

АО «НПО Лавочкина»,  
Московская область,  
г. Химки

Омский государственный  
технический университет,  
г. Омск

## ВОПРОСЫ ПОСТРОЕНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПРИБОРОВ АКТИВНОГО КОНТРОЛЯ ЛИНЕЙНЫХ И УГЛОВЫХ РАЗМЕРОВ ИЗДЕЛИЙ И ИХ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТИ

Статья посвящена построению современных приборов активного контроля (ПАК), которые, помимо традиционных измерений линейных размеров изделий, также обладают возможностями измерения угловых размеров изделий и измерений их формы поверхности. В статье проведен метрологический анализ для измерения линейных и угловых размеров изделий.

Рассмотрены схемы ПАК с непрозрачным и прозрачными наконечниками, последние из которых, выполненные из сапфира, позволяют осуществить регистрацию изображений движущегося изделия. Обсуждаются вопросы передачи изображений изделий с учетом максимума разрешающей способности при их регистрации, оценки ударной прочности регистраторов изображений, частотных параметров для уменьшения смазывания.

**Ключевые слова:** прибор активного контроля, сапфировый наконечник, триангуляционный датчик, угловой размер, линейный размер.

**Введение.** Использование приборов активного контроля (ПАК) размеров изделий при их производстве на металлорежущих станках позволяет повысить производительность труда до 100 % и более в ракетно-космической отрасли, приборо-, машино- и станкостроении.

Одно из направлений совершенствования современных ПАК связано с расширением их функциональных возможностей за счет измерений угловых размеров изделий и визуализации изображений обрабатываемого изделия [1]. Актуальность этого определяется необходимостью активного контроля конусности изделий режущего инструмента, резбовых и других подобных изделий, который может быть обеспечен за счет использования поворачивающихся измерительных наконечников (в дальнейшем — наконечники). Данная статья посвящена таким устройствам на примере одноконтактных ПАК линейных и угловых размеров изделий на круглошлифовальных станках.

**1. Классификация ПАК с возможностями угловых измерений.** Конструкции ПАК с возможностями угловых измерений можно разделить на несколько типов в зависимости от следующих особенностей:

— от степени пропускания материала наконечника оптического излучения ближнего инфракрасного (ИК) излучения: непрозрачный или прозрачный;

— от числа осей вращения: с одной, двумя или тремя осями вращения;

— от схемы установки наконечника: на кардановом подвесе, подобно механическим гироскопам, или на шарнирной опоре;

— от места установки регистратора: с установкой регистратора на наконечник или вне его;

— от способа реализации вращения вокруг третьей оси: за счет поворота изображения изделия относительно неподвижного регистратора или наоборот.

Данная статья посвящена обсуждению этих особенностей ПАК.

**2. ПАК с непрозрачным наконечником с возможностью поворотов вокруг одной оси вращения.** Данный тип ПАК может использоваться для контроля линейных размеров и конусности изделий. Его состав, принцип действия и метрологический анализ представлены ниже.

**2.1. Состав и принцип действия.** Устройство (рис. 1) включает непрозрачный наконечник 1, измерительный стержень 2, линейный привод 3 с возможностью фрикционного проскальзывания, триангуляционный датчик линейных перемещений 4, работающий с входным 5 и отраженным 6 оптическими потоками (в дальнейшем — потоки), датчик угловых перемещений (энкодер) 7, связанный с валом наконечника 1 гибким тросиком

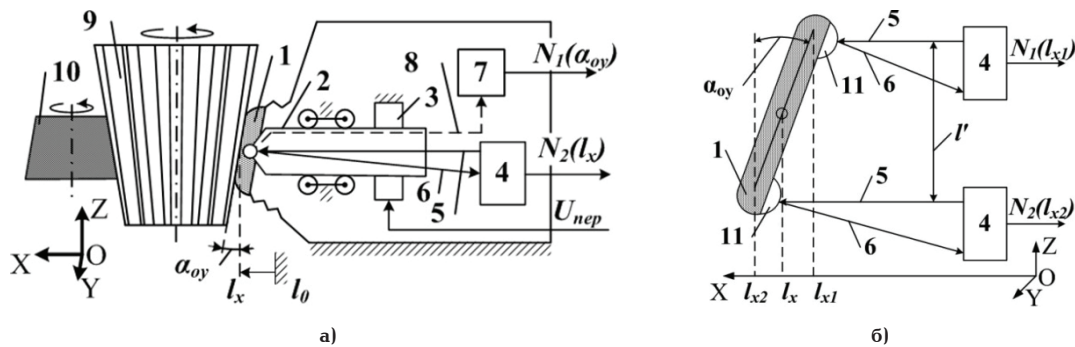


Рис. 1. Схема ПАК с непрозрачным наконечником с возможностью поворотов вокруг оси  $OY$  с двумя способами измерений линейных и угловых перемещений за счет использования: по одному датчику линейных и угловых перемещений (а), наконечника рычажного типа и двух одинаковых датчиков линейных перемещений (б)



Рис. 2. Непрозрачный поворачиваемый наконечник (а) и часть опытного образца ПАК при измерении угловых размеров изделия (б)

8 (показан пунктирно). В процессе работы изделие 9 обрабатывается шлифовальным кругом 10. Для создания отраженного потока 6 от входного потока 5 датчика линейных перемещений 4 используется калиброванная поверхность вала (рис. 1а) или дополнительно устанавливаемых на наконечник 1 одного или двух отражателей 11 (рис. 1б).

В процессе обработки вращающееся изделие 9 доводится до нужного размера путем съема лишнего металла шлифовальным кругом 10 (рис. 1а). При подведении по сигналу  $U_{неp}$  линейным приводом 3 измерительного стержня 2 к изделию 9 и началу контактирования наконечник 1 вынужденно поворачивается вокруг оси  $OY$ , занимая положение по касательной к нему, а возникающее угловое перемещение  $\alpha_{oy}$  наконечника 1 передается гибким тросиком 8 энкодеру 7 с формированием на его выходе сигнала  $N_1(\alpha_{oy})$ .

Линейные перемещения  $l_x$  наконечника 1 и соответственно поверхности вала, освещенные входным оптическим потоком 5 триангуляционного датчика линейных перемещений 4, приводят к смещениям отраженного оптического потока 6 в виде т.н. светового «зайчика» и регистрируются с формированием выходного цифрового сигнала  $N_2(l_x)$ .

В процессе обработки вращающегося изделия 9 с впадинами и выступами с т.н. прерывистой поверхностью непрозрачный наконечник 1 будет совершать возвратно-поступательные движения:

- прямые движения во впадину между выступами изделия 9 от линейного привода 3;
- обратные движения назад под выталкивающим воздействием каждого выступа с фрикционным проскальзыванием в линейном приводе 3.

В результате таких движений непрозрачного наконечника 1 формируется выходной сигнал  $N_2(l_x)$ , становится импульсным, а по измерениям его мак-

симула судят о высоте каждого выступа  $l_x$  и по их совокупности определяют текущий размер изделия 9. При этом по значению  $N_1(\alpha_{oy})$  для каждого импульса судят о текущем значении конусности профиля. Общий вид узлов опытного экземпляра такого ПАК представлен на рис. 2.

**2.2. Точность измерений.** Для измерения линейных  $l_x$  и угловых  $\alpha_{oy}$  смещений наконечника ПАК перспективно применение лазерного датчика линейных перемещений РФ603-15/2 триангуляционного принципа действия производства ф. РИФ-ТЭК (Белоруссия) с погрешностью  $\Delta l_{рф} = \pm 1$  мкм [2] и датчика угловых перемещений ЛИР-ДА190 производства СКБ ИС (Россия) с погрешностью  $\Delta \alpha_{лиp} = \pm 3,5''$  [3]. Измерения можно осуществить двумя способами с разным сочетанием датчиков:

1) по одному датчику линейных и угловых измерений (рис. 1а) с погрешностями измерений отменно для  $\Delta l_x$  и  $\Delta \alpha_{oy} - (\pm 1$  мкм;  $\pm 3,5''$ );

2) двумя одинаковыми датчиками линейных перемещений с измерением двух координат  $l_{x1}$  и  $l_{x2}$  двух торцов рычажного наконечника (рис. 1б) и последующим расчетом искомых значений  $l_x$  и  $\alpha_{oy}$  согласно системе уравнений:

$$\begin{cases} l_x = \frac{l_{x2} + l_{x1}}{2}; \\ \alpha_{oy} = \arctg \frac{l_{x2} - l_{x1}}{l'} \end{cases} \quad (1)$$

где  $l'$  — расстояние между освещающими потоками лазерных датчиков (для расчетов принимается  $l' = 10$  мм).

Рассчитаем погрешности измерений для второго способа измерений по системе уравнений (1) с двумя одинаковыми датчиками линейных перемещений.

Функция  $\operatorname{arctg} z$  раскладывается в сходящийся ряд с суммой его членов, равной  $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \cdot z^{2n+1}}{2n+1}$  при условии  $|z| \leq 1$  и  $z \neq i, -i$ , записываемый в следующем виде:  $z - \frac{z^3}{3} + \frac{z^5}{5} - \frac{z^7}{7} + \dots$ . Для малых углов в диапазоне не более  $\pm 15^\circ$ , т.е.  $\approx \pm 0,25$  рад значение этого ряда определяет в основном его первый член, позволяя записать  $\operatorname{arctg} z \approx z$  и преобразовать систему уравнений (1) к виду:

$$\begin{cases} I_x = \frac{I_{x2} + I_{x1}}{2}; \\ \alpha_{oy} \approx \frac{I_{x2} - I_{x1}}{I'} \end{cases} \quad (2)$$

При использовании двух одинаковых датчиков линейных перемещений алгебраическое сложение их погрешностей  $\Delta I_{x2}$  и  $\Delta I_{x1}$  для двуплечего наконечника не совсем корректно из-за их разного влияния на  $\Delta I_x$  и  $\Delta \alpha_{oy}$ . Поэтому, сложив эти погрешности  $\Delta I_{x2}$  и  $\Delta I_{x1}$  геометрически и с учетом того, что  $\Delta I_{x2} = \Delta I_{x1} = \Delta I_{p\phi}$ , можно записать следующую систему выражений:

$$\begin{cases} \Delta I_x = \frac{1}{2} \sqrt{(\Delta I_{x2})^2 + (\Delta I_{x1})^2}; \\ \Delta \alpha_{oy} = \frac{1}{I'} \sqrt{(\Delta I_{x2})^2 + (\Delta I_{x1})^2} \end{cases} = \begin{cases} \Delta I_x = \frac{\Delta I_{p\phi}}{\sqrt{2}} = \pm 0,7 \text{ мкм}; \\ \Delta \alpha_{oy} = \frac{\sqrt{2} \cdot \Delta I_{p\phi}}{I'} \approx \pm 28,8'' \end{cases} \quad (3)$$

Расчеты, проведенные в соответствии с системой уравнений (3), позволяют получить погрешности, записанные в виде  $(\Delta I_x; \Delta \alpha_{oy}) = (\pm 0,7 \text{ мкм}; \pm 28,8'')$ , которые можно сравнить с вышеуказанными значениями для первого способа измерений ( $\pm 1 \text{ мкм}; \pm 3,5''$ ). Как видно, некоторое упрощение конструкции за счет использования двух одинаковых датчиков линейных перемещений снижает погрешность измерения линейных перемещений  $\Delta I_x$  почти в 1,5 раза ценой увеличения погрешности измерения угловых перемещений  $\Delta \alpha_{oy}$  более чем в 8 раз. Тем не менее в зависимости от предъявляемых требований к погрешностям измерений ( $\Delta I_x; \Delta \alpha_{oy}$ ) и другим параметрам должен быть выбран первый или второй способ измерения линейных и угловых перемещений.

**3. ПАК с сапфировыми наконечниками, поворачивающимися вокруг двух или трех осей вращения.** Дальнейшее развитие ПАК связано с возможностями поворотов вокруг одной, двух или трех осей высокопрочных и прозрачных наконечников, например, из сапфира, реализующих оптические методы регистрации изображений поверхности изделий и её пирометрические (тепловизионные) измерения температуры для корректировки результатов размерных измерений.

Возможность практического использования сапфировых наконечников подтверждена расчетами и экспериментальными исследованиями [4–7]. Было показано, что при механическом контактировании сапфирового наконечника с изделиями с прерывистой поверхностью имеется почти 30-кратный запас прочности. Также было выявлено, что для устранения причин возникновения па-

разитного диффузного рассеяния, вносимого шероховатой поверхностью, необходимо выполнение условия  $\lambda \geq 0,9 \text{ мкм}$ , где  $\lambda$  — длина волны.

Кроме того, в связи с изменениями температуры изделия в процессе обработки в диапазоне от  $20^\circ \text{C}$  до  $450^\circ \text{C}$ , соответствующего диапазону длин волн в диапазоне  $\Delta \lambda_l \sim 1,0 \dots 1,6 \text{ мкм}$ , и для исключения взаимного влияния результатов «размерных» и пирометрических измерений друг на друга, было предложено [8] осуществлять спектральное разделение оптических потоков

$$\begin{cases} 2,0 \text{ мкм} \leq \Delta \lambda_l \leq 2,6 \text{ мкм}; \\ 1,0 \text{ мкм} \leq \Delta \lambda_l \leq 1,6 \text{ мкм} \end{cases} \quad (4)$$

или частотное разделение за счет амплитудной модуляции оптического потока с частотой  $f_{ocb}$ , кратной  $f_{ocb} = knN$ , где  $n$  — число зубьев изделия,  $N$  — число оборотов в секунду,  $k$  — коэффициент пропорциональности, определяющий кратное превышение  $f_{ocb}$  над  $N$  с рекомендуемыми значениями, начиная с 3–5.

Возможности поворотов наконечников могут быть реализованы за счет применения карданного подвеса как в гироскопной рамке (рис. 3а, б) или шаровой опоры (рис. 3в). При этом в зависимости от установки регистратора конструкции ПАК могут быть выполнены двумя вариантами (рис. 4):

*регистратор установлен на наконечник с возможностью поворотов вокруг оси OZ*

1) регистратор 1 установлен фронтально на сапфировом наконечнике 2 (освещающий излучатель 3 закреплен сбоку), поворачиваемом приводом 4 по сигналу  $U_{bp}$  (рис. 4а, б);

*регистратор установлен вне наконечника с передачей изображений изделия*

2) регистратор 1 вынесен за пределы наконечника и измерительного стержня с передачей изображения к нему гибким волоконно-оптическим жгутом (ВО-жгут) 5, размещенным внутри измерительного стержня. При этом его входной конец фронтально присоединен к сапфировому наконечнику 2, а выходной, механически связанный с приводом 6, поворачивается им относительно неподвижного регистратора 1 по сигналу  $U_{bp}$  (рис. 4в);

3) между поворачиваемым сигналом  $U_{bp}$  регистратором 1 и сапфировым наконечником 2 внутри измерительного стержня установлена оптическая схема 7, выполненная в виде жесткого эндоскопа диаметром до 10 мм (рис. 4г).

Для первой схемы ПАК критичными параметрами является ударопрочность регистратора, который, будучи установленным на наконечник, должен выдерживать ударные нагрузки от выступов изделия, как правило, на уровне не более 3 Н с частотами до 100 Гц [5, 8].

Ограничениями второй схемы ПАК является мо- заичность и дефекты структуры ВО-жгута, методы минимизации которых представлены далее.

В третьей схеме оптимально сочетаются такие параметры как разрешающая способность, простота конструкции и минимальная масса измерительного наконечника (с учетом измерительного стержня).

Повороты наконечника вокруг оси OX (рис. 3б, в) или изображения изделия (для второй и третьей схемы ПАК, рис. 4в, г) перспективны в основном для уменьшения искажений при регистрации изображений изделий с реализацией технологии временной задержки накопления (ВЗН) [9] за счет обеспечения сонаправленности строк регистратора

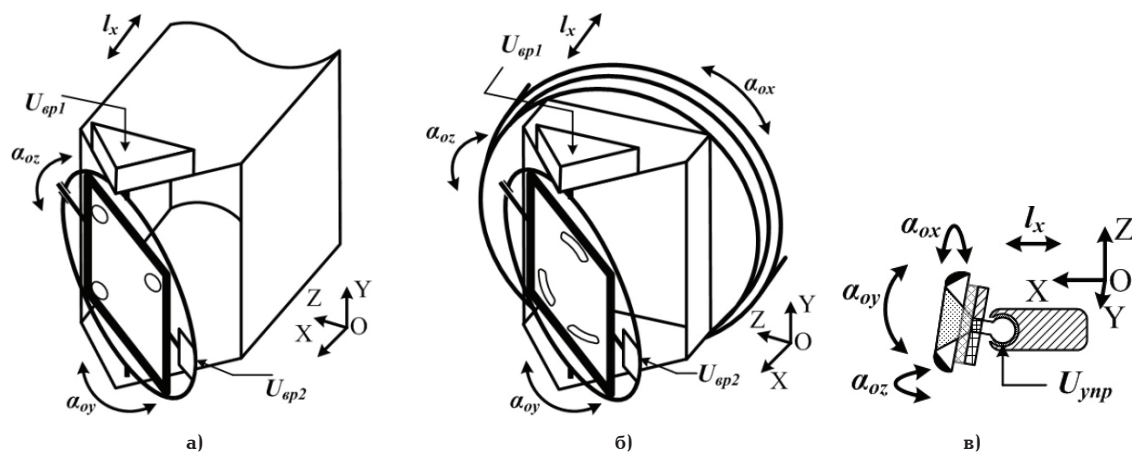


Рис. 3. Варианты реализации возможностей поворотов наконечников: при использовании карданного подвеса (а, б) или шаровой опоры (в)

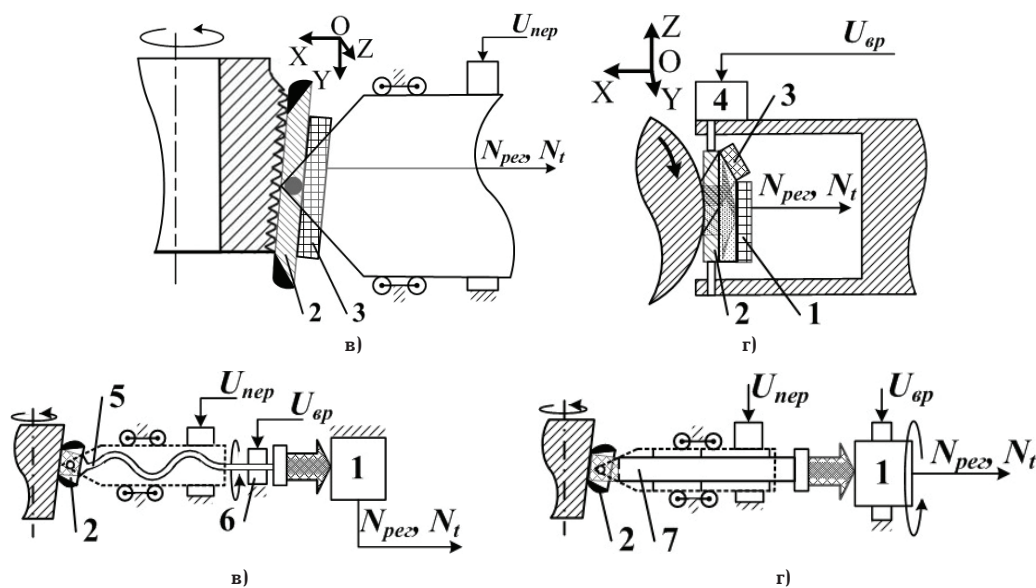


Рис. 4. Варианты размещения регистратора: на наконечнике (а, б) с вынесенным регистратором и передачей изображения изделия гибким ВО-жгутом (в) и оптической системой в виде жесткого эндоскопа (г)

с касательной изображений частей изделия. Это показано на примере оптического контроля параметров режущих кромок сверл с поворотами наконечника вокруг оси ОХ (рис. 5).

**4. Методы и средства обеспечения высоких тактико-технических характеристик многофункциональных ПАК.** Максимально эффективное применение многофункциональных ПАК для решения широкого круга измерительных задач предполагает возможность достижения аппаратными и программными средствами лучших значений метрологических, прочностных и динамических характеристик, которые рассмотрены далее.

**4.1. Минимизация влияния мозаичности и дефектов структуры на изображения изделий, вносимых ВО-жгутом.** Использование ВО-жгута с возможностями передачи и поворота изображения для неподвижного регистратора неизбежно вносит ограничения разрешающей способности из-за неизбежных мозаичности и дефектов структуры. Эти ограничения могут рассматриваться как фильтр пространственных частот, наложенный на потенциально высокую разрешающую способность волоконной структуры. При этом разрешающая способ-

ность  $R_{\text{вож}}$  ВО-жгута на основе стандартных круглых волокон, измеряемая числом линий на миллиметр, согласно теореме Котельникова, определяется выражением [10, 11]:

$$v_n = \frac{1}{2\text{Ш}} = \frac{1}{2D} = \frac{1}{2(D_c + \delta)}, \quad (5)$$

где  $\text{Ш} = D_c + 2\delta$  — шаг (период) структуры укладки круглых волокон, равный минимальному расстоянию между их центрами,  $D_c$  и  $\delta$  — диаметр сердцевин и толщина оболочки волокон.

Если в ВО-жгуте однородная квадратная укладка, то  $\text{Ш} = D$  и  $R_{\text{вож}} = 0,5D^{-1}$ , а при гексагональной  $\text{Ш} = 0,87D$  и  $R_{\text{вож}} = 0,57D^{-1}$ , т.е. на 15 % выше.

Экспериментальные исследования [10] показывают, что разрешающая способность при гексагональной укладке круглых волокон близка к максимальной, приближаясь к 50 линий/мм. Повышение разрешающей способности передаваемого изображения за счет устранения мозаичности и влияния дефектов структуры волокон достигается следующим образом:

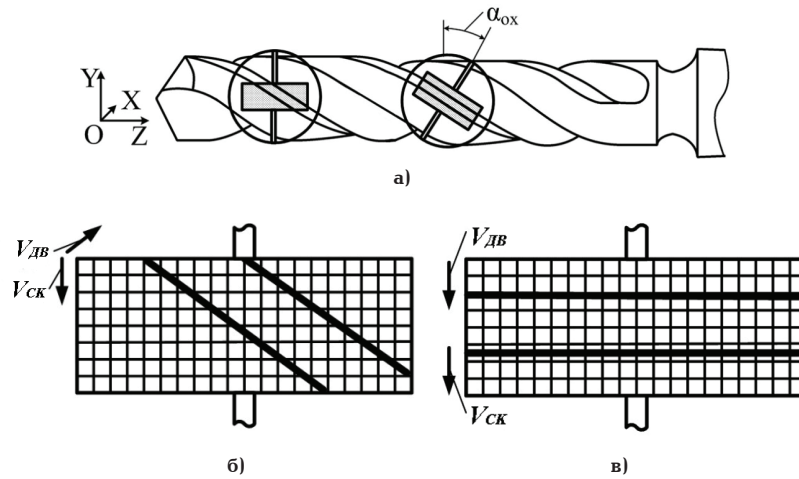


Рис. 5. Контроль геометрических параметров режущей кромки сверла (а) двумя способами: с горизонтальным положением строк регистратора (б), с поворотом изображения изделия на угол  $\alpha_{ox}$  и реализации технологии временной задержки накопления (в)

— до 2,44 раза (до 120 линий/мм или  $R_{вож} \approx 8,1$  мкм) применение сканирующих устройств на входе и выходе волоконной детали или сканированием изображения движущимся пучком световодов [11], например, при синхронных возвратно-поперечных или циркулярных смещениях амплитудой до 4–5 диаметров волокон входного и выходного торцов ВО-жгута;

— более 2,5–3 раз (до 150 линий/мм или  $R_{вож} \approx 6,6$  мкм) за счет спектрального разложения излучения каждого элемента объекта на входе волоконного пучка и свертывание спектра на выходе из пучка [12, 13].

4.2. Сравнение разрешающей способности ПАК с передачей изображения ВО-жгутом и оптической схемой. Достоинство ВО-жгута в виде гибкости при использовании в ПАК путем прикреплению его входного торца к поворачивающемуся наконечнику позволяет достичь фронтального обзора изделия без изменений размеров его изображения. Однако его мозаичность и дефекты структуры ограничивают разрешающую способность  $R_{вож}$  до вышеуказанных значений.

Предел разрешающей способности оптических схем  $R_{oc}$ , рассчитанный немецким физиком Гельмгольцем Г. еще в 1874 г., записывается формулой

$$R_{oc} = \frac{0,61\lambda}{n \sin \beta}, \text{ где } n \text{ — показатель преломления, } \beta \text{ —}$$

апертурный угол. Но при использовании в ПАК значение  $R_{oc}$  снижается от уменьшения размеров передаваемого изображения изделия, вызванным его поворотом отдельно по осям ОУ, ОZ и суммарного по обеим осям  $R_{oy}$ ,  $R_{oz}$  и  $R_{oc}$ , связанного с первыми геометрическим сложением, соответственно:

$$\begin{cases} R_{oy} = R_{oc} \cos \alpha_{oy}; \\ R_{oz} = R_{oc} \cos \alpha_{oz}; \\ R_{oc}' = \sqrt{R_{oy}^2 + R_{oz}^2}. \end{cases} \quad (6)$$

Для равных углов поворота наконечника  $\alpha_{oy} = \alpha_{oz} = \alpha$  третье выражение системы уравнений (6) приобретает вид:  $R_{oc}' = \sqrt{2} R_{oc} \cos \alpha$ . И для оценки превышения разрешающих способностей ПАК с оптической схемой над ВО-жгутом найдем отношение  $R_{oc}$  к  $R_{вож}$ :

$$K = \frac{R_{oc}'}{R_{вож}} = \frac{0,61\sqrt{2}\lambda \cos \alpha}{n R_{вож} \sin \beta}. \quad (7)$$

И тогда для  $\alpha_{oy} = \alpha_{oz} = \alpha = 15^\circ$  и  $\cos \alpha = 0,966$  в воздухе с  $n=1$  с линзами, у которых  $\beta \approx 70^\circ$  и  $\sin \beta = 0,94$ , для излучения с длиной волны  $\lambda \approx 1$  мкм и  $R_{вож} \approx 6,6$  мкм получаем  $K = \frac{1}{7,43} = 0,13$ . Это означает достижение в пределе более высокой разрешающей способности оптической схемы над разрешающей способностью ВО-жгута с учетом вышеуказанных особенностей применения в ПАК почти в 7,5 раза.

4.3. Ударная прочность регистраторов. Помимо высокой ударной прочности сапфировых наконечников аналогичное требование также важно и для регистраторов при их установке на наконечнике. Известно [1, 5], что максимальное усилие, достигаемое при контактных измерениях с прерывистыми поверхностями не должно превышать 3 Н. С учетом современных технологий минимальную суммарную массу сапфирового наконечника с закрепленным на нем регистратором, отражателями и измерительным стержнем можно снизить до  $\approx 0,050$  кг, получая максимальное ускорение на уровне 60 м/с<sup>2</sup> или  $\approx 6g$ . Это значение не является критичным, т.к. для электронных систем уже достигнут существенно более высокий уровень пиковой перегрузки, вплоть до 100000 g с уровнями вибрации до  $\pm 20g$  [14, 15].

4.4. Регистрация быстро движущихся изображений с уменьшением смазывания. Помимо сонаправленности строк регистратора касательным частям контролируемого изделия, уменьшение смазывания изображения с режимом ВЗН связано с синхронизацией процесса сканирования строк ПЗС-матрицы регистратора и движения изделия.

При этом время сканирования его одной строки с числом пикселей  $Q$  не должно превысить линейное смещение  $l_{cm}$  поверхности круглого изделия радиусом  $r_{изг}'$  равного размеру одного пикселя  $l_{пикс}'$ :  $l_{cm} = l_{пикс}'$ . Такое условие позволяет сформировать уравнение, связывающее частоту опроса одной ячейки  $f$  ПЗС-матрицы с параметрами движения изделия:

$$f = \frac{2\pi N Q r_{usz}}{l_{пикс}} , \quad (8)$$

где  $N$  — число оборотов в секунду вращающегося изделия,

Для  $r_{usz} = 10$  мм,  $N = 600$  об/мин для ПЗС-матрицы регистратора длиной 20 мм с размерами пикселя  $l_{пикс} = 10$  мкм и  $Q = 2000$  после расчетов получается значение  $f = 120$  МГц. Это значение является вполне приемлемым.

#### 4.5. Реконструкция искаженных изображений.

Применение режима ВЗН при регистрации изображений быстро движущихся изображений изделий может не полностью исключить его смазывание из-за неполной сонаправленности строк и касательной частей изделия, ее непрямолинейной формы, влияния вибраций станка и/или ПАК и т.п.

Поэтому восстановление искаженных изображений изделий из-за смазывания, дефокусирования и зашумления математико-компьютерными методами является важной задачей для корректировки изображения. Обычно для этого используются [16] набор одномерных интегральных уравнений Вольтера I рода:

$$\begin{aligned} (1/\Delta) \int_x^{x+\Delta} w_y(\xi) d\xi = g_y(x) + \delta g, \\ a \leq x \leq b, \quad c \leq y \leq d, \end{aligned} \quad (9)$$

или Фредгольма I рода типа свертки:

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} h(x - \xi) w_y(\xi) d\xi = g_y(x) + \delta g, \\ a \leq x \leq b, \quad c \leq y \leq d, \end{aligned} \quad (10)$$

или порой двумерные интегральные уравнения Фредгольма I рода типа свертки:

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x - \xi, y - \eta) w(\xi, \eta) d\xi d\eta = g(x, y) + \delta g, \\ a \leq x \leq b, \quad c \leq y \leq d, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $\Delta$  — величина смаза,  $h$  — функция рассеяния точки, определяющая характер искажения точек изображения,  $w$  и  $g$  — распределение интенсивности по неискаженному и искаженному изображениям соответственно,  $\delta g$  — шум.

Для использования в процессе реконструкции смазанных изображений разработаны методики, основанные на методе преобразований Фурье или квадратур с использованием метода регуляризации Тихонова в сочетании со способом «усечение — размытие — поворот», включая быстрые алгоритмы восстановления смазанных изображений [16–18]. Время реализации одного из них при скорости компьютера ~1 млрд оп/с заняло всего ~0,1 с [18]. Использование такого алгоритма при активном контроле изделия на круглошлифовальном станке с числом оборотов 600 об/мин и временем одного оборота, равного 0,1 с, уже позволяет осуществлять восстановление изображения 1 раз за 1 оборот в режиме **online**.

При этом потенциал алгоритма уже позволяет сократить время реализации при использовании параллельных вычислений по строкам [18]. Создание более быстрых алгоритмов и использование более быстрых компьютеров создает предпосылки для проведения восстановления изображения **online** вероятно до 3–5 раз за один оборот детали и таким

образом успешно контролировать параметры частот контролируемых изделий.

#### Заключение.

1. Угловые измерения при использовании накопителей рычажного типа и двух одинаковых датчиков линейных перемещений снижают до 1,5 раза погрешность линейных измерений при увеличении погрешности угловых измерений.

2. Потенциально достижимая разрешающая способность регистрации изображения изделия при передаче изображения оптической схемой почти в 7,5 раза превышает аналогичный показатель при использовании ВО-жгута.

3. При снижении массы наконечника с закрепленным на нем регистратором, отражателями и измерительным стержнем до  $\approx 0,050$  кг максимальное ускорение при выходе наконечника с впадины на выступ не превысит 6  $g$ , являясь допустимым по ударным нагрузкам для современных электронных устройств и подтверждая практическую реализуемость подобного технического решения.

4. Регистрация быстро движущихся изображений с уменьшением смазывания за счет использования режима временной задержки накопления предполагает частоту опроса ячеек ПЗС-матрицы 120 МГц, подтверждая возможность практической реализации для современного уровня техники.

5. Дополнительное уменьшение искажений при регистрации изображения изделия возможно за счет применения быстрых математико-компьютерных алгоритмов восстановления искаженного изображения от смазывания, дефокусирования и зашумления.

#### Библиографический список

1. Леун Е. В., Леун В. И., Сысоев В. К., Занин К. А., Шулепов А. В., Вятлев П. А. Приборы активного контроля размеров изделий на основе сапфировых измерительных наконечников с тремя степенями свободы // Динамика систем, механизмов и машин. 2017. Т. 5, № 2. С. 144–150. DOI: 10.25206/2310-9793-2017-5-2-144-150.
2. Измерители лазерные триангуляционные. Серия РФ603. Руководство по эксплуатации. RIFTEK. Минск. 2015. URL: [https://riftek.com/media/documents/rf60x/manuals/Laser\\_Triangulation\\_Sensors\\_RF603\\_Series\\_rus.pdf](https://riftek.com/media/documents/rf60x/manuals/Laser_Triangulation_Sensors_RF603_Series_rus.pdf) (дата обращения: 28.12.2017).
3. Абсолютные преобразователи угловых перемещений. Каталог продукции СКБ ИС. СПб. URL: [http://www.skbis.ru/catalog2014/catalog\\_angle\\_abs\\_2014.pdf](http://www.skbis.ru/catalog2014/catalog_angle_abs_2014.pdf) (дата обращения: 28.12.2017).
4. Пат. 2557381 РФ, МПК В24 В49/00, G01 В7/12. Способ активного контроля линейных размеров в процессе обработки изделия и устройство для его реализации / Леун Е. В., Леун А. В. № 2013152692; заявл. 28.11.2013; опубл. 20.07.2015, Бюл. № 20.
5. Леун Е. В. Разработка приборов активного контроля размерных параметров изделий с использованием сапфировых измерительных наконечников // Омский научный вестник. 2016. № 4 (148). С. 123–127.
6. Леун Е. В. Особенности построения перспективных лазерных способов активного контроля размеров изделий // Материалы X Всерос. науч. конф. памяти главного конструктора ПО «Полет» А. С. Клинышкова. Омск, 2016. С. 68–74.
7. Пат. 2603516 РФ, МПК В 24 В 49/04, В 24 В 49/12, В 23 Q 17/20. Способ измерения линейных размеров изделия, выполненного с впадинами и выступами на поверхности / Леун Е. В.; опубл. 27.11.2016, Бюл. № 33.
8. Леун Е. В., Шулепов А. В. Исследование и разработка сапфировых измерительных наконечников для приборов

активного контроля размерных параметров изделий // Омский научный вестник. 2017. № 3 (153). С. 91–95.

9. Петрошенко М., Соломицкий Д. Технологии компании e2v // Компоненты и технологии. 2012. № 11. С. 80–85. URL: [http://www.npk-photonica.ru/images/tehnologii\\_e2v.pdf](http://www.npk-photonica.ru/images/tehnologii_e2v.pdf) (дата обращения: 28.12.2017).

10. Хацевич Т. Н., Михайлов И. О. Эндоскопы. Новосибирск: СГГА, 2002. 196 с.

11. Марков П. И., Кеткович А. А., Саттаров Д. С. Волоконно-оптическая интроскопия. М.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1987. 286 с.

12. Михеев П. А., Ершов А. В. Волоконно-оптические системы наблюдения с перемещением изображения // Оптико-механическая промышленность. 1984. № 4. С. 9–11.

13. Пуйша А. Э. Волоконно-оптические системы наблюдения со спектральной обработкой передаваемого изображения: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.07. СПб., 2000. 228 с.

14. Генератор для систем высокоточных боеприпасов выдерживает перегрузки до 100000 g. URL: <http://national-semiconductor.datasheet.su/news/2339:2013-07-11> (дата обращения: 28.12.2017).

15. Ляшук А. Н. Исследование и разработка стабильных высокочастотных ударостойких генераторов на основе фильтровых ПАВ компонентов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.12.04. Омск, 2014. 20 с.

16. Дайнеко М. В. Реконструкция смазанных и зашумленных изображений методами регуляризации и усечения в технических системах обработки информации: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.01. СПб., 2011. 190 с.

17. Кирьянов К. А., Сизиков В. С. Программирование задач восстановления искаженных изображений на C/C++ в

сигнальных микропроцессорах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 6 (82). С. 77–81.

18. Сизиков В. С., Кирьянов К. А., Экземпляр Р. А. Два быстрых алгоритма восстановления смазанных изображений // Известия вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 10. С. 24–30.

**ЛЕУН Евгений Владимирович**, кандидат технических наук, ведущий инженер АО «НПО Лавочкина», г. Москва.

**ЛЕУН Владимир Исидорович**, доктор технических наук, профессор секции «Метрология и приборостроение» кафедры «Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология» Омского государственного технического университета.

Адрес для переписки: [stankin1999@mail.ru](mailto:stankin1999@mail.ru)

#### Для цитирования

Леун Е. В., Леун В. И. Вопросы построения многофункциональных приборов активного контроля линейных и угловых размеров изделий и их формы поверхности // Омский научный вестник. 2018. № 1 (157). С. 69–75. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-157-69-75.

Статья поступила в редакцию 28.12.2017 г.

© Е. В. Леун, В. И. Леун