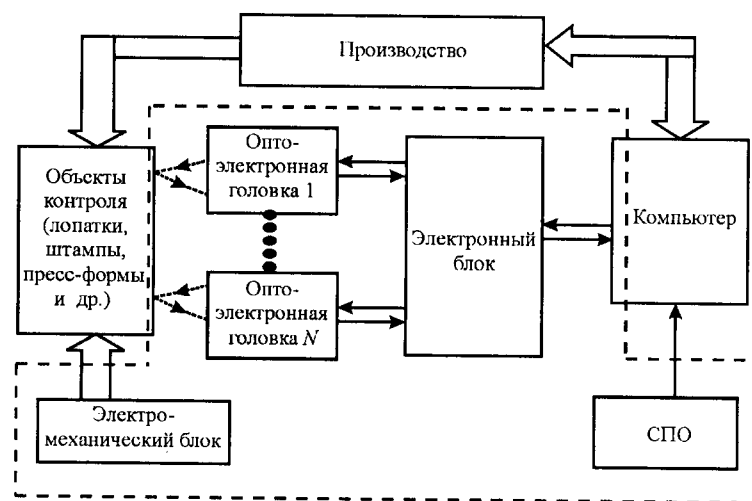


Рис. 1. Блок-схема лазерной оптоэлектронной измерительной системы «ОПТЭЛ»

Специальное программное обеспечение систем «ОПТЭЛ» создано в средах MS DOS, Windows 95/98 и NT/2000 и позволяет в реальном масштабе времени проводить обработку, отображение, регистрацию результатов измерений, их документирование и сохранение с последующей передачей по компьютерной сети в АСУ ТП. Одним из важных видов обработки результатов измерений является восстановление фактической трехмерной поверхности по измеренным данным. Для этого используется метод сплайновой аппроксимации, согласно которому строятся треугольники, соединяющие соседние ближайшие точки поверхности (вершины треугольников). Затем производится сплайновая аппроксимация симплексным методом. Используемая при этом сплайн-функция $f(P)$ определяется формулой

$$f(P) = \sum_{i=1}^N a_i g_i(P) + \sum_{k=1}^q b_k n_k(P), \quad (1)$$

где P – аппроксимируемая точка; a_i, b_k – постоянные коэффициенты сплайновой аппроксимации; $g_i(P)$ – базовая функция (квадратичный полином), связанная с вершиной угла аппроксимирующего трехмерную поверхность элементарного треугольника (симплекса); $n_k(P)$ – базовая функция (квадратичный полином), связанная со средней точкой ребра аппроксимирующего треугольника (симплекса); i – номер вершины симплекса; N – количество вершин аппроксимирующих треугольников (симплексов); k – номер ребра симплекса; q – количество ребер аппроксимирующих треугольников (симплексов).

2. Контроль геометрии лопаток ГТД и технологической оснастки для их изготовления. При производстве любого ГТД требуется изготовить десятки типоразмеров компрессорных, турбинных лопаток и вспомогательной оснастки. Все они имеют сложную геометрию рабочих поверхностей. Причем в ГТД нового поколения в несколько раз повышены требования к точности формирования геометрии лопаток. Кроме того, для них введены новые контролируемые параметры. Схематическое изображение турбинной лопатки представлено на рис. 2.

При контроле лопаток измеряются профили пера «спинки» и «корыта». Последние версии систем также обеспечивают точные измерения малых радиусов кромок (с радиусами менее 1,0–0,05 мм) и проведение автоматических измерений за одну установку лопаток, в том числе при их автоматическом вращении. Кроме того, имеется режим измерения геометрических параметров и замковой части (хвостовика) лопатки.

Контролю подлежат следующие виды измеряемых деталей (заготовок и вспомогательной оснастки) и геометрических параметров при производстве турбинных лопаток ГТД:

- 1) пресс-формы и штампы при их изготовлении с использованием CAD/CAM;
- 2) керамические стержни для охлаждаемых турбинных лопаток (обожженные и сырые);
- 3) восковые, гипсовые и другие модели лопаток;
- 4) литые заготовки турбинных лопаток (геометрия пера, хвостовика и полок);
- 5) механически обработанные турбинные лопатки (геометрия пера, кромок, хвостовика и полок);

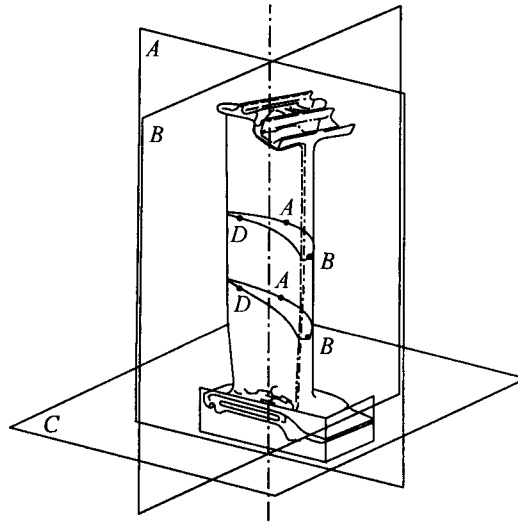


Рис. 2. Схематическое изображение турбинной лопатки

6) углы разворота, смещения, хорды, величины C_1 , C_2 , C_{\max} , волнистость и другие параметры профилей;

7) толщина жаропрочных и упрочняющих покрытий;

8) внутренняя геометрия охлаждаемых турбинных лопаток.

При производстве компрессорных лопаток ГТД контролируются примерно такие же виды заготовок и параметров. Автоматическая привязка к координатным осям изделий в зависимости от конкретного исполнения может осуществляться как по базирующим элементам, так и по базовым поверхностям изделия, например по замку (хвостовику) лопатки, а также по эталонным точкам или сечениям фактического профиля. В созданных системах контроля геометрии лопаток и технологической оснастки используются триангуляционные и теневые измерительные головки. Существенно, что контролируемая поверхность изделий может иметь различные цвет, шероховатость и широкий диапазон углов наклона относительно луча лазера измерительной головки.

Погрешность контроля геометрии изделий определяется диапазоном измерений и зависит от шероховатости и углов наклона точек поверхности. Для уменьшения погрешности применены специальные аналитические, аппаратные (конструктивные и электронные) и программные методы и меры, включая компьютерные калибровки. Все это позволяет получить погрешность измерений металлических изделий с шероховатостью Ra от 3,0 до 0,32 в пределах 2–10 мкм.

При измерениях профиля поверхности триангуляционным методом погрешность составляет 10 мкм в диапазоне 50–60 мм, а при измерениях контура и кромок изделий теневым способом составляет 2–3 мкм.

Данные системы позволяют измерять и оптимизировать форму и радиусы входных и выходных кромок изделий, смещения или развороты профилей сечений, выдавать эти значения в текстовом и графическом видах. Результаты измерений отображаются на дисплее, а также могут быть оформлены на бумаге в нужном для пользователя виде (графики, таблицы, протоколы измерений, статистические данные, отчетные формы и т. д.).

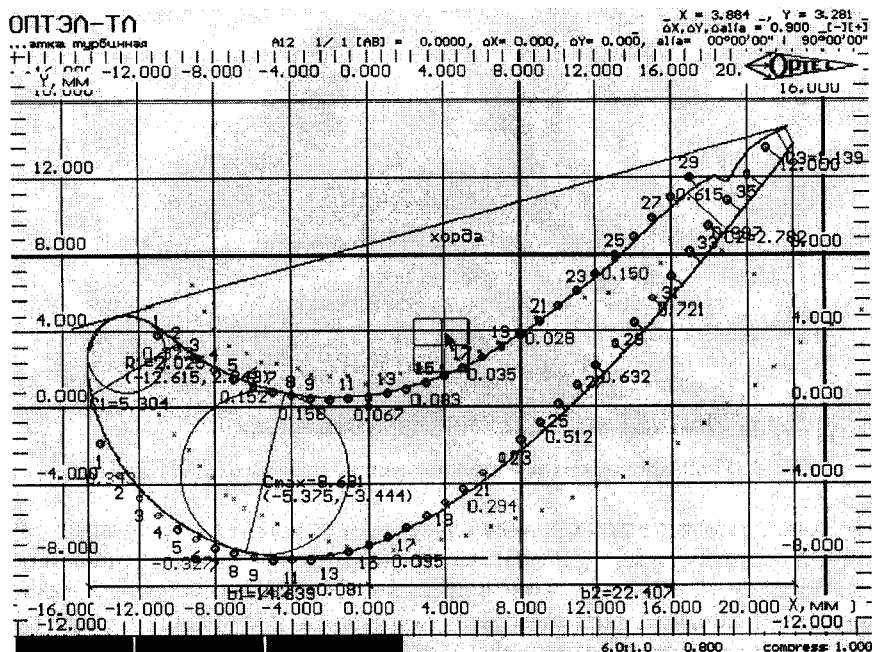


Рис. 3. Профилограмма сечения с рассчитанными отклонениями параметров геометрии от чертежных

В качестве иллюстрации возможностей СПО на рис. 3 представлена двумерная профилограмма одного из поперечных сечений с рассчитанными отклонениями параметров лопатки от заданных по чертежу – результат трехмерного измерения турбинной лопатки ГТД. На данной профилограмме отображены фактические отклонения геометрии лопатки в 29 точках корыта и 36 точках спинки, а также приведены значения специфических рассчитанных фактических параметров сечения лопатки (хорды, полухорды: $b_1 = 14,639$, $b_2 = 22,407$ мм; толщины: $C_1 = 5,304$, $C_2 = 2,782$, $C_3 = 1,139$, $C_{\max} = 8,631$ мм; $R_1 = 2,025$ мм). Графически также отображены величины отклонений, рассчитанные по нормали к фактическому профилю. Кроме этого некоторые величины отклонений от чертежных точек выведены в цифровой форме. На профилограмме (на экране) красным цветом выделены чертежные точки и отклонения для участка спинки, в которой находятся чертежные точки 24–36, указывающие, что в этих точках превышен допуск и сечение лопатки здесь толще и развернуто по сравнению с чертежным профилем. В точках 1, 2, 5, 20–23 спинки, где профиль близок к допуску, чертежные точки и отклонения желтого цвета. В остальных точках профиль в допуске, чертежные точки и отклонения зеленого цвета. Параметры R_1 – радиус входной кромки и C_{\max} – максимальная толщина лопатки в сечении выдаются с расчетными координатами центров.

3. Контроль геометрических параметров при установке лопаток. Для контроля углов установки и положения лопаток в решетках ГТД была разработана специальная система «ОПТЭЛ-ГТД». Она позволяет проводить бесконтактные измерения геометрических параметров положения лопаток в заданных сечениях в ГТД: рабочих колесах и направляющих аппаратах [9–14]. Вид системы «ОПТЭЛ-ГТД» приведен на рис. 4. Принцип измерения осно-

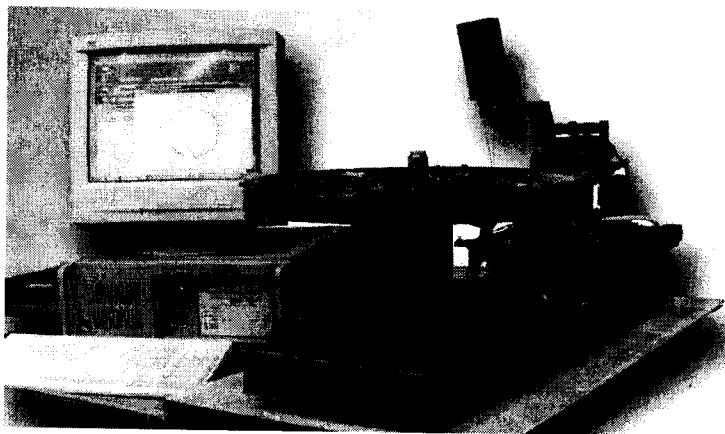


Рис. 4. Общий вид автоматизированной лазерной системы «ОПТЭЛ-ГТД»

ван на теновом методе сканирования лазерным лучом лопаток вращаемой лопаточной решетки (рис. 5). В системе проводится контроль ширины и положения тени от лопаток в заданном сечении. Сканирование осуществляется посредством перемещения лазерных головок оптико-механического блока относительно измеряемого изделия и поворотом лазерной головки с двумя лазерными датчиками, при этом фиксируются углы a_1 и a_2 в пересечения кромки лопатки.

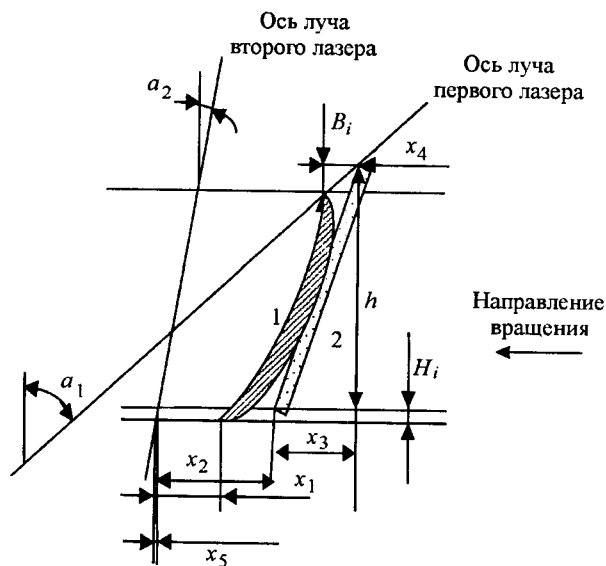


Рис. 5. Схема хода лучей лазерных датчиков и расчетные параметры для вычисления углов установки лопаток лопаточной решетки ГТД: a_1 и a_2 – углы наклона оси лазерного луча от первого и второго лазеров к вертикали соответственно; B_i и H_i – разницы между относительными высотами первых и вторых кромок лопатки 1 и калибра 2 соответственно; x_1 и x_2 – расстояния, пройденные лопаткой 1 и наклонным калибром 2 за время между срабатываниями датчиков от первого и второго лазерных лучей соответственно; x_3 , x_4 , x_5 , h – вспомогательные параметры для расчетов

Для проведения измерений параметров установки лопаток предусмотрены соответствующие режимы сканирования изделия и расчеты ее специфических параметров. Согласно разработанной математической модели углы установки лопаток в лопаточных решетках ГТД находятся по следующей формуле:

$$A_i = \arctg \left(\frac{l \cos A - B_i + H_i}{l \sin A - B_i \operatorname{tg} a_1 + x_2 + H_i \operatorname{tg} a_2 - x_1} \right),$$

где A – угол установки калибра; l – длина калибра.

В результате сканирования лопаток в заданных сечениях под разными углами формируется набор измеренных профилей. Это дает полную адекватную информацию о фактическом положении лопаток решетки ГТД, включая расчетные параметры. Все данные сохраняются в памяти компьютера, передаются в АСУ ТП, а также могут быть выведены на экран или печать.

Примеры протоколов измерений приведены на рис. 6. На круговой и линейной диаграммах показаны результаты контроля положения 70 лопаток в

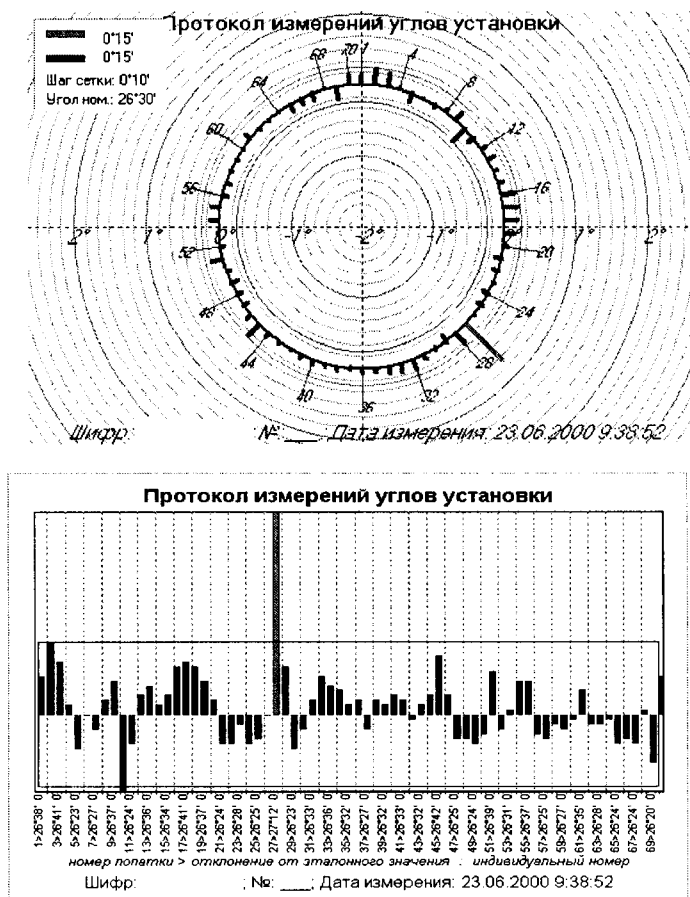


Рис. 6. Протоколы измерений углов установки лопаточной решетки

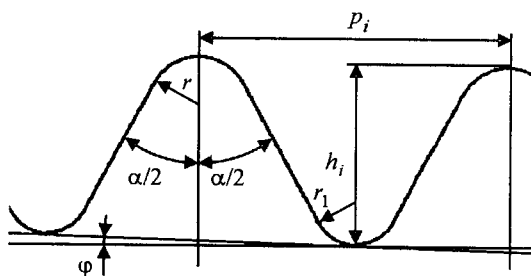


Рис. 7. Контролируемые параметры резьбы

лопаточной решетке и отображены отклонения от номинального угла, равного $26^{\circ}30'$. На линейной диаграмме приведены цифровые значения отклонений, из которых следует, что лопатки, находящиеся в пазах с номерами 10 и 27, имеют отклонения, превышающие допуск по углу $0^{\circ}15'$. На реальных диаграммах этот факт отображается красным цветом.

4. Контроль геометрических параметров внутренней и наружной резьбы. Для контроля геометрии внутренней и внешней резьбы была разработана автоматизированная система «ОПТЭЛ-Р» [15]. Принцип действия системы «ОПТЭЛ-Р» основан на сканировании профиля резьбы лазерным лучом. Сканирование осуществляется путем перемещения и поворота лазерных головок оптико-механического блока системы относительно измеряемого изделия. На каждом заданном угле условного сечения измеряется фактическая профилограмма сечения резьбы. По результатам измерений рассчитываются основные параметры резьбы (рис. 7): p_i – шаг отдельного витка; h_i – высота витка; диаметры повитковые (по вершине, впадине и средней); радиусы закругления вершин и впадин; углы наклона боковых сторон витков; расстояние до основной плоскости и до сбеге; конусность и угол уклона; углы, высота наружной и внутренней фасок резьбы трубы; углы и высота внутренней фаски резьбы муфты, длина и диаметр «юбки»; несоосность осей изделия и резьбы; натяг по «виртуальным» гладкому и резьбовому калибрам.

Среднее значение шага витка P_{SR} вычисляется по формуле

$$P_{SR} = \sum p_i / N_{10P},$$

где N_{10P} – количество витков, укладываемых на длине, равной десяти шагам профиля резьбы. Среднее значение высоты витка H_{SR} определяется следующим образом:

$$H_{SR} = \sum h_i / N_{10P}.$$

При расчетах углов используется метод аппроксимации прямых (линейная регрессия)

$$A = \frac{\sum x_i \sum y_i - n \sum x_i y_i}{\left(\sum x_i \right)^2 - n \sum x_i^2}, \quad B = \frac{\sum y_i - A \sum x_i}{n},$$

где n – количество точек, по которым выполняется аппроксимация; x, y – абсцисса и ордината точек соответственно.

Для указанных выше параметров выводятся их фактические значения и отклонения, а также величины номинала, допуска «+» и допуска «-». Протоколы измерений содержат для резьбы труб около 80 параметров, а для резьбы муфт около 160 параметров. Время сканирования и расчета параметров резьбы не превышает 30–60 с.

Системы «ОПТЭЛ-Р» позволяют обеспечить объективный размерный и высокопроизводительный контроль резьбы труб и муфт, ускорить освоение и доводку технологии изготовления новых изделий. Это особенно актуально при ремонте и восстановлении бывших в употреблении изделий. Партия автоматизированных оптоэлектронных систем «ОПТЭЛ-Р» для контроля резьбы насосно-компрессорных труб и муфт к ним успешно эксплуатируется на шести нефтедобывающих предприятиях России с 1999 г.

5. Особенности и области применения систем «ОПТЭЛ». Новые лазерные системы «ОПТЭЛ» предназначены для бесконтактных измерений профиля и геометрических параметров практически любых изделий сложной формы (выполненных из различных материалов, в том числе из хрупких и мягких): компрессорных и турбинных лопаток ГТД, пресс-форм, стержней, восковых и гипсовых моделей и т. д. Системы «ОПТЭЛ» позволяют комплексно контролировать все стадии технологических процессов изготовления элементов газоздушного тракта ГТД, начиная с исходных заготовок компрессорных и турбинных лопаток, пресс-форм, стержней, моделей, оснастки и заканчивая выходным контролем готовых лопаточных решеток ГТД с созданием базы данных по ступеням и в целом ГТД [9–14]. Системы характеризуются следующими техническими параметрами: количество контролируемых точек и сечений от одной до тысяч; время измерения первого сечения до 2–5 с; время измерения всего пера лопатки от 15 с; разрешающая способность менее 0,001 мм; погрешность измерений менее 0,01 мм; высокая гибкость (измерения сотен типоразмеров изделий проводятся в соответствии с электронным чертежом изделия с временем перехода на другой типоразмер менее 1 мин); совместимость с системами автоматизированного проектирования и производства (САПР и CAD/CAM: “Unigraphics”, “Cimatron”, “AutoCAD”) и с компьютерными АСУ ТП.

Применение систем «ОПТЭЛ» позволяет повысить точность измерений по сравнению с шаблонными приборами (до 5–15 раз), ускорить процесс контроля (в 10–20 раз) и исключить субъективность при его проведении, сократить время освоения новых изделий, трудоемкость и затраты производства (до 10–20 раз). Системы «ОПТЭЛ» позволяют не только оперативно проводить компьютерный контроль геометрии 100 % изделий, но и анализ и соответствие геометрии изделий по всей технологической цепочке: пресс-форм, керамических стержней, восковых моделей, литья турбинных лопаток, механически обработанных и защищенных покрытиями турбинных лопаток, включая геометрию внутренних полостей, каналов и др., а также коррекцию технологических процессов.

Применение нескольких систем исключает необходимость изготовления и использования сотен типоразмеров дорогостоящей устаревшей измерительной оснастки, действующей до настоящего времени (эталонных лопаток, шаблонов, контршаблонов и др.), а также высвобождает до сотни контролеров, что дает значительную экономию при незначительных эксплуатационных затратах. По сравнению с координатно-измерительными машина-

ми при сопоставимой погрешности системы «ОПТЭЛ» обеспечивают повышение производительности до десятков раз, а по соотношению производительность/цена в тысячи раз. Новые лазерные системы «ОПТЭЛ» много лет успешно используются на ряде ведущих авиадвигательных предприятий: ОАО «КМПО», ОАО «УМПО», ОАО «Рыбинские моторы», ГУП «Завод им. Климова», ОАО «СНТК им Н. Д. Кузнецова», ММПП «Салют» и др. Партия систем «ОПТЭЛ» эксплуатируется на АО «КМПО» с 1994 г. в ходе технологических процессов изготовления высокоточных лопаток четырех ГТД нового поколения и других изделий. Системы обеспечивают контроль 100 % заготовок с различными припусками, лопаток, электродов, поршней и др. Они позволили снизить трудоемкость, гарантируют качество и ускорили освоение новых высокоточных изделий, изготавливаемых по новым технологиям [6, 9], включая контроль профиля и малых радиусов (от 0,03 мм) кромок деталей.

Заключение. Высокая точность и большая производительность разработанных систем технического зрения «ОПТЭЛ» позволяют автоматизировать трудоемкий процесс измерений ответственных изделий авиадвигательного и других отраслей, обеспечить 100 %-ный объективный контроль сотен и тысяч типоразмеров изделий с регистрацией результатов. Объективность и оперативность контроля дают возможность повысить качество изделий и выход годных. Системы «ОПТЭЛ» позволяют также автоматизировать научные исследования и эксперименты, связанные с формообразованием, включая точную обработку материалов и изделий. Автоматизация и проведение измерений в реальном масштабе времени снижают стоимость экспериментальных исследований и отработки технологий. Немаловажным является исключение субъективных факторов при проведении и обработке результатов измерений и исследований.

С помощью созданного программного обеспечения производится программная обработка, отображение и регистрация результатов измерений в реальном времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Битюцкий О. И., Вертопрахов В. В., Гущина А. А. и др. Трехмерный бесконтактный контроль геометрических параметров дистанционирующих решеток ядерных реакторов // *Автометрия*. 2003. 39, № 5. С. 4.
2. Галиулин Р. М. Оптоэлектронные контрольно-измерительные системы технического зрения на основе коммутируемых фотодиодных структур // *Разработка систем технического зрения и их применение в промышленности (СТЗ-92): Тез. докл. науч.-техн. конф. СНГ* / Под ред. И. М. Макарова, Д. Е. Охочимского, Р. М. Галиулина. Уфа: Изд-во УАИ, 1992. Ч. 1. С. 14.
3. Белоглазова В. А., Битюцкий О. И., Гущина А. А. и др. Оптико-электронное устройство бесконтактного контроля геометрических параметров ТВЭЛ // *Автометрия*. 2004. 40, № 2. С. 82.
4. Гейкин В. А. Совершенство двигателя определяется совершенством технологий // *Двигатель*. 2003. № 6.
5. Гостелову Дж. Аэродинамика решеток турбомашин: Пер. с англ. М.: Мир, 1987.
6. Хабибуллин М. Г., Фирсов А. Г. Проблемы технологии изготовления малоразмерных сложнопрофильных лопаток компрессора ГТД нового поколения // *Авиационная техника*. 1998. № 4.

7. **Cardew-Hall M., Cosmas J., Ristic M.** Automated proof inspection of turbine blades // *The Intern. Journ. of Advanced Manufacturing Technology*. 1988. 3, N 2. P. 67.
8. **Вермель В. Д., Забалуев В. Ф., Николаев П. М.** Геометрическое обеспечение оценки точности изготовления изделий сложной формы по материалам измерений на программируемых КИМ // *Тр. ЦАГИ. М.: ЦАГИ*, 1994. Вып. 2555.
9. **Галиулин Рав. М., Галиулин Риш. М., Бакиров Ж. М. и др.** Компьютерные лазерно-оптоэлектронные системы измерений геометрии изделий сложной формы «ОПТЭЛ» // *Изв. вузов. Сер. Авиационная техника*. 1997. № 1. С. 100.
10. **Galiulin Rav. M., Galiulin Rish. M., Bakirov J. M. et al.** Computer-aided laser-optoelectronic "OPTEL" 3-D measurement systems of complex-shaped object geometry // *Proc. SPIE*. 1996. 2713. P. 363.
11. **Galiulin Rav. M. et al.** Optoelectronic computer-aided systems for three-dimensional inspection of complex objects // *Proc. SPIE*. 2001. 4189. P. 268.
12. **Galiulin R. M.** Optoelectronic computer-aided measuring "OPTEL" systems // *Proc. SPIE*. 2002. 4900. P. 486.
13. **Galiulin Rav. M., Galiulin Rish. M., Bakirov J. M. et al.** Optoelectronic computer-aided systems for inspection of GTE complex objects // *Ibid.* P. 178.
14. **Galiulin Rav. M., Galiulin Rish. M., Bakirov J. M. et al.** Optoelectronic computer-aided inspection of blade mounting parameters // *Ibid.* P. 649.
15. **Galiulin Rav. M., Galiulin Rish. M., Bakirov J. M. et al.** Optoelectronic computer-aided inspection of thread geometry // *Ibid.* P. 633.
16. **Галиулин Рав. М., Галиулин Риш. М., Бакиров Ж. М. и др.** Оптоэлектронные микропроцессорные системы для измерений геометрии протяженных изделий // *Кабельная техника*. 1995. № 6. С. 36.
17. **Galiulin Rav. M., Galiulin Rish. M., Bakirov J. M. et al.** Mobile "OPTEL-CW" system for optoelectronic measurements of contact wire (CW) parameters in railways // *Proc. SPIE*. 2002. 4900. P. 935.
18. **Galiulin Rav. M., Galiulin Rish. M., Bakirov J. M. et al.** Optoelectronic "MARS" systems for monitoring of aerospace object movement parameters // *Ibid.* P. 1104.
19. **Galiulin Rav. M., Galiulin Rish. M., Bakirov J. M. et al.** Automated laser system for measurement of geometric parameters of toroidal corrugations // *Ibid.* P. 802.
20. **Galiulin R. M., Pyasov M. G., Mugattarov M. G.** Automated laser optoelectronic system of face-on-skull reconstruction // *Ibid.* P. 1027.

*Уфимский государственный авиационный
технический университет,
E-mail: head@optel.ugatu.ac.ru*

*Поступила в редакцию
21 мая 2003 г.*