

ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОЕКТЫ

УДК 681.3.072.1; 681.2.531.7

**ЛАЗЕРНЫЙ КОМПЬЮТЕРНЫЙ КОНТРОЛЬ
ГАЗОВОЗДУШНОГО ТРАКТА ГТД****Р. М. ГАЛИУЛИН**Факультет информатики и робототехники УГАТУ
Тел: (3472) 23 65 42 E-mail: head@optel.ugatu.ac.ru

Представлены технические характеристики и преимущества применения новых автоматизированных измерительных систем, разработанных в Межвузовской НИЛ оптоэлектронных контрольно-измерительных систем УГАТУ. В настоящее время важной задачей в авиамоторостроении для авиации и энергетике является создание новых газотурбинных двигателей (ГТД) с повышенными качественными характеристиками. Создание новых гибких автоматизированных систем контроля сложной геометрии изделий газовоздушного тракта ГТД, одного из звеньев в АСУ ТП, является актуальной задачей

ГТД; газовоздушный тракт; лопатки; лопаточные решетки; оптоэлектронные измерения; программное обеспечение

ВВЕДЕНИЕ

С дальнейшим развитием новых информационных технологий возрастает актуальность создания компьютерных систем для проведения бесконтактного контроля геометрических параметров объектов сложной формы в технологических процессах.

В настоящее время важной задачей авиамоторостроения является создание нового поколения ГТД с повышенными качественными характеристиками для применения в авиации и энергетике. Большую роль в решении этой задачи играют средства автоматизированного контроля и управления для автоматизированных АСУ ТП. Поэтому создание нового поколения гибких автоматизированных систем контроля геометрии сложных профилей, одного из звеньев в АСУ ТП, является весьма актуальной задачей [1].

Трудоемкость производства ГТД в большой степени определяется трудоемкостью изготовления газовоздушного тракта. Он включает в себя до более десятка ступеней из рабочих колес и направляющих (сопловых) аппаратов, каждый из которых содержит до ста и более лопаток. В целом на ГТД приходится до 1000–5000 лопаток десятков типоразмеров. Поскольку каждый элемент газовоздушного тракта требует контроля множества

параметров, средства и технология контроля занимают значительную часть трудоемкости изготовления и себестоимости двигателя и определяют время подготовки производства нового ГТД [4, 5].

Существующие средства контроля геометрии газовоздушного тракта не отвечают современным требованиям. Лопатки ГТД обычно контролируют устаревшими субъективными ручными, визуальными и контактными средствами: шаблонами, приборами ПОМКЛ и др. Иногда проводится выборочный контроль геометрии лопаток контактными координатно-измерительными машинами (КИМ).

Параметры лопаточных решеток ГТД обычно также контролируют субъективными ручными и визуальными средствами: набором контактных мерительных приспособлений и КИМ, которые зачастую деформируют лопатки. Эти средства устарели и не отвечают современным требованиям.

В данной статье описаны новые лазерные компьютерные системы «ОПТЭЛ» для бесконтактных автоматических измерений геометрических параметров основных элементов газовоздушного тракта ГТД:

- а) отдельных лопаток и технологической оснастки для их изготовления;
- б) дисков для рабочих колес;

в) лопаточных решеток в сборе.

Также очень важна оптимальная раскладка лопаток в лопаточных решетках ГТД по комплектам.

Созданы лазерные компьютерные системы нового поколения «ОПТЭЛ» для высокопроизводительного контроля геометрии изделий сложной формы с гибким и быстрым переходом на разные типоразмеры и виды изделий [2–5].

Высокие точность и производительность бесконтактных измерений позволяют обеспечить 100%-ный контроль изделий с регистрацией результатов в памяти компьютера. Значительно уменьшаются трудоемкость и затраты при производстве новых и ремонте бывших в эксплуатации элементов лопаточных решеток ГТД: компрессорных и турбинных лопаток, пресс-форм, стержней, моделей, оснастки и др.

Системы нового поколения «ОПТЭЛ» являются наукоемким продуктом и имеют широкие функциональные возможности. Они являются результатом длительных НИОКР [1–10].

Последние модели систем «ОПТЭЛ» позволяют комплексно контролировать все стадии ТП изготовления элементов газоздушного тракта ГТД, начиная с исходных заготовок до выходного контроля готовых лопаточных решеток ГТД с созданием базы данных по ступеням и в целом ГТД.

Выделяются следующие системы «ОПТЭЛ»:

1. Лазерный аппаратно-программный комплекс для измерений геометрии лопаток и технологической оснастки различных типоразмеров. Создаются базы данных по геометрии пера, хвостовика и кромок, по углам разворота, хордам, величинам S_1 , S_2 , S_{\max} , волнистости пера и др.

2. Программы раскладки лопаток по комплектам роторов (статоров) с селекцией по углам установки лопаток, по массе, по статическому моменту и др., 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.

1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

Использование лазерных триангуляционного и теневого способов измерений в сочетании с электронной и программной обработкой информационных сигналов обеспечивает высокую точность и производительность бесконтактных измерений, надежность работы в производственных условиях.

На объект контроля направляется узкий лазерный луч. Изображение отраженного, диффузно рассеянного или перекрываемого объектом лазерной марки (луча) проецируется на интегральный фотоприемник. Электронный блок устройства обеспечивает развертку интегрального многоэлементного фотоприемника и соответствующую обработку видеосигнала для выделения информации о проекции изображения марки в требуемом динамическом диапазоне изменений интенсивности. Цифровые коды, соответствующие контролируемой геометрии, выделяются и обрабатываются в компьютере по специальной программе.

Измерения проводятся бесконтактно и с высокой производительностью (сотни тысяч раз в секунду). Это обеспечивает возможность проведения практически непрерывных измерений в относительном движении оптоэлектронной головки и контролируемого изделия.

Координаты изделия также непрерывно вводятся в компьютер, где рассчитываются, отображаются и регистрируются значения фактического профиля изделия и сравниваются с профилем, заданным чертежом. Результаты измерений отображаются в различных наглядных формах, регистрируются и сохраняются в памяти компьютера и на машинных носителях информации неограниченное время. Они также выдаются в виде распечатанных протоколов на бумаге.

Создано оригинальное программное обеспечение новых систем контроля, которое позволяет работать с системами без специальной подготовки и содержит всю необходимую справочную информацию.

2. ЛАЗЕРНЫЙ КОНТРОЛЬ ГЕОМЕТРИИ ОТДЕЛЬНЫХ ЛОПАТОК И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ ДЛЯ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

При производстве ГТД требуется изготовить десятки типоразмеров компрессорных, турбинных лопаток и вспомогательной оснастки. Техпроцесс изготовления лопаток состоит из ряда стадий (операций), обеспечи-

вающих последовательное доведение заготовок с различными припусками до готовых лопаток. Таких операций, включающих последующий контроль геометрии заготовок, может быть от 5 до 10.

Обычно контроль проводят с помощью контактных визуальных шаблонных приборов и приборов типа ПОМКЛ. На каждую операцию с изменением припуска изготавливается соответствующий шаблонный прибор. Погрешность измерений шаблонных приборов составляет 0,03–0,05 мм, а приборов типа ПОМКЛ — до 0,1 мм. Ресурс шаблонных приборов — от 0,5 до 2-х лет. Обычно изготавливают 2–3 комплекта шаблонных приборов на каждый типоразмер, что пропорционально увеличивает затраты. Кроме этого, для проверки самих шаблонов дополнительно требуются контр-шаблоны. Общее количество шаблонных приборов на один ГТД доходит до сотен комплектов. Стоимости ПОМКЛ и шаблонных приборов примерно равны и достигают от 5000 до 10000 долларов США.

На смену устаревших измерительных средств созданы новые лазерные системы «ОПТЭЛ-КЛ» и «ОПТЭЛ-ТЛ». Они 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. [5–10]. Структурная схема техпроцесса изготовления лопаток и вспомогательной оснастки с использованием новых лазерных систем «ОПТЭЛ» приведена на рис. 1.

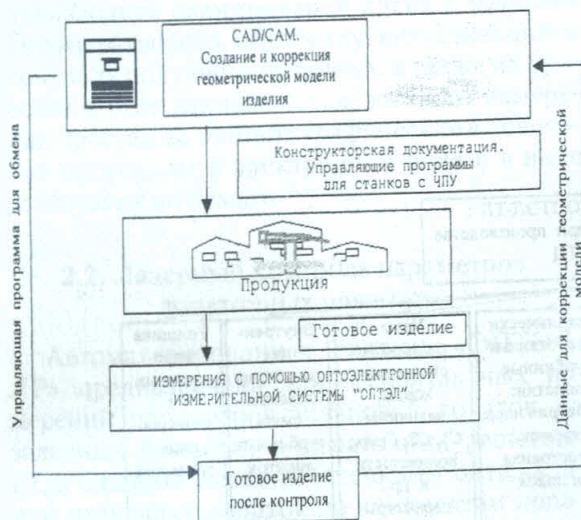


Рис. 1. Структурная схема техпроцесса изготовления лопаток и вспомогательной оснастки с использованием новых лазерных систем «ОПТЭЛ»

Виды измеряемых изделий при производстве компрессорных и турбинных лопаток системами «ОПТЭЛ-КЛ» и «ОПТЭЛ-ТЛ» приведены на рис. 2 и 3.

Системы «ОПТЭЛ» характеризуются:

- уникальной возможностью проводить бесконтактные быстрые автоматические компьютерные измерения трёхмерных объектов;
- автоматизацией трудоёмких измерений, исключением субъективности и обеспечением 100%-ного контроля ответственных изделий ГТД с регистрацией результатов в базе данных;
- высокой производительностью;
- практически неограниченным количеством типоразмеров контролируемых изделий;
- количеством контролируемых точек и сечений — от одной до тысяч;
- временем измерения одного сечения — до 2–5 с; всего пера лопатки от 20 с (до 100 лопаток/ч);
- высокой разрешающей способностью — менее 0,001 мм;
- высокой точностью — погрешность менее 0,005–0,01 мм;
- высокой гибкостью: измерения сотен типоразмеров изделий проводятся в соответствии с электронным чертежом (матмоделью) изделия с временем перехода на другой типоразмер менее 1 мин;
- совместимостью с системами автоматизированного проектирования и производства (САПР и CAD/CAM — «Unigraphics», «Cimatron», «AutoCAD» и др.).

Высокоточные и быстродействующие системы «ОПТЭЛ-Л» включают в себя специализированное математическое и программное обеспечение для отечественных пользователей, выполняющее измерение фактических размеров профиля изделий и сравнение с заданными по чертежу (матмоделью), с оптимизацией определения смещения и углового разворота профиля сечений и с созданием базы данных.

При контроле лопаток автоматически измеряются профили пера спинки и корыта, а также входных и выходных кромок, включая определение их радиусов (от 0,01 мм и менее). Кроме этого, имеется режим измерения геометрических параметров и замковой части (хвостовика) лопатки, по которой автоматически проводится базирование координат лопатки.

Автоматическое базирование к координатным осям изделий в зависимости от конкрет-

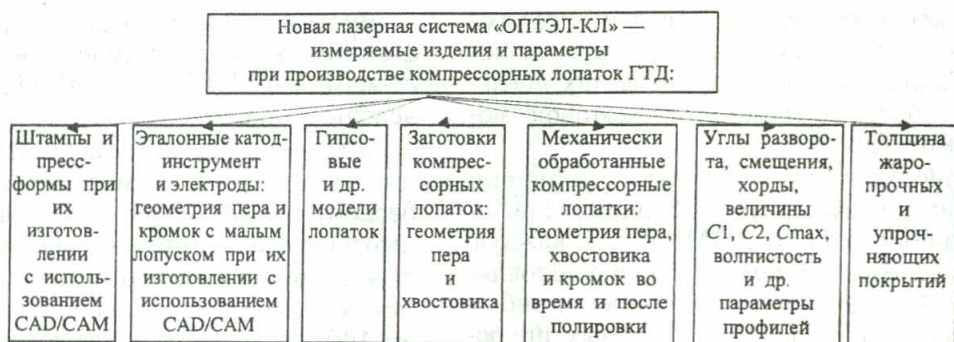


Рис. 2. Измеряемые изделия и параметры при производстве компрессорных лопаток

ного исполнения может осуществляться как по базирующим элементам приспособления или эталон-скалки, так и по базовым поверхностям изделия, например, по замку лопатки, а также по эталонным точкам или сечениям фактического профиля (например, для турбинных лопаток: спинки, корыта, среднего между ними или по точкам полок).

Программное обеспечение системы создано в средах MS DOS, Windows 95/98/NT.

Системы позволяют измерять смещения и развороты профилей сечений, а также форму и радиусы входных и выходных кромок изделий с выдачей этих значений на экране в текстовом и графическом видах, в виде файла и в виде протокола на бумаге. Результаты измерений отображаются в наглядной форме 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.). Результаты измерений автоматически сохраняются в памяти компьютера, что позволяет создать базу данных по различным изделиям. Кроме того, возможно проведение и сопоставление повторных измерений изделий после дополнительных воздействий, в том чис-

ле после обработки, механических нагрузок и пробной эксплуатации.

На рис. 4–7 приведены в качестве иллюстраций результаты быстрых лазерных компьютерных измерений и отображения в 3- и 2-мерном виде оцифрованных различных объектов сложной формы.

Требуемое общее количество используемых систем «ОПТЭЛ» при производстве одного ГТД примерно в 10–20 раз меньше, чем общее количество шаблонных приборов. Это определяется гибкостью и пропорционально более высокой производительностью контроля с цифровой регистрацией результатов.

Применение систем «ОПТЭЛ» позволяет значительно повысить точность по сравнению с шаблонными приборами (до 5–15 раз), ускорить процесс контроля (в 10–20 раз) и исключить субъективность при проведении контроля. Сокращается на несколько месяцев время освоения нового изделия, а также значительно сокращаются трудоемкость и расходы (до 10–20 раз).

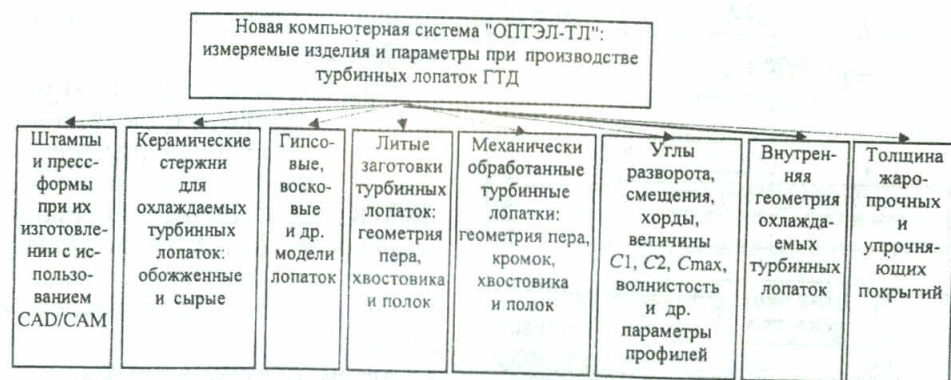


Рис. 3. Измеряемые изделия и параметры при производстве турбинных лопаток

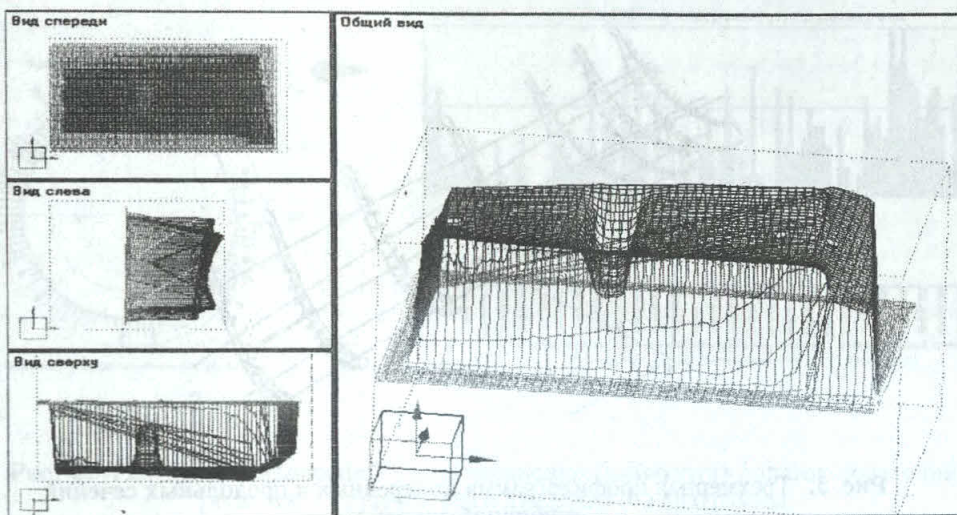


Рис. 4. Трехмерная профилограмма поперечных и продольных сечений штампа (пресс-формы) для производства лопатки

2.1. Лазерный контроль параметров дисков для рабочих колес ГТД

Система «ОПТЭЛ-ДИСК» обеспечивает бесконтактные измерения профиля и толщины дисков ГТД. Электронная часть системы содержит лазерные оптоэлектронные головки и электронный блок.

Измерение двух поверхностей диска производится одновременно. Для сканирования профиля узел крепления диска расположен на вращаемой и перемещаемой шаговыми приводами каретках.

Управление процессом измерений осуществляется компьютером по специально разработанной программе. Программа позволяет производить сканирование диска с разными углами разворота, обработку, визуализацию и контроль полученных данных, а также их хранение в базе данных. После каждого измерения программа готовит графические и текстовые протоколы в электронном виде и в виде распечатки на бумаге.

2.2. Лазерный контроль параметров лопаточных решеток

Автоматизированная система «ОПТЭЛ-ЛР» предназначена для бесконтактных измерений параметров установки лопаток на заданных сечениях в лопаточных решетках ГТД. Система также обеспечивает оптимальную раскладку лопаток по комплектам лопаточных решеток.

Принцип измерения основан на сканировании лопаток «облопаченных» изделий ла-

зерным лучом. Измерения параметров установки лопаток проводятся бесконтактно и с высокой производительностью. Для осуществления измерений параметров установки лопаток предусмотрены соответствующие режимы сканирования лопаток решетки и расчеты ее специфических параметров. Измерения геометрии параметров установки лопаток проводятся автоматически компьютером под управлением специализированного программного обеспечения (ПО) системы. ПО также проводит расчет параметров установки лопаток, отображает и регистрирует значения фактических параметров установки лопаток.

Возможны варианты выполнения системы для определения площади критического (проходного) сечения.

Результаты измерений отображаются в наглядной форме. Они также могут выдаваться в виде распечатанных протоколов на бумаге. Примеры протоколов измерений фактических параметров установки лопаток приведены на рис. 8.

3. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ «ОПТЭЛ»

Высокие точность и производительность бесконтактных измерений систем «ОПТЭЛ» позволяют автоматизировать трудоемкий процесс измерений ответственных изделий, обеспечить 100%-ный объективный контроль сотен и тысяч типоразмеров изделий с регистрацией результатов в памяти компьютера. Объективность и оперативность контроля по-

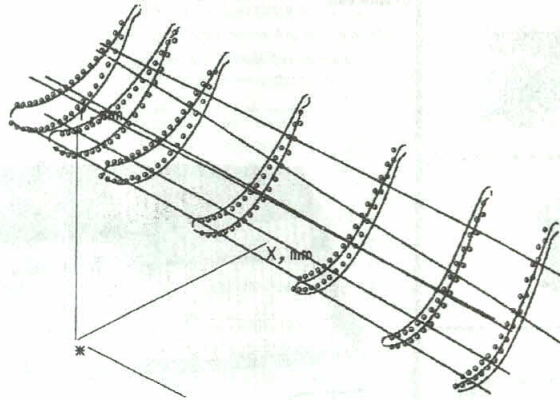


Рис. 5. Трехмерная профилограмма поперечных и продольных сечений турбинной лопатки

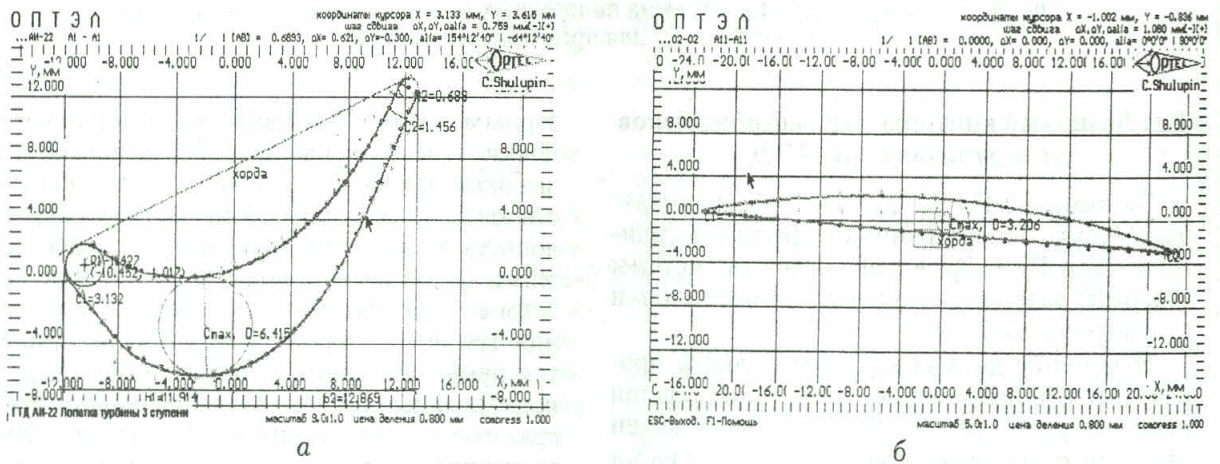


Рис. 6. Профилограммы сечения турбинной (а) и компрессорной (б) лопаток в совокупности с чертежными точками и рассчитанными параметрами профиля

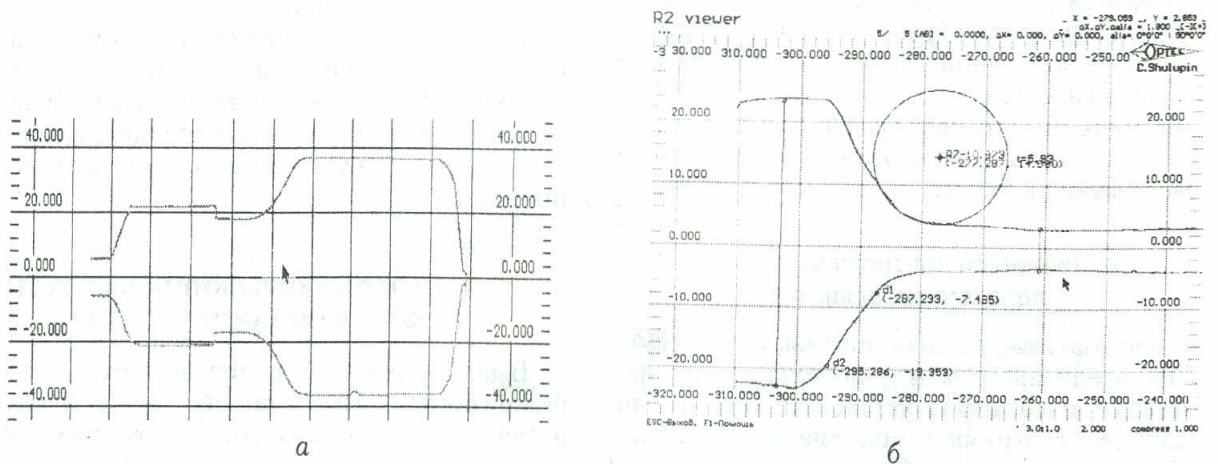


Рис. 7. Профилограмма заготовки диска рабочего колеса ГТД (а) с выделенными толщинами, длинами и радиусами закруглений (б)

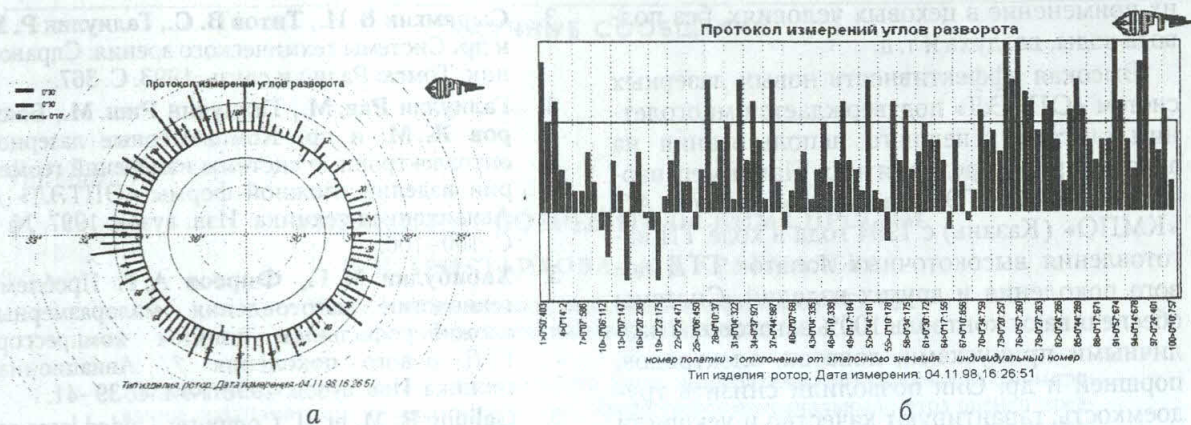


Рис. 8. Результаты измерений углов установки (разворота) лопаток лопаточной решетки — круговая (а) и линейная (б) диаграммы

звolyают повысить выход годных и качество изделий.

Системы контроля нового поколения являются наукоемкими, имеют широкие функциональные возможности и длительный срок использования.

Отпадает необходимость использования координатно-измерительных машин (КИМ), шаблонов и других устаревших контактных механических средств. При измерениях лопаток не требуются эталонные лопатки, шаблоны и контр-шаблоны, а также другая вспомогательная оснастка, которая используется в настоящее время. Это позволяет минимизировать эксплуатационные расходы и разгрузить инструментальное производство.

Системы «ОПТЭЛ» позволяют также автоматизировать проведение научных исследований и экспериментов, связанных с формообразованием, включая точную обработку материалов и изделий.

Автоматизация и проведение измерений в реальном масштабе времени снижают стоимость экспериментальных исследований и отработки технологий.

Немаловажно и исключение субъективных факторов при проведении и обработке результатов измерений и исследований.

Применение нескольких систем исключает необходимость изготовления и применения сотен типоразмеров дорогостоящей устаревшей измерительной оснастки, используемой до настоящего времени (эталонных лопаток, шаблонов и контр-шаблонов), а также высвобождает до сотни контролеров.

Значительно повышается точность изготовления лопаток, уменьшается трудоемкость и сокращается время освоения новых изделий

при минимальных эксплуатационных затратах. Это дает значительную экономию — до нескольких сотен тысяч и миллионов долларов США на один ГТД в зависимости от количества типоразмеров лопаток и объема производства.

Программное обеспечение систем создано специально для отечественных пользователей и производства. Системы совместимы с CAD/CAM, а также АСУ ТП.

Компьютерные лазерные оптоэлектронные системы «ОПТЭЛ» имеют основные параметры мирового уровня и большие функциональные возможности. Прямые аналоги неизвестны. При этом они имеют существенно меньшую стоимость по сравнению с известными зарубежными аналогами.

Из сравнительного анализа характеристик контактных визуальных средств измерений (приборы типа ПОМКЛ, а также шаблонные) следует, что новые системы практически по всем параметрам, включая технико-экономические, превосходят известные: по точности в 5–10 раз; по производительности — в 10 раз; по соотношению производительность / цена — в 100–500 раз.

По сравнению с координатно-измерительными машинами, при сопоставимой погрешности превосходство систем «ОПТЭЛ» по производительности — до десятков-сотен раз, а по соотношению производительность/цена — в сотни-тысячи раз. Поэтому по соотношению производительность/стоимость системы «ОПТЭЛ» многократно превосходят устаревшие контактные средства.

Следует особо отметить высокую устойчивость систем к вибрациям, что обеспечивает

их применение в цеховых условиях, без подвода воды, воздуха и т. д.

Высокая эффективность новых лазерных систем «ОПТЭЛ» подтверждается многолетним опытом успешного использования на авиамоторных предприятиях. Например, партия систем «ОПТЭЛ» эксплуатируется на АО «КМПО» (Казань) с 1994 года в ходе ТП изготовления высокоточных лопаток 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 [4,5].

ВЫВОДЫ

Впервые создана и внедрена в производство партия уникальных лазерных компьютерных систем автоматического измерения геометрии газоздушного тракта ГТД, отвечающая всем современным требованиям авиамоторного производства.

Внедрение высокопроизводительных оптоэлектронных компьютерных систем контроля нового поколения в производство позволяет полностью автоматизировать процесс контроля, делает его точным, объективным и оперативным, а также повышает качественные характеристики лопаток, лопаточных решеток и газоздушного тракта ГТД в целом.

Системы «ОПТЭЛ» удобны и эффективны не только при освоении новых изделий, но и при их серийном производстве. На настоящий момент альтернативы этим системам не имеется.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галиулин Р. М. Помехоустойчивые оптоэлектронные сенсоры для систем автоматизации электродуговой сварки // Системы оцувствления промышленных роботов и гибких производственных систем / Под ред. И. М. Макарова, Е. П. Попова. М.: Наука, 1989. С. 115–126.
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. НТК СНГ / Под ред. И. М. Макарова, Д. Е. Охочимского, Р. М. Галиулина. Уфа: УАИ, 1992. Ч. 1. С. 14–20.

3. Сырямкин В. И., Титов В. С., Галиулин Р. М. и др. Системы технического зрения: Справочник. Томск: Радио и связь, 1993. С. 367.
4. Галиулин Рав. М., Галиулин Риш. М., Бакиров Ж. М. и др. Компьютерные лазерно-оптоэлектронные системы измерений геометрии изделий сложной формы «ОПТЭЛ» // Авиационная техника. Изв. вузов. 1997. № 1. С. 100–106.
5. Хабибулин М. Г., Фирсов А. Г. Проблемы технологии изготовления малоразмерных сложнопрофильных лопаток компрессора ГТД нового поколения // Авиационная техника. Изв. вузов. 1998. № 4. С. 39–41.
6. Galiulin R. M. et al. Computer - aided laser optoelectronic 3-d measuring systems for complex shaped object geometry of "OPTEL" // Proc. SPIE 2713. Bellingham, USA. 1996. V. 2713. P. 393–399.
7. Galiulin Rav. M., Galiulin Rish. M., Bakirov Zh. M. et al. A fast laser systems for measuring geometry of objects // Proc. of 3th Conf. on Problems of Physical Metrology FIZMET'98. S.-Petersburg, Russia, 1998. P. 102–105.
8. Galiulin Rav. M., Galiulin Rish. M., Bakirov Zh. M. et al. A fast laser autonomous systems for measuring geometry of complex objects // Int. Scient. Issue. Ufa-Karlsruhe: USATU, 1998. P. 169–173.
9. Galiulin Rav. M., Galiulin Rish. M., Bydanov V. V. et al. A fast laser digital systems for measuring geometry of biomedical objects // Proc. of 10th Int. Symp. on Development in Digital Measuring Instrumentation (ISD-DMI'98). IMEKO TC-4 Techn. Commitee on Measurement of Electrical Quantities. Naples, Italy: University of Naples. 1998. Vol. III. P. 909–911.
10. Галиулин Рав. М., Галиулин Риш. М., Бакиров Ж. М. и др. Контроль газоздушного тракта ГТД лазерными компьютерными системами «ОПТЭЛ» // Неразрушающий контроль и диагностика: Тез. докл. 15-й Российской НТК. М., 1999. С. 87.

ОБ АВТОРЕ

Галиулин Равиль Масгутович, доцент, рук. Межвуз. НИЛ оптоэлектронных контрольно-измерительных систем УГАТУ. Дипл. радиотехн. (ТИАСУР, 1975). Канд. техн. наук по элементам и устройствам вычислительной техники (ТИАСУР, 1981). Докторант кафедры технической кибернетики. Исследования в области оптоэлектронных контрольно-измерительных систем.

