

УДК 621.383:681.3

*Рав. М. ГАЛИУЛИН, канд. техн. наук,  
Риш. М. ГАЛИУЛИН, Ж. М. БАКИРОВ, Д. Р. БОГДАНОВ, научные сотр. (УГАТУ, Уфа),  
К. О. ШУЛЮПИН, программист (УГАТУ, Уфа), М. Г. ХАБИБУЛЛИН, канд. техн. наук,  
А. Ф. ПАВЛОВ, докт. техн. наук, М. С. РЯБОВ, зам. гл. технолога,  
К. Н. ЯМАЛИЕВ, директор ТОО "Консорциум-38" (АО "КМПО", Казань)*

## КОМПЬЮТЕРНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЙ ГЕОМЕТРИИ ИЗДЕЛИЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ "ОПТЭЛ"

Рассматривается бесконтактная система измерений геометрических параметров изделий сложной формы в производстве авиационного двигателестроения (лопаток, пресс-форм, стержней, шаблонов, электродов). Предложены оптоэлектронные лазерные системы, основанные на триангуляционном методе. Показаны преимущества бесконтактных измерительных систем, принципы их построения, технические характеристики. Описаны функции программного обеспечения, произведена классификация систем в зависимости от типа решаемых задач.

В технологических процессах авиационного моторостроения наблюдается тенденция увеличения контрольно-измерительных операций, в том числе измеряются и геометрические параметры деталей в ходе обработки. Кроме того, с развитием и расширением применений САПР (CAD – CAM – DMIS) и новых технологий формообразования, например быстрого прототипирования, требуется проводить быстрые измерения геометрических параметров изделий сложной формы: лопаток, пресс-форм и других.

Контрольно-измерительные операции по измерению геометрических параметров деталей сложной формы можно разделить на три вида: входной контроль исходной заготовки; выходной контроль готовой детали; измерения непосредственно в ходе технологического процесса. Первые два предполагают создание автоматизированных комплексов выбраковки. Третий – наиболее перспективен и позволяет автоматически адаптировать технологический процесс в зависимости от геометрии обрабатываемой детали.

Используемые традиционные контактные методы и средства измерений геометрических параметров изделий, например координатно-измерительные машины, во многих случаях не отвечают возросшим требованиям и часто неприменимы. Они имеют весьма низкую производительность измерений, высокую стоимость, сложны в эксплуатации и требуют особых условий.

Для контрольно-измерительных систем наиболее эффективно использование лазерных оптоэлектронных методов и средств, не требующих контакта с измеряемой деталью и обладающих высокой точностью, быстродействием и универсальностью [1, 2]. Использование триангуляционного способа измерений в сочетании с лазерным источником с малым диаметром луча, преобразованием оптического сигнала в видеосигнал и обработкой его в большом динамическом диапазоне, позволяет проводить измерения параметров деталей, изготовленных из различных материалов.

Системы состоят из 4 базовых модулей: оптико-механического модуля, электронного блока, компьютера и специализированного программного обеспечения. Диапазоны контроля сложнопрофильного изделия по координатам X и Y определяются перемещением двухкоординатного стола и могут составлять до 500 мм и более. Опробованы и испытаны варианты с различными диапазонами измерений высоты профиля, в частности с диапазоном, суженным до 1,5 мм, и с разрешающей способностью до 0,03 мкм. Такие параметры позволяют проводить контроль геометрии микрообъектов, например в микроэлектронике. Также испытаны варианты дальномеров с диапазоном до 30 м с разрешением до 0,3 мм, взаимодействующие с различными объектами, в том числе с черной поверхностью. Такие дальномеры позволяют определять уровень жидкостей, например нефтепродуктов.

Время одного измерения высоты профиля мало и составляет 0,001 – 0,010 с. Такое высокое быстродействие систем, не требующее контакта с измеряемой поверхностью, позволяет производить измерения в ходе движения без остановок и обеспечить высокую производительность измерений непосредственно в ходе технологического процесса.

Информация с оптоэлектронных головок поступает в электронный блок, где она обрабатывается и преобразуется в необходимую форму для передачи в компьютер. Траектория обхода измеряемой детали задается компьютером и может оперативно изменяться с пульта.

Компьютер осуществляет обработку результатов измерений, отображение необходимой текущей информации при измерениях, отображение графической и другой служебной информации, а также формирует управляющие команды для координатного стола.

Преимуществами описанных лазерных систем являются универсальность применения, высокая производительность и точность измерений геометрии поверхности, в том числе и для профиля и радиусов острых кромок (от 0,1 мм и менее), разнообразных (даже для хрупких и мягких) сложнофасонных изделий из различных материалов: лопаток ГТД, пресс-форм, электродов, стержней, матриц и других.

Разработаны, апробированы и тиражируются лазерные оптоэлектронные системы "ОПТЭЛ-200", "ОПТЭЛ-2Л", "ОПТЭЛ-КЛ", "ОПТЭЛ-ТЛ" и "ОПТЭЛ-Ш" с разрешающей способностью по координатам 0,001 мм и временем измерения для тысяч точек профиля сечения 2-3 с [3 – 7]. Они внедрены на авиамоторных предприятиях и показали высокую эффективность, особенно при освоении новых изделий.

Система "ОПТЭЛ-200" позволяет проводить быстрые измерения геометрии изделий в диапазоне 400 × 400 × 200 мм. Системы "ОПТЭЛ-КЛ" и "ОПТЭЛ-ТЛ" выполнены на базе высокоточных инструментальных микроскопов и обеспечивают измерения в диапазоне до 200 × 100 × 150 мм и до 500 × 250 × 200 мм соответственно.

Быстрый (в десятки раз быстрее по сравнению с аналогами) автоматизированный контроль профиля плоских изделий, например шаблонов и лекал, с записью результатов в базе данных компьютера обеспечивает система "ОПТЭЛ-Ш".

Рассмотрим подробнее систему "ОПТЭЛ-КЛ", отвечающую современным требованиям авиационного производства и машиностроения [8].

Область применения системы "ОПТЭЛ-КЛ". Система обладает уникальной возможностью проводить без воздействия на объект автоматические прямые и быстрые бесконтактные трехмерные компьютерные измерения практически любых изделий сложной формы, выполненных из различных материалов, в том числе из хрупких и мягких, например из полимеров, биоматериалов.

Областью применения является бесконтактный контроль изделий сложной формы: лопаток, пресс-форм, обрабатывающего инструмента в производстве ГТД, системах CAD – CAM – DMIS (например, "Cimatron"), научные исследования с использованием трехмерных объектов с возможностью гибкого и быстрого перехода на разные виды изделий.

При контроле лопаток автоматически измеряются профили пера спинки и корыта, а также входных и выходных кромок с одновременным определением их радиусов (0,1 мм и менее). Кроме этого, определяются размеры замковой части лопатки.

Система состоит из оптико-механического модуля с лазерной оптоэлектронной головкой, электронного блока первичной обработки сигналов и управления приводом, персонального компьютера IBM PC стандартной конфигурации и программного обеспечения системы, специально созданного для отечественных пользователей и производства.

Система размещается на одном рабочем столе и не требует особых условий при эксплуатации.

Принцип действия. Работа измерительной системы "ОПТЭЛ-КЛ" основана на триангуляционном способе измерений. На объект контроля направляется узкий лазерный луч. Изображение лазерного пятна, формируемое по диффузной составляющей отраженного лазерного луча, проецируется с другого углового направления на интегральный фотоприемник, в качестве которого используется отечественный интегральный многоэлементный фотоприемник на основе МДП (металл-диэлектрик-полупроводник)-фотодиодных ячеек.

Электронный блок устройства обеспечивает развертку интегрального фотоприемника и соответствующую обработку видеосигнала для выделения информации о положении центра проекции изображения пятна в требуемом динамическом диапазоне интенсивности

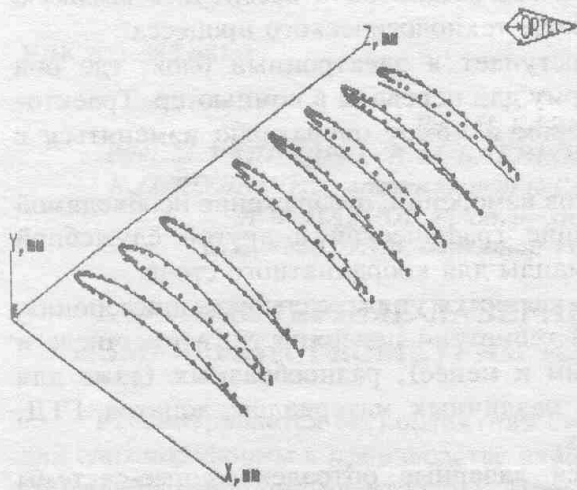


Рис. 1. Распечатка трехмерного профиля лопатки

рассеянного объектом лазерного луча. Код центра положения пятна, соответствующий высоте профиля по координате  $Z$ , вводится в компьютер.

Измерения проводятся бесконтактно и с высокой скоростью (сотни раз в секунду). Это обеспечивает непрерывность измерений при относительном движении оптоэлектронной головки и контролируемого изделия.

Координаты изделия  $X$  и  $Y$  также непрерывно вводятся в компьютер, где рассчитываются, отображаются и регистрируются значения фактического профиля изделия и сравниваются с заданным чертежом. Результаты измерений отображаются в различных наглядных формах, например в таких, как на рис. 1 и 2, регистрируются и сохраняются в памяти компьютера и на машинных носителях информации неограниченное время, а также выдаются в виде распечатанных на бумаге протоколов.

#### Основные технические характеристики:

Количество контролируемых сечений (задается программно)	от одного до десятков сечений
Количество контролируемых точек в сечении (задается программно)	1 ... 10 000
Диапазон измерения длины изделия по координате $Z$ , мм	200 (может быть расширен до 920)
Диапазон измерения ширины изделия по координате $X$ , мм	не менее 100 (может быть расширен до 920)
Диапазон измерения высоты профиля оптоэлектронной головкой по координате $Y$ , мм	не менее 140 (может быть расширен до 300)
Разрешающая способность, мкм	1
Время измерения одного сечения, с	1 ... 3
Производительность контроля лопаток (определяется количеством сечений, размерами) для лопатки с размерами $50 \times 30$ мм и 8 сечениями, шт/ч	30 ... 80
Время перехода на другой типоразмер лопатки, с	менее 10

Оригинальное программное обеспечение позволяет работать с системой без специальной подготовки и содержит всю необходимую справочную информацию. Оно дает возможность вводить эталонные значения точек профиля изделий сложной формы (данные с чертежа) и допусков, причем раздельно на каждую точку из файла САПР двигателя или с клавиатуры; оперативно переходить на другие типоразмеры; регистрировать, отображать в различных видах и хранить результаты измерений с фиксацией шифра и номера изделия, партии, данных оператора, даты проведения измерений; проводить базирование по заданным участкам измеряемого изделия, калибровку и поверку системы.

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).

**Эффективность внедрения системы.** Высокие точность и производительность системы "ОПТЭЛ-КЛ" позволяют автоматизировать трудоемкий процесс измерений ответственных изделий и обеспечить их 100-процентный контроль. Объективность и оперативность контроля позволяют повысить качество и обеспечивают выход годных изделий. Система позволяет измерять смещения и развороты профилей сечений, форму и радиусы входных и выходных кромок изделий, в том числе и эталонных лопаток, и выдает эти значения на экран и на принтер.

Данные измерений автоматически сохраняются в памяти компьютера, что позволяет создать базу данных по различным изделиям. Кроме этого, возможны повторные измерения

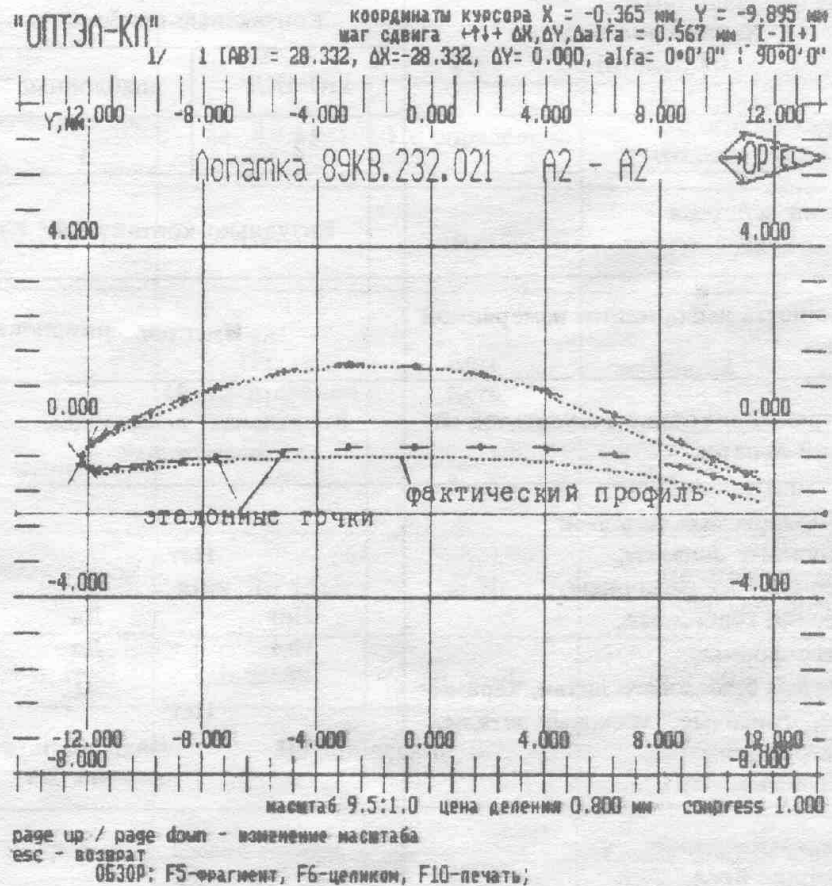


Рис. 2. Распечатка двухмерного сечения фактического профиля лопатки и эталонных (чертежных) точек

изделий после дополнительных воздействий, в том числе после механических нагрузок и пробной эксплуатации.

Основные параметры компьютерной лазерной оптоэлектронной системы "ОПТЭЛ-КЛ" соответствуют мировому уровню, при этом стоимость их существенно меньше по сравнению с известными зарубежными аналогами.

Высокая точность и производительность системы "ОПТЭЛ-КЛ" позволяют автоматизировать проведение научных исследований и экспериментов, связанных с формообразованием, а также с точной обработкой материалов и изделий. Автоматизация и реальный масштаб времени измерений снижают стоимость экспериментальных исследований и отработки технологии. Немаловажным является исключение субъективных факторов при измерениях и обработке их результатов.

Автоматическое базирование (привязка) к координатным осям или к базовым поверхностям изделий в зависимости от конкретного исполнения может осуществляться как по базирующим элементам установочного приспособления, так и по базовым элементам поверхности изделий, например по хвостовику (замку) или по установочной полке лопатки. Кроме того, автоматическое базирование может проводиться так, чтобы обеспечить минимальные отклонения профиля поверхности изделий от теоретического, например от поверхности спинки, корыта или среднего между ними, что особенно важно для турбинных лопаток.

В настоящее время разработана модернизированная система "ОПТЭЛ-ТЛ", предназначенная для измерений турбинных лопаток, в том числе литейных заготовок, керамических стержней и пресс-форм.

Использование системы "ОПТЭЛ-КЛ" при контроле изделий эффективно на всех стадиях производства начиная с исходной заготовки: в процессе доводки (полировки), при входном и выходном контроле готовой продукции, например рабочих и эталонных лопаток.

Следует особо отметить универсальность и гибкость системы "ОПТЭЛ-КЛ": на одной системе могут измеряться десятки типоразмеров лопаток с быстрым и легким переходом с одного типоразмера на другой.

При измерениях лопаток не требуются эталонные лопатки, шаблоны, контршаблоны и другая вспомогательная оснастка, которая используется в настоящее время. Это позволяет минимизировать эксплуатационные расходы и разгрузить инструментальное производство.

Сравнительные характеристики контактных приборов типа ПОМКЛ и шаблонных, а также системы "ОПТЭЛ-КЛ" приведены в таблице.

Характеристика (параметр)	Контактные приборы		Бесконтактная лазерная система "ОПТЭЛ-КЛ"
	ПОМКЛ	шаблонные	
1	2	3	4
Принцип действия	Визуально-контактный		Бесконтактный, лазерный оптоэлектронный
Возможность деформации измеряемой лопатки	Имеется		Отсутствует
Регистрация и оценка результатов измерений лопаток	Визуальная, аналоговая, оператором		Автоматическая, цифровая, компьютером
Виды измеряемых изделий: – эталонные лопатки, – рабочие компрессорные, – рабочие турбинные, – пресс-формы, – изделия безбазового литья, керамические, гипсовые, восковые детали, – инструмент	Нет Да Нет Нет Нет	Нет Да Да Да Нет Да – при наличии баз	Да Да Да Да Да Да
Режимы измерений: – профиля пера, – смещения профиля, – разворота профиля, – профиля входных и выходных кромок (радиусов) – параметров замка Набор статистики	Да Нет	Да Да Нет Да Нет Нет	Да Да Да Да Да Да
Погрешность измерений лопатки, мм	$\pm 0,05$	$\pm 0,03$	$\pm 0,002$
Максимальный размер измеряемого поля, мм	до 300×80	до 400×100	От 200×100 до 920×920 за одну установку лопатки (определяется координатным столом)
Минимальный размер измеряемого поля, мм	5×5	2×0,3	0,02×0,02
Производительность измерений (* – с учетом времени регистрации результатов на бумаге): – время на 1 лопатку, мин – количество, шт/ч	до 0,5 (до 10–20*) до 120 (до 3–6*)	1–5 (до 15*) до 15–60 (до 3–6*)	0,3–2 (до 0,5–2*) до 60–180 (до 30–120*)
Форма представления результатов измерений лопатки	Проекционное изображение концов штырьков на матовом экране	Зазор между лопаткой и шаблоном	Цифровые, табличные, графические и другие виды протоколов, файл в базе данных компьютера
Минимальный шаг вдоль сечения, мм	5–7	Не определен	< 0,01

1	2	3	4
Максимальное количество измеряемых точек	до 8–15	Не определено	Не ограничено (больше 10 000)
Возможность измерений всех чертежных точек	Нет	Нет	Да
Возможность измерения отклонений – по нормали к профилю – по координатам	Нет По касательной	Есть Есть	Есть Есть
Минимальный шаг между сечениями, мм	5–7	3–5	Менее 0,01
Максимальное количество измеряемых сечений	до 8–15	до 20	Не ограничено (больше 50)
Максимальный угол закрутки, град.	до $\pm 30$	до $\pm 70$	до $\pm 80 - \pm 85$
Способ задания сечений и эталонных точек	Механический		Математический, Программный
Способ перехода к другому типоразмеру	Смена набора контактных щупов	Смена шаблонов	Смена шифра изделия в базе данных компьютера
Время перехода и настройки на новое изделие	до 1 ч	Не определено	до 10 с
Приспособление для настройки	Физическая эталонная лопатка	Не требуется	Не требуется
Состав	Механика, оптика	Механика	Механика, оптика, электроника, программное обеспечение ПЭВМ
Аналоги	Не известны		Лазерный измеритель "Rotten Kolber Hoio System" (Германия)
Возможность автоматической передачи результатов смежникам и обрабатывающему оборудованию для коррекции техпроцесса, например CAD – CAM "Cimatron"	Не предусмотрена		Предусмотрена
Эксплуатационные расходы	Велики (на изготовление инструментальной оснастки и эталонов)		Незначительны (в основном, на обслуживание компьютера)
Ресурс базового прибора, год	Более 5	0,5 ... 1	Более 5
Ресурс сменных наборов щупов (шаблонов), год	0,5	0,5 ... 1	Не требуется
Требования к обслуживающему персоналу, квалификация	Специальное образование, стаж работы		Среднее образование, инструктаж

1	2		4
Базирование	По точно выполненным жестким базам		Произвольное, привязка к лопатке по результатам расчетов
Возможность модернизации для улучшения характеристик и повышения удобства пользования Возможность измерений нескольких лопаток за одну установку (в кассете)	Нет		Есть
	Нет		Есть
Соотношение "производительность/цена", шт/ч (\$1000) для типоразмеров лопаток:			
– для одного	0,2 ... 0,5	0,4 ... 0,8	0,6 ... 2,4
– для десяти	0,1 ... 0,2	0,04 ... 0,08	0,6 ... 2,4
– для ста ( $\approx 3$ ГГД)	0,01 ... 0,02	0,004 ... 0,008	0,5 ... 2,0

Из сравнительного анализа следует, что новая система по всем параметрам, включая технико-экономические, превосходит известные: по точности – в 10-20 раз; по производительности – в 10 раз; по соотношению "производительность/цена" – в 3-50 раз.

Указанные возможности и преимущества систем "ОПТЭЛ-КЛ" подтверждены результатами испытаний и успешной эксплуатацией шести экземпляров систем в условиях реального производства авиационных двигателей на АО "КМПО" с 1994 г., где они показали высокую эффективность и ускорили освоение новой высокоточной технологии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Системы технического зрения: Справочник / В. И. Сыряжкин, В. С. Титов, Р. М. Галиулин и др. Томск: МГП "Раско", Томское отд-ние изд-ва "Радио и связь", 1993. 367 с.

2. Г а л и у л и н Р. М. Оптоэлектронные контрольно-измерительные системы технического зрения на основе коммутируемых фотодиодных структур // Тез. докл. науч.-техн. конф. "Разработка систем технического зрения и их применение в промышленности (СТЗ-92)": В 2 ч. / Уфим. авиац. ин-т. Уфа, 1992. Ч. 1. 150 с.

3. Тез. докл. науч.-техн. конф. "Разработка систем технического зрения и их применение в промышленности (СТЗ-92)": В 2 ч. / Уфим. авиац. ин-т. Уфа, 1992. Ч. 2. 100 с.

4. Г а л и у л и н Р. М. Помехоустойчивые оптоэлектронные сенсоры для систем автоматизации электродуговой сварки // Системы очувствления промышленных роботов и гибких производственных систем: Сб. М.: Наука, 1989. С. 115–126.

5. Г а л и у л и н Р. М., Т а г и р о в а К. Ф. Гамма оптоэлектронных контрольно-измерительных систем технического зрения. Уфа: Изд-во Уфим. авиац. ин-та. 1994. 70 с.

6. Galiulin Rav. M., Galiulin Rish. M., Krashennnikov A. S., Tagirova K. F. Optoelectronic measuring systems and their applications // Proceedings of Asia – Pacific Conference on Control and Measurement, Kunming, China: Trans. of Nanjing University of Aeronautics, Astronautics. 1993. Vol. 10. No 1. P. 275.

7. Galiulin Rav. M., Galiulin Rish. M., Bakirov J. M., Khabibullin M. G. and other. Computer-aided laser-optoelectronic 3-d measurement "Optel" systems of complex shaped object geometry // Proceedings of "The 5-th International Conference "Industrial lasers & lasers applications (ILLA – 95)". Bellingham, USA. 1996. Vol. 2713. P. 391–399.

8. Galiulin Rav. M., Galiulin Rish. M., Bakirov Zh. M., Bogdanov D. R., Shulupin C. O., Khabibullin M. G. Computer-aided laser-optoelectronic "optel" systems for measuring geometry of complex objects // Proceedings of the 10th international conference "Systems for automation of engineering and research (SAER – 96)" and Decus Nug seminar– 96. Sofia. 1996. P. 56–61.