

# Лазерная система «ОПТЭЛ-Л» контроля геометрии лопаток ГТД в технологии интеллектуальной поддержки принятия решений

Рав. М. Галиулин  
Уфимский государственный авиационный  
технический университет  
Уфа, Россия  
e-mail: [head@nvp-optel.ru](mailto:head@nvp-optel.ru)

Р. Х. Барлыбаев  
Уфимский государственный авиационный  
технический университет  
e-mail: [rasool114@mail.ru](mailto:rasool114@mail.ru)

Риш. М. Галиулин  
Уфимский государственный авиационный  
технический университет  
e-mail: [head@nvp-optel.ru](mailto:head@nvp-optel.ru)

Р. Р. Галимзянов  
Уфимский государственный авиационный  
технический университет  
e-mail: [head@nvp-optel.ru](mailto:head@nvp-optel.ru)

## Аннотация<sup>1</sup>

Разработаны и производятся новые высокопроизводительные лазерные компьютерные системы "ОПТЭЛ-Л" обеспечивающие контроль основных элементов газо-воздушного тракта ГТД - лопаток и технологической оснастки для их производства с регистрацией результатов в памяти компьютера.

Впервые создана и внедрена в производство ГТД партии уникальных отечественных лазерных компьютерных систем "ОПТЭЛ" геометрии сложных профилей, отвечающая всем современным требованиям авиамоторного производства и машиностроения.

Высокая эффективность систем "ОПТЭЛ" подтверждается многолетним опытом использования на ряде ведущих авиамоторных предприятиях.

Описаны принцип действия системы, характеристики, измеряемые параметры лопаток, программное обеспечение системы.

## Введение

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

---

Труды Седьмой всероссийской научной конференции "Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений", 28-30 мая, Уфа-Ставрополь, Ханты-Мансийск, Россия, 2019

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 имеют средства автоматизированного контроля и управления для автоматизированных АСУ ТП. Поэтому создание нового поколения гибких автоматизированных систем контроля геометрии сложных профилей, являющихся одним из звеньев в АСУ ТП, является весьма актуальной.

Трудоемкость производства ГТД в большой степени определяется трудоемкостью изготовления газо-воздушного 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 2000 - 5000 лопаток десятков типоразмеров. Поскольку каждый элемент газо-воздушного требует контроля множества параметров, средства и технология контроля занимают значительную часть трудоемкости изготовления и себестоимости двигателя и определяют время подготовки производства нового ГТД [1, 2].

Существующие средства контроля геометрии газо-воздушного 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) [3].

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 [4].

В данной статье описаны новые лазерные компьютерные системы "ОПТЭЛ-Л" для бесконтактных автоматических измерений геометрических параметров основных элементов газо-воздушного тракта ГТД:

- а) отдельных лопаток и технологической оснастки для их изготовления;
- б) лопаточных решеток в сборе.

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

Созданы новые лазерные компьютерные системы нового поколения "ОПТЭЛ-Л" для высокопроизводительного контроля геометрии изделий сложной формы с гибким и быстрым переходом на разные типоразмеры и виды изделий.

Это 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  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C$  макс, волнистости пера и др. [5 - 16]

#### Принцип действия

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

Обобщенная функциональная схема новых лазерных систем "ОПТЭЛ-Л" контроля геометрии изделий сложной формы приведена на рис. 1

В общем случае система имеет N оптоэлектронных головок и датчиков перемещений (поворота). Электронный блок проводит выделение, предварительную обработку информационных сигналов и ввод в компьютер. Специализированное программное обеспечение (ПО), совместимое с CAD/CAM системами, обеспечивает проведение автоматических измерений, регистрацию, отображение, документирование и сохранение результатов в базе данных с передачей их по компьютерной сети.

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.

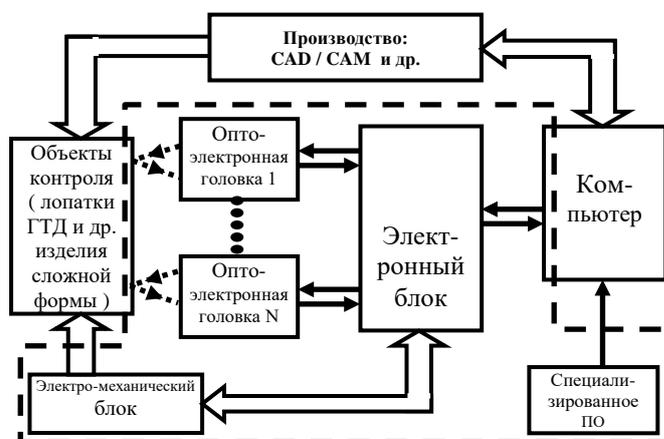


Рис.1. Блок-схема лазерной оптоэлектронной измерительной системы "ОПТЭЛ"

Цифровые коды, соответствующие контролируемой геометрии, выделяются и обрабатываются в компьютере по специальной программе.

Измерения проводятся бесконтактно и с высокой производительностью (сотни – тысячи 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.

#### Назначение изделия

Лазерная компьютерная система контроля геометрии лопаток «ОПТЭЛ-Л» предназначена для высокопроизводительных бесконтактных трехмерных измерений геометрических параметров изделий сложной формы - лопаток ГТД. Система может

заменить приборы ПОМКЛ, используемые на авиамоторных заводах. Система имеет существенно лучшие эксплуатационные характеристики и является современным компьютеризированным измерительным средством. Система предназначена для эксплуатации в цеховых условиях.

Процесс контроля геометрии лопаток полностью автоматизирован.

### Область применения

Бесконтактный высокоточный и высокопроизводительный контроль геометрических параметров компрессорных и турбинных лопаток, заготовок лопаток, стержней, моделей в технологических процессах при производстве ГТД.

Система отличается повышенной производительностью измерений при контроле лопаток ГТД и промышленным исполнением для обеспечения работы в цеховых условиях. Компьютер, монитор и клавиатура системы имеют промышленное исполнение.

Контролируемые параметры лопаток:

- Отклонение профиля в сечениях от теоретического (по нормали и по координатам)
- Смещение и разворот сечений
- Смакс, С1, С2 и т.д.
- Длина и угол хорды
- Входной и выходной углы
- В1, В2
- и другие.

Изделия могут быть изготовлены из различных материалов с различным качеством обработки поверхностей (до 9 класса и выше).

Программное обеспечение системы работает в среде Windows XP и позволяет производить измерения всевозможных геометрических параметров объектов, осуществлять привязку к системе координат объекта и вычислять разнообразные параметры геометрии лопаток. Все измерения программируются и запоминаются, что позволяет контролировать однотипные объекты с высокой производительностью. Вычисления максимально адаптированы к контролю лопаток ГТД, при этом предоставляется широкий набор процедур для универсальных измерений. Формы протоколов для отчетов также программируются пользователем применительно к требованиям производства. Поддерживаются протоколы DXF и IJES для обмена с САD-САМ. Предоставляется возможность формировать протоколы для Excel.

Система предназначена для работы на предприятиях авиационной, металлургической, машиностроительной и др. промышленности.

Лазерная система «ОПТЭЛ-Л» контроля геометрии лопаток ГТД в технологии интеллектуальной поддержки принятия решений

Современные универсальные системы «ОПТЭЛ-Л» при производстве лопаток и лопаточных решеток ГТД исключают использование координатно-измерительных машин (КИМ), шаблонов, приборов ПОМКЛ и других устаревших ручных контактных средств контроля. Это значительно сокращает затраты на проектирование, изготовление и время освоения производства новых изделий.

Можно отметить насущную необходимость применения системы "ОПТЭЛ-Л" в литейном производстве при производстве охлаждаемых турбинных лопаток, керамических стержней, технологической оснастки (восковых моделей и др.), где высокая абразивность керамических стержней исключает применение КИМ для измерений их геометрии, так как изнашиваются контактные щупы КИМ. Кроме того, очень сложная геометрия каналов вихревых матриц стержней, наличие сложных малогабаритных углублений, вырезов, лабиринтов исключает использование контактных щупов, которые имеют большой диаметр (до 2... 5 мм). Требуется контролировать геометрию каждого керамического стержня, так как в ходе высокотемпературного отжига они существенно деформируются (коробятся), что может привести к уменьшению толщины стенок охлаждаемых турбинных лопаток. Вследствие этого возможны локальные перегревы пера, потеря прочности и др. Все это снижает срок службы и надежность эксплуатации турбины и ГТД в целом.

Также важно оперативно проводить компьютерный анализ и соотнесение геометрии всей технологической цепочки: восковых моделей, литья турбинных лопаток, керамических стержней, механически обработанных и защищенных покрытиями турбинных лопаток, включая геометрию внутренних полостей, каналов и др., для коррекции техпроцессов. Все это выполнимо на системах "ОПТЭЛ-Л", которые имеют в своем составе развитое специализированное программное обеспечение для контроля геометрии изделий сложной формы.

Предыдущие версии системы "ОПТЭЛ-Л" работают в цеховых условиях и полностью заменяют устаревшие низкопроизводительные контактные механические средства: шаблонные приборы, координатно-измерительные машины (КИМ).

Следует особо отметить, в отличие от КИМ, высокую устойчивость систем "ОПТЭЛ-Л" к механическим вибрациям и ударам. Это обеспечивает их применение в цеховых условиях. Не требуется подвода сжатого воздуха, воды, стабилизации температуры до  $\pm 1$  град. С и т.д., что необходимо для КИМ, которые невозможно эксплуатировать в цеховых условиях.

Системы "ОПТЭЛ-Л" позволяют решить проблему объективных измерений геометрических размеров

изделий в цеховых условиях с высокой производительностью и с созданием базы данных, что актуально в соответствии со стандартом ISO 9000.

Процесс измерений требует минимального участия человека (оператора). Имеется возможность гибкого и быстрого перехода на разные типоразмеры изделий.

Система встраивается в технологический процесс производства, может работать с системами автоматизированного проектирования CAD/CAM, повышая эффективность их применения.

Перечень контролируемых изделий на лазерной системе «ОПТЭЛ-Л» при производстве ГТД:

1. Компрессорные лопатки: заготовки, гипсовые модели, лопатки при обработке и полировке.
2. Турбинные лопатки: литые, керамические стержни, восковые модели, лопатки при обработке.
3. Электроды, пресс-формы, штампы и др. ( массой до 15-20 кг ). Изделия из легкодеформируемых материалов (резина, полимеры).

#### Основные технические характеристики системы

Наименование характеристики	Ед. изм.	Значение
Объект измерения		турбинные и компрессорные лопатки
Датчик		лазерная оптоэлектронная головка
Количество датчиков	шт	2
Диапазон измерений координаты заданной точки поверхности лопатки: - по координате Z (длина изделия) - по координате X (ширина изделия) - по координате Y (высоты профиля изделия) * - зависит от используемого координатного стола	мм	0 ÷ 400* 0 ÷ 120* 0 ÷ 100*
Погрешность измерения координат X и Z заданных точек поверхности лопаток	мм	не более ± 0,005
Погрешность измерения координаты Y высоты профиля металлических изделий с шероховатостью от Ra 3.0 до Ra 0.32	мм	не более ± 0,01

Количество контролируемых сечений	шт	от одного до десятков
Количество контролируемых точек в сечении	шт	от одной до тысяч
Разрешающая способность	мм	0,001
Время измерения одного сечения	сек	2 ÷ 5
Производительность контроля лопатки с размерами 100 x 40 мм и 8-ью сечениями,	шт/час	120÷180
Время перехода с одного типоразмера на другой	мин	менее 1
Питание системы – переменный ток с напряжением и частотой	В, Гц	~220 ± 22 50± 1
Система оснащена специальным программным обеспечением (ПО) «ОПТЭЛ – 3D».		
ПО обеспечивает проведение автоматизированного контроля.		

Контролируемая поверхность изделий может иметь различные цвет, шероховатость и широкий диапазон углов наклона относительно луча лазера. При измерениях зеркальных поверхностей рекомендуется применение матирующего порошка.

Использование триангуляционного способа измерений в сочетании с электронной и программной обработкой информационных сигналов обеспечивает высокую точность и производительность бесконтактных измерений, надежность работы в цеховых условиях.

Оригинальное программное обеспечение позволяет работать с системой без специальной подготовки и содержит всю необходимую справочную информацию.

#### Программное обеспечение системы.

В системе используется специальное программное обеспечение (СПО) «ОПТЭЛ-3D», работающее в среде «WINDOWS».

ПО системы позволяет производить:

- ввод с файла конструктора CAD / CAM или с клавиатуры математической модели (эталонные точки) профиля изделий сложной формы (данные с чертежа) и допусков, раздельно на каждую точку;
- ввод программы контроля изделия с клавиатуры;
- оперативный переход на другие типоразмеры изделий;

- проведение автоматизированной привязки к системе координат свободно ориентированного изделия (базирования);

- регистрацию, отображение и хранение результатов измерений с фиксацией шифра и номера изделия, партии, данных оператора, даты проведения измерений;

- калибровку, настройку и поверку системы.

Результаты измерений отображаются в наглядной форме на мониторе, а также могут быть оформлены на бумаге в нужном для пользователя виде (графики, текстовые и графические протоколы измерений и т.п.) и содержат:

А) Шифр лопатки, реквизиты измерений и статистика по результатам измерений точек, их отклонениям и др.

Б) Результаты измерений всех точек пера, их отклонений в задаваемом масштабе с цифровыми величинами смещений профиля относительно чертежного по координатам X, Y и углового разворота

В) Трехмерные профилограммы поперечных и продольных сечений поверхности пера и хвостовика

Г) Двумерные профилограммы в системе координат лопатки с отображением:

- поперечных и продольных сечений поверхности пера и хвостовика с отображением фактического профиля сечения;

- чертежных точек (точек мат. модели) с кружками допуска, цвет которых соответствует величинам отклонений: зеленый - в допуске, желтый - до 2-х допусков, красный - свыше 2-х допусков;

- рассчитанных величин  $C_1, C_2, C_3, C_{\max}$  (с координатами центров);

- рассчитанных величин хорды и угла хорды;

- рассчитанных величин смещений профиля относительно чертежного (по нормали или координатам X, Y) и углов разворота.

- радиусов входных (выходных) кромок с координатами центров;

- углов входа (выхода)  $\beta_1$  ( $\beta_2$ ) профилей сечения, величин  $b_1, b_2$  и др.;

- текстовых протоколов по всем сечениям, чертежным точкам и величинам отклонений и др.

Д) Результаты измерений всех сечений и точек пера (спинки и корыта), их отклонений в задаваемом масштабе с цифровыми величинами смещений профиля относительно чертежного по координатам X, Y и углового разворота (существенно расширенная и улучшенная аналогия отображения отклонений прибора ПОМКЛ по контролируемым точкам).

Лазерная система «ОПТЭЛ-Л» контроля геометрии лопаток ГТД в технологии интеллектуальной поддержки принятия решений

## Графические фотопротоколы

Графическое отображение масштабируется в широких пределах, предоставляется возможность выполнить различные преобразования координат и вычислить параметры профиля.

Система позволяет:

- создавать трехмерные профилограммы измеряемых изделий по заданным сечениям;

- отображать профилограммы и их параметры с различным масштабом, до 1000:1 раз.

Графические результаты могут быть распечатаны в задаваемом пользователем масштабе.

Текстовые протоколы формируются и печатаются в соответствии с заданным пользователем шаблоном.

Данные измерений автоматически сохраняются в памяти компьютера, что позволяет создать базу данных по различным изделиям.

Имеется возможность провести повторные измерения изделий после дополнительных воздействий, в том числе механических нагрузок и пробной эксплуатации.

Автоматическое базирование к координатным осям изделий в зависимости от конкретного исполнения может осуществляться как по базирующим элементам приспособления (эталон - скалки), так и по базовым поверхностям изделия, например, по замку лопатки, а также по эталонным точкам или сечениям профиля пера.

Измерительная система совместима с производственными компьютерными системами (CAD/CAM) и обеспечивает возможность быстрой активной обратной связи.

Результаты измерений могут быть переданы по внутризаводской компьютерной сети.

Оригинальное программное обеспечение позволяет работать с системой без специальной подготовки и содержит всю необходимую справочную информацию.

Управление системой осуществляется с пульта управления оператора, клавиатуры и манипулятора «мышь» компьютера.

Программное обеспечение системы также позволяет проводить универсальные 3D измерения в режиме «Пульт».

## Использование программы статистики

Программа «Статистика» предназначена для анализа результатов измерений параметров лопаток на системах "ОПТЭЛ-Л" и формирования сводных отчетов на основании кратких и полных

протоколов.

Программа разрабатывалась с целью снижения трудоёмкости контрольных операций при просмотре и анализе Протоколов обмера результатов измерений, полученных на "ОПТЭЛ-Л" и оценке возможностей использования отливок (если протоколы для отливок) при дальнейшей механической обработке и необходимости внесения коррекции в управляющих программах (УП) станков.

Также отклонения параметров пера лопатки, полученные в результате механической обработки с целью набора статистики по величине допустимых отклонений параметров пера, которые не влияют на технические характеристики двигателя.

Разработанное программное обеспечение, позволяет выводить статистические данные из Протоколов результатов измерений лопаток, полученных на "ОПТЭЛ-Л", предусмотрена возможность сравнительного анализа, для лопаток одной плавки, протоколов обмера "ОПТЭЛ-Л" отливок лопаток и готовых лопаток.

Параметры статистической оценки для Лопаток рабочих I, Лопаток рабочих II, Лопаток РК1 - РК12 и др. в единой таблице для наглядности:

а) по отклонению точек профиля пера по спинке и корыту от теоретического их положения (по нормали к профилю) на выбор пользователя:

среднее значение по сечению

минимальное максимальное значение по сечению

б) по Смах

в) по С1 - толщине входной кромки

г) по С2 - толщине выходной кромки

д) по L - длине профиля пера

е) по смещению координатных осей пера в направлении оси X

ж) по смещению координатных осей пера в направлении оси Y

и) по развороту профиля пера в контролируемых сечениях относительно корневого сечения.

#### Сортировка партии измерений по одному параметру.

Предусмотрена возможность группировки лопаток в группы с объединяющим их признаком - принадлежность к одному и тому же допускному интервалу (назначенному технологом) на выбранный параметр пера лопатки. Каждая из групп может быть окрашена в свой определённый цвет.

Обеспечена возможность создания и использования статистических данных и проведения сравнительного анализа за любой выбранный период времени.

Оператор на свое усмотрение может выбрать любой параметр сечений пера лопаток для сортировки:

Смах – максимальная толщина

VII Всероссийская научная конференция "Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений", Уфа-Ставрополь-Ханты-Мансийск, Россия, 2019

С1 - толщина входной кромки

С2 - толщина выходной кромки

L - длина профиля пера

В1 – расстояние до входной кромки

В2 – расстояние до выходной кромки

Смещение профиля по оси OX

Смещение профиля по оси OY

Разворот профиля сечений пера лопатки.

При сортировке используется анализ полных протоколов результатов измерений на системе "ОПТЭЛ-Л".

№ лопатки	Сечение	Отклонения точек профиля пера			Смах	СмахX	СмахY	Разворот	C1	C2	B1	B2	R1
		Средн	Мин	Макс									
3441 19-10-кратное, отливка	A2-A2	0.0010	0.0410	0.0250	0.0060	-0.0097	-0.006	-0.036	0.2670	-0.008	-0.007	0°	0°
3441 19-11-кратное, отливка	A4-A4	0.0030	0.0710	0.0670	0.0090	-0.07	-0.061	-0.07	0° 14' 10"	0.014	0.006	0°	0°
3441 19-12-кратное, отливка	AS-A5	0.0010	0.0360	0.0240	0.0020	0.054	-0.006	-0.024	0° 16' 10"	0.042	0.002	0°	0°
3441 19-13-кратное, отливка	A7-A7	0.0030	0.0190	0.0260	0.0040	0.0023	-0.000	0.012	0° 16' 10"	0.061	0.042	0°	0°
3441 19-14-кратное, отливка													
3441 19-15-кратное, отливка													
3441 19-16-кратное, отливка													
3441 19-17-кратное, отливка													
3441 19-18-кратное, отливка													
3441 19-19-кратное, отливка													
3441 19-20-кратное, отливка													
3441 19-21-кратное, отливка													
3441 19-22-кратное, отливка													
3441 19-23-кратное, отливка													
Среднее		0.0030	0.0216	0.041	-0.012	-0.0261	0° 11' 48"	0.032	0.016	0.006	0.006	0°	0°

Рис. 2. Результат работы программы статистики

#### Выполнение «припасовки»

На практике всегда имеются отклонения фактических точек вследствие неточного его изготовления. Нужно правильно оценить результаты измерений и определить степень годности или брака измеренных профилей детали относительно чертежных значений профилей. Есть допуск на отклонения фактических точек профиля поверхности 3D детали. Также есть допуск на смещения образа детали вдоль осей OX, OY и поворота детали вокруг осей OX, OZ.

Отсюда нужно правильно, как бы вписать, идеальную деталь в фактическую и оценить результаты отклонения фактических точек профиля поверхности 3D детали от идеальной 3D детали. И выдать в виде протоколов отклонения фактических точек профиля поверхности 3D детали за поле допуска. Это и есть операция «припасовки». Или по английски – best-fitting.

По величинам смещений и разворотов отклонений по контрольным точкам всех измеренных сечений пера лопатки далее ясно, как следует скорректировать технический процесс изготовления лопатки, чтобы последующие лопатки имели профиль пера полностью в допуске.

Возникает задача «припасовки» – максимально возможное совмещение профилей детали с чертежом путем смещения образа детали вдоль осей OX, OY и поворота детали вокруг осей OX, OZ (рис.2).

Известно, что специализированное программное обеспечение (СПО) некоторых координатно-измерительных машин (КИМ) имеет процедуры «припасовки» (best fit).

Однако алгоритмы и процедуры расчета вычисления смещений и разворотов точек профиля 3D детали, или более коротко - «припасовки», фирмы не раскрывают.

Поэтому пришлось в СПО «ОРТЕЛ-3D» лазерных компьютерных систем «ОПТЭЛ-Л» самим решать задачу «припасовки».

В специализированном программном обеспечении (СПО) «ОРТЕЛ-3D» лазерной компьютерной системы «ОПТЭЛ-Л» для автоматизированного высокопроизводительного контроля геометрии лопаток ГТД результаты измерений геометрии пера лопаток выдаются в нескольких видах:

- а) в виде отклонений чертежных точек (по умолчанию),
- б) с припасовкой отклонений чертежных точек всех сечений по отдельности для минимизации отклонений и максимизации процента выхода годных точек профиля,
- в) с припасовкой отклонений всех профилей сечений вместе как «единое тело» для заданных оператором 2х или более сечений. Здесь смещения профилей сечений вдоль осей X и Y задается едиными для всех сечений. Развороты профилей сечений относительно осей также задаются едиными для всех сечений.

Режим б) дает максимальный процент выхода годных точек профиля и удобен для технологов для оптимизации процесса производства лопаток.

Режим в) нужен для некоторых видов лопаток.

В СПО имеются 2 режима расчета вычисления смещений и разворотов точек профиля пера.

Системы «ОПТЭЛ-Л», в отличие от КИМ позволяют контролировать в режиме припасовки:

- смещения по осям координат X и Y;
- угол разворота.

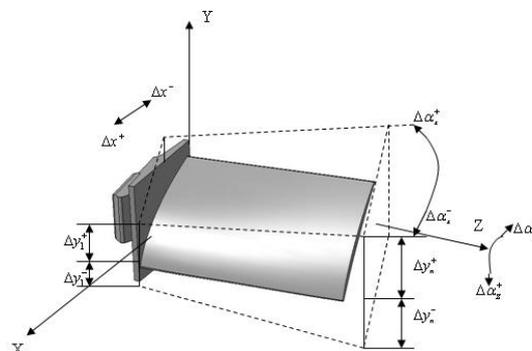
В новой версии специализированного программного обеспечения (СПО) «ОРТЕЛ-3D» имеется режим припасовки «сечения по отдельности» и как «твердое тело».

Припасовка в режиме «твердого тела» производится путем смещения по осям 0X, 0Y, поворота относительно осей 0X, 0Z таким образом, чтобы максимизировать число точек в допуске (рис. 2).

Припасовка лопатки в режиме «твердого тела» производится в ручном и автоматическом режимах.

В СПО можно реализовать припасовку в режиме «сечения по отдельности»:

- реализовать смещение профиля сечений по отдельности по оси X,
- по оси Y,
- поворота профиля сечений по отдельности относительно оси 0Z.



**Рис. 3. Задание допусков на смещение и поворот профилей сечений пера для режима припасовки «твердого тела»**

Реализовать припасовку в режиме «твердого тела»:

- смещение профиля по оси X,
- смещение профиля по оси Y,
- поворот всех профилей сечений вместе относительно оси 0Z,
- поворот профилей сечений вместе относительно оси 0X,
- отменить сделанные изменения припасовки в режиме «твердого тела».

### Выводы

Разработаны и производятся новые высокопроизводительные лазерные компьютерные системы "ОПТЭЛ-Л" обеспечивающие контроль основных элементов газо-воздушного тракта ГТД с регистрацией результатов в памяти компьютера:

- 1) отдельных лопаток и технологической оснастки для их изготовления
- 2) лопаточных решеток в сборе (рабочих колес и направляющих аппаратов) с предварительной оптимальной программной раскладкой лопаток по комплектам лопаточных решеток.

Системы "ОПТЭЛ-Л" позволяют комплексно контролировать все стадии технологических процессов изготовления основных элементов ГТД, начиная с исходных заготовок до выходного контроля газо-воздушного тракта - готовых лопаточных решеток ГТД с созданием базы данных по ступеням и в целом ГТД [ 1 - 5].

Бесконтактные измерения тысяч точек сечения изделия за 1 - 3 секунды обеспечивают

производительность до 100-200 лопаток в час и 100 % контроль изделий.

Новые версии систем "ОПТЭЛ-Л" позволяют комплексно контролировать все стадии трудоемких тех. процессов изготовления газоздушного тракта ГТД и его основных узлов, начиная с исходной заготовки с различными припусками, в процессе доводки, выходном и входном контроле готовых роторов и статоров ГТД.

Впервые создана и внедрена в производство ГТД партия уникальных отечественных лазерных компьютерных систем "ОПТЭЛ-Л", отвечающая всем современным требованиям авиамоторного производства и машиностроения.

Высокая эффективность систем "ОПТЭЛ-Л" подтверждается многолетним опытом использования на ряде ведущих авиамоторных предприятиях.

### Список используемых источников

1. Аэродинамика решеток турбомашин / Гостелуо Дж.: пер. с англ.- М.: Мир", 1987. – 392 с., ил.
2. Cardew-Hall M., Cosmas J., Ristic M. Automated Proof Inspection of Turbine Blades // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 3(2), 1988, IFC Publications, p.p. 67-88
3. Вермель В.Д., Забалуев В.Ф., Николаев П.М., Геометрическое обеспечение оценки точности изготовления изделий сложной формы по материалам измерений на программируемых КИМ // Труды ЦАГИ, Выпуск 2555, Москва, 1994.
4. Хабибуллин М.Г., Фирсов А.Г., Проблемы технологии изготовления малоразмерных сложнопрофильных лопаток компрессора ГТД нового поколения // журнал "Авиационная техника", N4, 1998 г.
5. Гейкин В.А., Совершенство двигателя определяется совершенством технологий // научно-технический журнал «Двигатель», № 6, 2003г.
6. Galiulin R.M., Yuri V. Chugui, Sergey N. Bagaev, Albert Weckenmann, P.Herbert Osanna "Optoelectronic computer-aided measuring "OPTEL" systems" // 7-th International Symposium on Laser Metrology applied to Science, Industry and Everyday Life, Eds, Proceedings of SPIE, 2002, Vol. 4900, pp. 486-496, Bellingham, USA
7. Galiulin Rav.M., Galiulin Rish.M., and others, "Computer-aided laser-optoelectronic "OPTEL" 3-D measurement systems of complex-shaped object geometry" // Proc.SPIE 2713, Editors: V.Panchenko, V.Golubev, Bellingham, USA, Vol.2713, 1996, pp. 363-369
8. Галиулин Р.М. и др. «Компьютерные лазерно-оптоэлектронные системы измерений геометрии изделий сложной формы "ОПТЭЛ" // "Авиационная техника. Известия вузов", N1, 1997 г., с. 100-106.
9. Galiulin R.M. and others, "Optoelectronic computer-aided systems for three-dimensional inspection of complex objects" // in Machine Vision and Three-Dimensional Imaging Systems for Inspection and Metrology, Kevin G. Harding, John W.V. Miller, Bruce G. Batchelor, Editors, Proceedings of SPIE, Bellingham, USA, Vol.4189, 2001, pp. 268-275
10. Galiulin R.M. and others, "Optoelectronic computer-aided systems for inspection of GTE complex objects" // Proceedings of SPIE (Vol. 4900), pp. 178-184
11. Galiulin R.M. and others, "Optoelectronic computer-aided inspection of blade mounting parameters" // Proceedings of SPIE (Vol. 4900), pp. 649-653
12. Galiulin Rav.M., and others. Laser Computer-Aided Systems for GTE Gas-Air Track Elements Inspection // Proceedings of the 2nd International Workshop on Computer Science and Information Technologies, USATU Publishers, Ufa: Russia, 2000, pp. 70-75.
13. Galiulin R.M., "Optoelectronic computer-aided measuring "OPTEL" systems" // in 7-th International Symposium on Laser Metrology applied to Science, Industry and Everyday Life, Yuri V. Chugui, Sergey N. Bagaev, Albert Weckenmann, P.Herbert Osanna, Eds, Proceedings of SPIE (Vol. 4900), pp. 486-496, Bellingham, USA, 2002
14. Галиулин Р.М., «Оптоэлектронные системы для размерного контроля изделий сложной формы» // журнал "Автометрия", Изд-во СО РАН, N 5, том 40, 2004, с. 26-37
15. Галиулин Р.М., Барлыбаев Р.Х. Особенности оценки результатов измерений профиля поверхности 3D деталей в лазерных автоматизированных системах «ОПТЭЛ» // Электронное научное издание «Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке», 2015, с. 278-280.
16. Сравнение результатов контроля заготовки лопатки на системе «ОПТЭЛ-КЛ» и КИМ «SCIROCCO», 2019,  
URL: [http://nvp-optel.ru/downloads/Sravnitelnaya\\_otsenka.pdf](http://nvp-optel.ru/downloads/Sravnitelnaya_otsenka.pdf) (дата обращения: 27.02.2019).