

ВОПРОСЫ ПОСТРОЕНИЯ ЗОНДОВЫХ ПРИБОРОВ АКТИВНОГО КОНТРОЛЯ РАЗМЕРОВ ИЗДЕЛИЙ

В статье представлены зондовые приборы активного контроля (ПАК) размеров изделий, описаны состав, варианты, принцип и режимы работы. Измерения осуществляются за счет двухкоординатных виброколебаний наконечника по замкнутой траектории с участком сонаправленного движения и механического контактирования I_k с поверхностью движущегося изделия. На этом участке наконечник движется $v_{\text{нак}}$ с небольшим отставанием от изделия $v_{\text{изд}}$ с малой относительной скоростью $\Delta v = v_{\text{нак}} - v_{\text{изд}} \approx 0$, реализуя скользящее ощупывание, подобно игле профилометра или кантилевера, с измерением его положения по двум координатам I_x и I_y . Измерения состоят из последовательности таких ощупываний.

В статье обсуждаются вопросы функциональных возможностей, непрерывности и точности измерений зондовых ПАК.

Ключевые слова: активный контроль, размер изделия, сканер, вибродвигатель, пьезодвигатель, зондовая микроскопия, наконечник.

Введение. Начиная с момента появления в 60-х годах XX века за рубежом [1, 2] и в СССР [3–6] использование в приборо-, станко-, машиностроении и ракетно-космической отрасли приборов активного контроля (ПАК) размеров изделий на металлорежущих станках демонстрирует свою эффективность, позволяя повысить производительность труда до 2–5 раз на заключительных операциях изготовления изделий с прерывистой поверхностью: сверла, фрезы, развертки и др.

Несмотря на прогресс в развитии бесконтактных, в частности лазерных ПАК [7–9], полная замена ими контактных ПАК невозможна, т.к. они не позволяют исключить влияние на точность измерений поверхностного шлама, окисной пленки и т.п. В контактных ПАК измерительный наконечник (в дальнейшем — наконечник) подводится к детали до механического контакта с ней с одновременной фиксации его координаты. При этом проявляются ограничения, обусловленные максимумом ударных динамических усилий и погрешности измерений при инерционном переходе наконечника с впадины на выступ.

К настоящему времени уже создан большой задел в области шаговых вибродвигателей ударного типа, созданных в 1964 г. Лавриненко В. В. [10] и позже ставших предметом исследований ученых Каунаса [11, 12]. Также имеются достижения в зондовой [13] и ближнепольной оптической микроскопии [14]. И данная статья, используя этот задел, посвящена способу активного контроля размеров изделий, основанном на движущемся по криволинейной траектории, близкой к эллипсу, подвижном зонде, подобном игле профилометра или кантилевера, установленном на вибродвигателе, используемом для ощупывания обрабатываемой

детали. Это позволяет перейти от «ударного» контактирования к «ощупывающему» с меньшими нагрузками и погрешностью измерений и большей информативностью. Такие разработки ранее не были представлены в открытой печати, и данная статья, открывая серию публикаций на эту тему, направлена на восполнение этого пробела.

1. Устройство и принцип действия. Итак, конструкция зондового ПАК поясняется с помощью рис. 1а, на котором изображено изделие 1, обрабатываемое шлифовальным кругом 2; консольно установленный на вибродвигатель 3 актюатор 4, на конце которого закреплен заостренный наконечник 5 с калиброванной контактирующей поверхностью преимущественно из корундов (сапфир, рубин) с нанесенным снаружи отражающим покрытием 6, например, из алюминия (Al) толщиной до 20...50 мкм (рис. 2) с центральным несимметричным отверстием на торце наконечника 5 для прохождения оптического потока, оптически связанный с волоконно-оптическим преобразователем (ВОП) 7; волоконный измеритель 8, сканер 9.

Работа зондового ПАК далее рассмотрена на примере активного контроля размеров изделия 1 с прерывистой поверхностью во время обработки шлифовальным кругом 2 на круглошлифовальном станке.

Принцип действия зондового ПАК в режиме контактных измерений подобен принципу весла, реализованному в вибродвигателях ударного типа. Заостренный наконечник 5, установленный на конце консольно закрепленного актюатора 4 вибродвигателя 3, осуществляет с их помощью циклические двухкоординатные виброколебания по траектории, близкой к эллипсу, с четырьмя последовательными этапами: подведение к поверхности → контактное

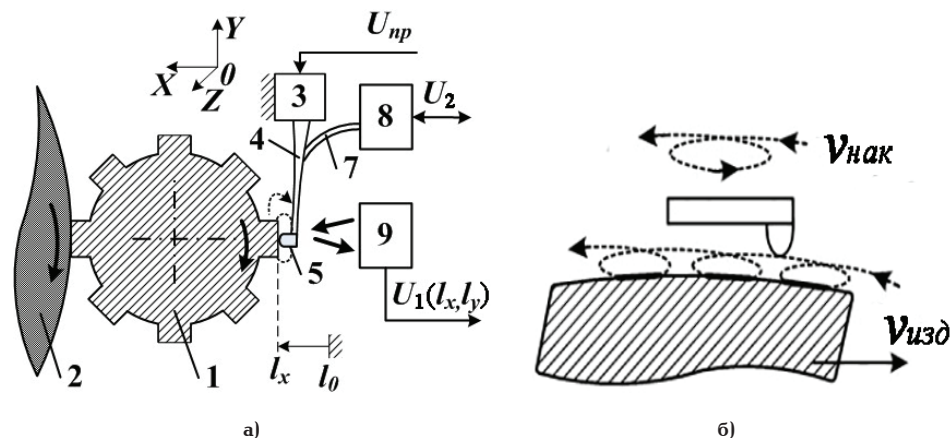


Рис. 1. Схема зондового ПАК (а) и траектории движения наконечника во время измерений (б)

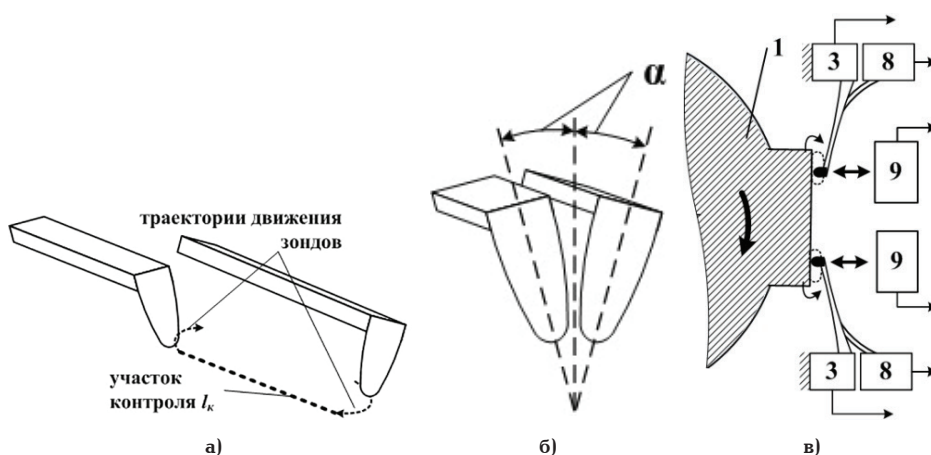


Рис. 2. Двухзондовый ПАК: в режиме двухтактных противофазных измерений (а), угловое разнесение наконечников (б), последовательное расположение двух зондов (в)

скольжение по поверхности → отведение от поверхности → возвратное бесконтактное движение. На втором этапе наконечник 5 с небольшим отставанием скользит со скоростью $v_{нак}$ на участке l_k по поверхности изделия 1, движущегося со скоростью $v_{изг}$, а их относительная скорость мала: $\Delta v = v_{изг} - v_{нак} \approx 0$. В процессе этого скольжения поверхность изделия 1 ощупывается наконечником 5, пространственное положение которого l_x и l_y измеряется сканером 9.

Контактные измерения состоят из последовательности таких ощупываний, а на остальных этапах движения наконечник 5 не касается поверхности изделия 1.

1.1. Обеспечение непрерывности измерений.

В связи с наличием этапа возвратного движения наконечника без контакта с изделием и появлением из-за этого неизмеренного участка, обеспечение непрерывности измерений возможно при использовании двух зондов с двухтактным противофазным режимом работы на одном участке контроля l_k (рис. 2а, б) с последовательным расположением двух зондов (рис. 2в), контактно-бесконтактными измерениями с помощью гибридных ПАК (рис. 3б), а также расчетным путем.

Двухтактный режим двухзондового ПАК (рис. 2а) реализуем при использовании двух зондов с симметричным угловым разнесением $\pm\alpha$ наконечников относительно вертикали, эллиптических движений в двух разных плоскостях, пересекающихся на участке контроля l_k (рис. 2б), и их противофазной

работы с длительностью возвратного движения $T_{возв}$, не превышающем время измерений $T_{изм}$: $T_{возв} \leq T_{изм}$.

Измерения гибридными ПАК осуществляются контактно при контактировании с изделием и бесконтактно при возвратном движении. Для обеспечения этого, а также проведения периодической калибровки, учета износа наконечника, определения зазора между изделием и наконечником в процессе механического контактирования в наконечнике размещается волоконный интерферометрический датчик с микрооптическим элементом на торце (рис. 3б) с достигаемой точностью измерения не хуже 1 мкм [15, 16].

Корректное восстановление профиля поверхности возможно также расчетным путем на основе предварительных данных о форме изделия, скорости перемещения изделия и по результатам дискретных измерений зондовым ПАК при соблюдении условия минимальной частоты ощупываний, определяемой теоремой отсчетов Котельникова. Более подробно этот вопрос будет рассмотрен в одном из следующих авторских исследований.

1.2. Синхронизация измерений за счет определения бокового приближения выступов изделия.

Эффективность активного контроля изделий, особенно с прерывистой поверхностью, повышается при синхронизации измерений за счет определения бокового приближения выступов изделия и использования волоконного интерферометрического датчика.

Вопросы обеспечения синхронизации измерений за счет определения бокового приближения

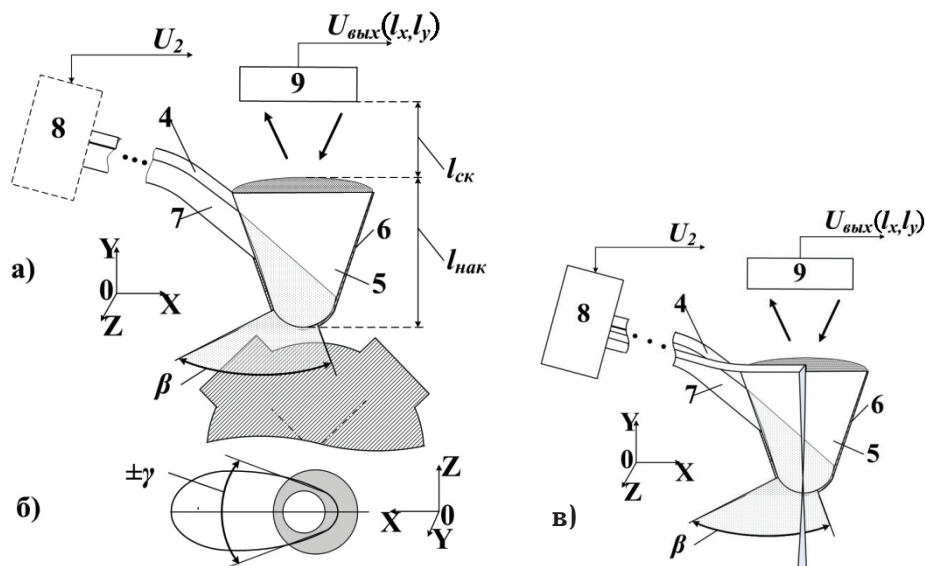


Рис. 3. Наконечники зондовых ПАК: с формированием несимметричного выходного оптического потока: вид сбоку (а), диаграмма направленности (б) и с введенным волоконным интерференционным датчиком (в)

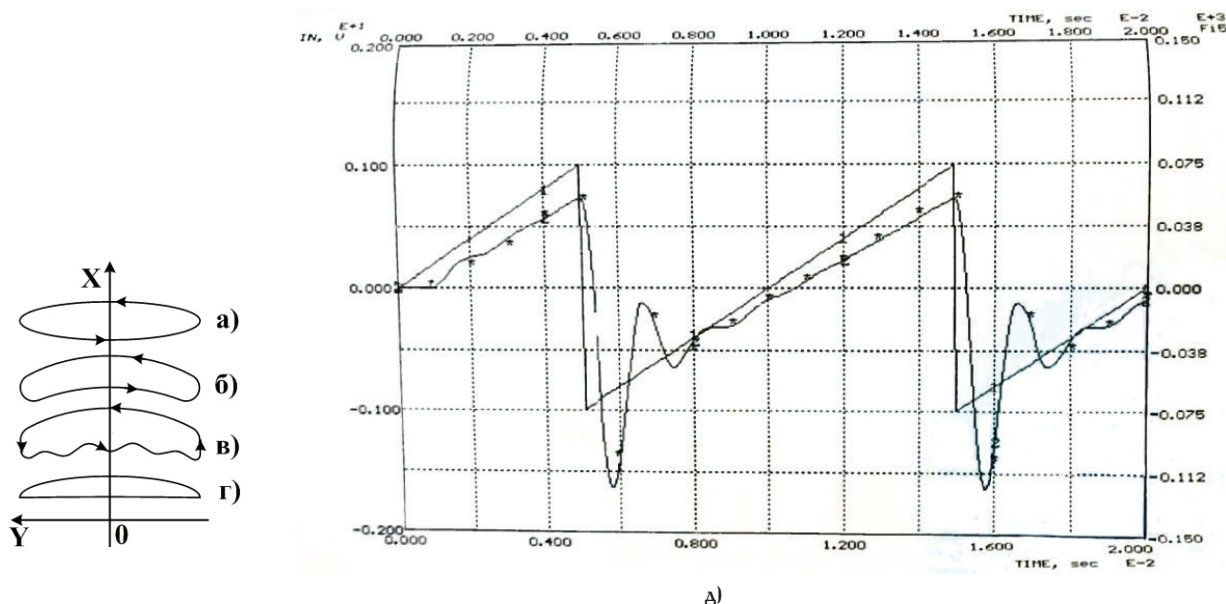


Рис. 4. Траектории движения наконечника (а-г) и пилообразный сигнал с экспериментальной характеристикой движения (д), полученные для актюатора с мультипликатором [18]

выступов изделия позволяет по отраженному оптическому сигналу «следить» как за боковым приближением выступа изделия, так и после начала механического контактирования ИН с поверхностью оценивать его характер на предмет наличия/отсутствия контакта или отрыва от поверхности. Подобные вопросы ранее уже было подробно рассмотрены в [17]. Было показано, что условием для осуществления этого является формирование направленного несимметричного потока излучения и регистрация отраженного сигнала за счет применения амплитудных методов или фазовой синхронизации на основе фазовой автоподстройки частоты.

Представляется, что для данного зондового ПАК достаточно, чтобы несимметричный поток излучения наконечника имел диаграмму направленности в угловых секторах (рис. 3а): в диапазонах $-10^\circ \dots$

$+20^\circ$ и $-20^\circ \dots +20^\circ$ соответственно в плоскостях XOY и XOZ.

1.3. Характер и траектории движения измерительного наконечника. Взаимное сонаправленное движение наконечника 5 по поверхности изделия 1 предполагает его обгон при $v_{нак} > v_{изг}$ или отставание при $v_{нак} < v_{изг}$. Первый вариант предполагает более высокие требования к быстродействию зонда, что малоперспективно и в дальнейшем рассматриваться не будет. Во втором варианте можно записать $v_{нак} = v_{изг} - \Delta v$ и, соответственно,

$\frac{v_{нак}}{v_{изг}} = 1 - \frac{\Delta v}{v_{изг}}$. Так как для каждого цикла измерений в течение фиксированного периода времени происходит измерение размеров в пределах l_k при перемещении изделия на значение $l_{изг}$ и $\frac{\Delta v}{v_{изг}} = \frac{l_k}{l_{изг}}$, то можно записать $\frac{v_{нак}}{v_{изг}} = 1 - \frac{l_k}{l_{изг}}$.

С учетом этого получаем выражение

$$\frac{I_k}{I_{узг}} = 1 - \frac{v_{нак}}{v_{узг}}, \quad (1)$$

демонстрирующее связь относительного участка контроля $\frac{I_k}{I_{узг}}$ с относительной скоростью $\frac{v_{нак}}{v_{узг}}$, для которой характерны два крайних случая. Так, при неподвижном наконечнике с $v_{нак}=0$ длина контроля I_k равна длине перемещения изделия $I_{узг}$, т.е. $I_k = I_{узг}$ и поэтому $\frac{I_k}{I_{узг}} = 1$. При движении же со скоростью, равной скорости движения изделия $v_{нак} = v_{узг}$, наконечник неподвижен относительно поверхности изделия и $I_k = 0$. Остальные случаи являются промежуточными между вышеописанными.

В зависимости от особенностей формы поверхности изделия траектория движения наконечника, будучи замкнутой кривой, может приближаться по форме к эллипсу: $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$ (рис. 4а), подобно овалам Декарта (в виде разорванного вытянутого тора, рис. 4б): $(x^2 + y^2 - 2x)^2 = x^2 + y^2 - 1$, иметь в пределах участка контроля I_k изменяемое усилие прижима к изделию, компенсирующее колебания, возникающие от механического контакта (рис. 4в) с прямолинейным участком (рис. 4г) или и другие формы.

Движение наконечника по простым траекториям типа эллипса, сформированное при подаче на актюатор простых моногармонических сигналов, делает измерительное усилие $\Delta F_{из}$ и/или скорость движения непостоянным: $\Delta F_{из} \neq const$ и $v_{нак} \neq const$. Линеаризация этих параметров вынуждает применять более сложные сигналы управления, например, пилообразный полигармонический сигнал со сложным спектром:

$$U_{уп}(t) = \frac{2U_m}{\pi} \left(\begin{array}{l} \sin \omega_1 t - \frac{1}{2} \sin 2\omega_1 t + \\ + \frac{1}{3} \sin 3\omega_1 t - \frac{1}{4} \sin 3\omega_1 t + \dots \end{array} \right).$$

1.4. Пирометрическое измерение температуры. Высокая прозрачность корундов в широком диапазоне длин волн, включая ИК-диапазон, позволяет измерять ее температуру T пирометром, расположенным в волоконном измерителе 8. В общем случае изменения температуры в широком диапазоне от 20 °С до 450 °С соответствуют передаче по ВОП для последующего измерения оптического излучения в инфракрасном диапазоне длин волн $\Delta\lambda \sim 1,0 \dots 1,6$ мкм. Однако в реальности за счет использования смазочно-охлаждающих жидкостей диапазон температур и, соответственно, диапазон длин волн будет уже, упрощая схему измерений.

2. Конструктивные особенности и технические характеристики. В разделе описаны основные узлы зондовых ПАК, определяющие его технические характеристики и функциональные возможности с учетом скорости движения поверхности изделия $v_{узг} \approx 0,6$ м/с.

2.1. Вибродвигатели. На данный момент вибродвигатели ударного типа уже достаточно хорошо исследованы [10–12]. Так, для большинства вибродвигателей амплитуды колебаний вибропре-

образователей весьма малы и лежат в диапазоне от 0,1 мкм до 0,1–0,2 мм [11] с частотами до нескольких десятков мегагерц [18]. Для них используют пьезоэлектрические, электро- и магнитострикционные материалы.

В работе [19] со ссылкой на [20] указывается на достижение линейной скорости 0,75 м/с, а в работе [21] описывается пьезоактюатор с чувствительностью 0,76 мкм/В при напряжении питания 170 В, смещения I_{ng} которого на частоте резонанса $f_{ng} = 1$ кГц возрастают до 10 раз. С учетом этого значение скорости движения вибропреобразователя для каждого полупериода переменного сигнала можно вычислить по формуле:

$$v_{ин} = 2 \cdot 10 I_{ng} \cdot f_{ng}, \quad (2)$$

получив расчетное значение $v_{ин} \approx 2,6$ м/с с превышением $v_{ин}$ над $v_{узг}$ более 4 раз и создав предпосылки для успешного использования в зондовых ПАК.

Использование мультипликаторов не позволяет существенно повысить $v_{ин}$, т.к. увеличение выходных перемещений $\Delta l'_{ng} \approx k_m \Delta l_{ng}$ связано с таким же снижением частоты движений $f'_{ng} \approx f_{ng} / k_m$ [18], где k_m — коэффициент мультипликации, Δl_{ng} и f_{ng} — собственные амплитуда и частота смещений пьезообразователя, $\Delta l'_{ng}$ и f'_{ng} — амплитуда и частота смещений на выходе мультипликатора, а эти изменения компенсируют друг друга. Тем не менее использование мультипликатора позволяет найти оптимум между $v_{ин}$, I_{ng} и f_{ng} и другими параметрами ПАК, например, быстродействием сканера.

Точность задания траектории движения наконечника обеспечивается датчиками обратной связи в виде встроенных в актюатор тензорезисторов, уже активно используемых в [22].

2.2. Корундовый наконечник. Из всех высокопрочных и оптически прозрачных материалов корунды (сапфир, рубин), вероятно, являются наиболее подходящими для изготовления наконечников из-за своей доступности и технологичности. Устойчивость их к высоким ударным нагрузкам, возникающим при активном контроле, из-за высоких прочностных свойств подтверждена расчетным путем в [7] с получением оценки ≈ 30 -кратного запаса прочности и экспериментально [23].

2.3 Сканер. Для измерения положения по двум координатам I_x и I_y наиболее подходящими являются сканеры серии 29X0 типа scanCONTROL фирмы Micro-Epsilon (Германия) [24]. Высокоточный сканер LLT2950-10/BL имеет следующие характеристики: диапазон измерения 10 мм, линейность измерений $\pm 0,17$ % (от диапазона) и разрешающая способность 1 мкм, апертурный угол 10° на линию сканирования, частота сканирования до 2000 Гц с пространственным разрешением 1280 точек.

2.4. Волоконно-оптический преобразователь. Хорошие тактико-технические характеристики, достигаемые волоконными некогерентными интерферометрами, способными при использовании слабокогерентных излучателей работать с шероховатыми поверхностями, делает их перспективными для использования в составе наконечника зондовых ПАК. Исходя из многочисленных исследований этих устройств [15, 16], достижимая погрешность измерений может быть не хуже 1 мкм.

3. Анализ технических характеристик зондовых ПАК. Для понимания потенциала разработанных зондовых ПАК оценим их основные тех-

нические характеристики и, в первую очередь, быстродействие и точность измерений.

3.1. Анализ быстродействия. Для вышеупомянутого сканера LLT2950-10/BL при частоте сканирования до 2000 Гц с пространственным разрешением 1280 точек на сканирование и измерение положения одной точки уходит не более 0,39 мкс. Если разрешающая способность этого сканера, равная 1 мкм, будет равна динамической погрешности, то максимальная контролируемая скорость перемещения наконечника составит $\approx 2,56$ м/с. И это рассчитанное значение существенно, почти в 4 раза, больше скорости движения поверхности изделия $v_{изг} \approx 0,6$ м/с, обеспечивая достаточный запас по быстродействию.

3.2. Метрологический анализ зондового ПАК. Для оценки точностных параметров рассчитаем погрешности контактных $\Delta I_{ки}$ и бесконтактных $\Delta I_{бу}$ измерений разработанного зондового ПАК.

3.2.1. Погрешность контактных измерений. Погрешность контактных измерения зондового ПАК $\Delta I_{ки}$ состоит из трех основных составляющих: $\Delta I_{скан}$ — погрешность измерения сканера, $\Delta I_{темпл}$ — температурная погрешность от удлинения наконечника, $\Delta I_{МК}$ — погрешность механического контактирования, обусловленная вдавливанием наконечника в изделие за счет измерительного усилия $F_{из}$. Приняв, что они не зависят друг от друга и имеют нормальное распределение в искомом выражении для $\Delta I_{нак'}$ можно сложить их геометрически

$$\Delta I_{ки} = \sqrt{\Delta I_{скан}^2 + \Delta I_{темпл}^2 + \Delta I_{МК}^2}. \quad (3)$$

При бесконтактных измерениях $\Delta I_{МК} = 0$, а температурные удлинения наконечника из корундов в воздухе при фазовых измерениях лазерным интерферометром и вышеупомянутым некогерентным волоконным учитываются с коэффициентом 0,76 [25]. Поэтому выражение для бесконтактных измерений $\Delta I_{бу}$ имеет вид:

$$\begin{aligned} \Delta I_{бу} &= \sqrt{\Delta I_{скан}^2 + (0,76 \Delta I_{темпл})^2} = \\ &= \sqrt{\Delta I_{скан}^2 + 0,58 \Delta I_{темпл}^2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Далее для расчета $\Delta I_{ки}$ и $\Delta I_{бу}$ определим значения их всех составляющих.

3.2.1.1. Погрешность измерения сканера $\Delta I_{скан}$. В разработанном зондовом ПАК сканера можно периодически калибровать с получением координат каждой точки сканирования, тем самым исключая погрешность линейности и делая ее пренебрежимо малой. Тогда в формуле (4) можно использовать разрешающую способность, значение которой для высокоточного сканера LLT2950-10/BL составляет 1 мкм [24].

3.2.1.2. Расчет температурной погрешности $\Delta I_{темпл}$ наконечника. Температурное расширение $\Delta I_{нак}$ корундовых наконечников можно рассчитать по формуле $\Delta I_{нак} = \beta \cdot l_0 \cdot \Delta T$, где β — коэффициент линейного расширения корунда, для сапфира и рубина $\beta = 5,58 \cdot 10^{-6}$, l_0 и ΔT — исходная высота и нагрев наконечника. Тогда для наконечника высотой $l_0 = 2$ мм и при нагреве $\Delta T = 20$ °C получаем $\Delta I_{нак} = 0,22$ мкм.

3.2.1.3. Погрешность механического контактирования $\Delta I_{МК}$. Для расчета значения $\Delta I_{МК}$ принимаем, что характер контактных деформаций шероховатых поверхностей (для $R_a > 0,16$ мкм) наконечника и изделия — пластический.

С учетом этого выражение для расчета $\Delta I_{МК}$, представленное в [6], имеет следующий вид:

$$\Delta I_{МК} = 3,4 \cdot 0,95 \cdot R_a \sqrt[3]{\frac{P_c}{P_r}} \approx 3,23 R_a \sqrt[3]{\frac{P_c}{P_r}}, \quad (5)$$

где $R_a = R_{1a} + R_{2a}$ — среднее арифметическое отклонение профиля шероховатых поверхностей, P_r — давление в пределах площади контакта, P_c — давление (отношение усилия к контурной площади контакта), определяемое как

$$P_c = \frac{0,36}{\sqrt[3]{(Q_{сум} R_b)^2}} \cdot \sqrt[3]{\frac{\Delta F_{изг}}{n_b}}, \quad (6)$$

где $\Delta F_{изг}$ — изменение измерительного усилия наконечника, n_b — количество контактирующих волн в зоне контакта (для сферического и плоского наконечников при активном контроле в процессе шлифования $n_b = 1$), $Q_{сум}$ — упругая постоянная контактирующих материалов, определяемая как

$$Q_{сум} = \frac{1 - \nu_{нак}^2}{E_{нак}} + \frac{1 - \nu_{изг}^2}{E_{изг}}, \quad (7)$$

где $E_{изг}$, $E_{нак}$ и $\nu_{нак}$, $\nu_{изг}$ — модули упругости и коэффициенты Пуассона материалов, $R_b = \frac{R_{1b} \cdot R_{2b}}{R_{1b} + R_{2b}}$ — средний радиус волны контактирующих поверхностей.

В зависимости от соотношения P_c и $\frac{H_{мм}}{3}$ значение P_r рассчитывается по разным формулам из системы уравнений:

$$R_r = \begin{cases} H_{мм}, & \text{при условии } P_c \leq \frac{H_{мм}}{3}, \\ P_c - 0,4 \sqrt{\frac{H_{мм}^3}{P_c}}, & \text{при условии } P_c \geq \frac{H_{мм}}{3}, \end{cases} \quad (8)$$

где $H_{мм}$ — меньшее значение микротвердости контактирующих материалов, как правило, соответствующее контролируемой детали.

3.2.2. Расчет погрешностей контактных и бесконтактных измерений зондовых ПАК. Итак, в соответствии с выражениями (3), (5) — (8) были рассчитаны соответственно значения $\Delta I_{МК}$ и $\Delta I_{ки}$ при контактировании корундового наконечника ($E_{нак} = 350$ ГПа, $\nu_{нак} = 0,18$) с изделием из быстрорежущей стали ($E_{изг} = 220$ ГПа, $\nu_{изг} = 0,23$) при изменении $\Delta F_{изг}$ в диапазоне от 0,5 до 5 Н. На основании полученных значений на рис. 5 построены две зависимости: $\Delta I_{МК}(\Delta F_{изг})$ — с ромбами и $\Delta I_{ки}(\Delta F_{изг})$ — с квадратами, которые, как видно, близки по характеру кривых, имея небольшое смещение между собой. С учетом этого, для максимального значения $\Delta F_{изг} = 3$ Н, рекомендованного в [6], имеем $\Delta I_{МК} = 1,36$ мкм, а погрешность контактных измерений $\Delta I_{ки}$ соответственно $\Delta I_{ки} = 1,71$ мкм.

Погрешность бесконтактных измерений, рассчитанная по формуле 4, составила $\Delta I_{бу} = \sqrt{1 + (0,76 \cdot 0,22)^2} = \sqrt{1 + 0,58 \cdot 0,048} \approx 1$ мкм.

В обоих случаях получена высокая точность измерений, подтверждающая хорошие технические характеристики разработанных зондовых ПАК.

Заключение. 1. Измерения зондовых ПАК осуществляются за счет двухкоординатных виброколебаний наконечника по замкнутой траектории

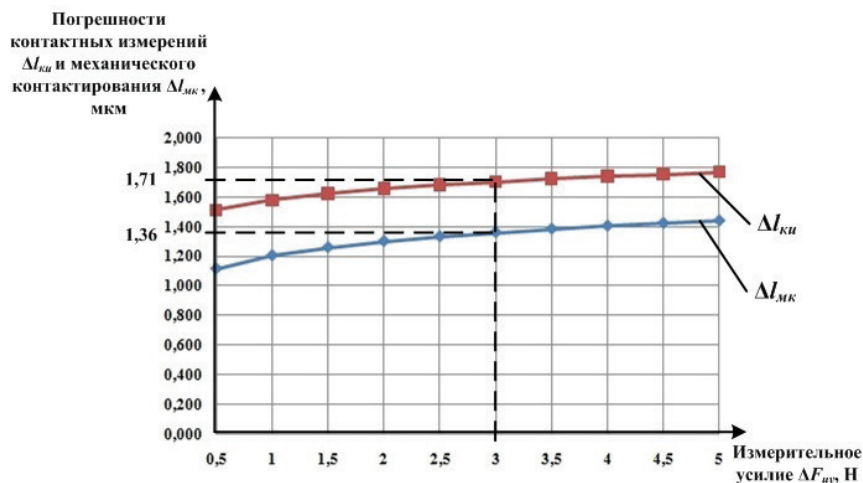


Рис. 5. Зависимости суммарной погрешности $\Delta I_{нак}$ (с квадратами) и погрешности механического контактирования $\Delta I_{мк}$ (с ромбами) от измерительного усилия $\Delta F_{изз}$

с участком сонаправленного движения и механического контактирования $\Delta I_{мк}$ с поверхностью движущегося изделия. На этом участке наконечник движется $v_{нак}$ с небольшим отставанием от изделия $v_{изз}$ с малой относительной скоростью $\Delta v = v_{нак} - v_{изз} \approx 0$, реализуя скользящее ощущение, подобно игле профилометра или кантилевера, с измерением его положения по двум координатам I_x и I_y . Измерения состоят из последовательности таких ощущений.

2. В связи с наличием этапа возвратного движения наконечника без контакта с изделием и появлением из-за этого неизмеренного участка обеспечение непрерывности измерений возможно при использовании двух зондов с двухтактным противофазным режимом работы на одном участке контроля I_k , с последовательным расположением двух зондов, контактно-бесконтактными измерениями с помощью гибридных ПАК, а также расчетным путем.

3. Существующий технологический уровень в областях вибродвигателей и лазерных 2D сканеров позволяет создать и использовать зондовые ПАК при скоростях движений изделий на уровне $\approx 0,6$ м/с.

4. Погрешность механического контактирования $\Delta I_{мк}$, обусловленная вдавливанием корундового наконечника в изделие из быстрорежущей стали, при измерительном усилии 3Н составляет 1,36 мкм.

5. Погрешности зондовых ПАК для контактных $\Delta I_{ки}$ и бесконтактных измерений составляет $\approx 1,71$ мкм и $\approx 1,0$ мкм соответственно.

Библиографический список

1. Marposs. URL: <http://www.marposs.com> (дата обращения: 15.06.2018).
2. Industrial metrology: modern measuring systems for monitoring quality in production processes. URL: <https://www.jenoptik.com/products/metrology> (дата обращения: 15.06.2018).
3. Волосов С. С., Педь Е. И. Приборы для автоматического контроля в машиностроении. М.: Машиностроение, 1970. 310 с.
4. Кондашевский В. В., Лотце В. Активный контроль размеров деталей на металлорежущих станках. Омск: Зап.-Сиб. кн. изд-во, Омское отд-ние, 1976. 431 с.
5. Сайт АО «НИИИзмерения». URL: http://www.micron.ru/production/active_instruments/bv-4304/ (дата обращения: 15.06.2018).

6. Леун В. И. Повышение эффективности технологии изготовления и точности измерения линейных размеров прецизионных деталей приборов, машин и изделий инструментально-го производства средствами автоматического контроля: дис. ... д-ра техн. наук: 05.11.14, 05.11.01. СПб., 1994. 420 с.

7. Леун Е. В. Разработка приборов активного контроля размерных параметров изделий с использованием сапфировых измерительных наконечников // Омский научный вестник. 2016. № 4 (148). С. 123–127.

8. Пат. 2603516 Российская Федерация, 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. 27.11.16, Бюл. № 33.

9. Пат. 2648901 Российская Федерация, МПК В 24 В 49/00, G01 В 5/00, G 01 В 11/00, G 01В 5/00. Способ активного контроля размеров изделия в процессе его шлифования / Леун Е. В.; заявл. 04.02.16; опубл. 28.03.18, Бюл. № 10.

10. Лавриненко В. В., Карташев И. А., Вишневский В. С. Пьезоэлектрические двигатели. М.: Энергия, 1980. 110 с.

11. Банявичюс Р., Рагульскис К. Вибродвигатели. Вильнюс: Мокслас, 1980. 193 с.

12. Bansevicius R., Blechertas V. Ultrasonic motors formass-consumer products // Ultragarasas. 2006. № 4 (61). P. 50–53. URL: http://www.ndt.net/article/ultragarsas/61-2006-vol.4_09-r.bansevicius.pdf (дата обращения: 15.06.2018).

13. Пат. 2329465 Российская Федерация, МПК G01В 7/34 G12В 21/00. Способ измерения рельефа поверхности объекта с использованием сканирующего зондового микроскопа / Быков А. В., Быков В. А., Лесмент С. И., Рябонь В. Н.; № 2006145408/28; заявл. 21.12.06; опубл. 20.07.08. Бюл. № 20.

14. Быков В. А. Микромеханика для сканирующей зондовой микроскопии и нанотехнологии. URL: http://www.microsystems.ru/files/publ/7.htm#_1_ Геометрия_и_физические_свойства_(дата обращения: 15.06.2018).

15. Иванов В. В. Развитие методов низкокогерентной волоконно-оптической интерферометрии: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Н. Новгород, 2005. 154 с.

16. Кононенко В. В., Конов В. И., Волков П. В., Иванов В. В. [и др.]. Контроль лазерной обработки поликристаллических алмазных пластин методом низкокогерентной оптической интерферометрии // Квантовая электроника. 2005. Т. 35, № 7. С. 622–626.

17. Леун Е. В., Леун В. И., Шаханов А. Е. Сапфировые наконечники приборов активного контроля размеров изделий, выполненных с впадинами и выступами, с возможностью определения бокового приближения выступов // Проблемы машиноведения: материалы II Междунар. науч.-техн. конф.

Омск, 27–28 февраля 2018 г. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2018. С. 212–221.

18. Щербин А. М. Исполнительные элементы прецизионных пьезоэлектрических приводов с увеличенным диапазоном перемещения: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05. М., 1997. 205 с.

19. Hunstig M. Piezoelectric inertia motors – a critical review of history, concepts, design, applications, and perspectives // *Actuators*. 2017. Vol. 6 (1), 7. DOI: 10.3390/act6010007. URL: <http://www.mdpi.com/2076-0825/6/1/7> (дата обращения: 15.06.2018).

20. Nishimura T., Morita T. Resonant-type SIDM Actuator // *ACTUATOR 10 Conference Proceedings*. Wirtschaftsförderung Bremen: Bremen, Germany, 2010. P. 181–185.

21. Claeysen F., Le Letty R., Barillot F. [et al.]. Amplified piezoelectric actuators: static & dynamic applications // *Ferroelectrics*. 2007. Vol. 351. P. 3–14. DOI: 10.1080/00150190701351865.

22. Низковольтные многослойные пьезоактуаторы серии P-871. URL: http://www.eurotek-general.com/products/systems_pi/piezoactuators/p-871/#ad-image-0 (дата обращения: 15.06.2018).

23. 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.

24. More Precision scanCONTROL. Micro-Epsilon // 2D/3D laser scanner (laser profile sensors). URL: [https://www.micro-](https://www.micro-epsilon.ru/download/products/cat--scanCONTROL--en.pdf)

[epsilon.ru/download/products/cat--scanCONTROL--en.pdf](https://www.micro-epsilon.ru/download/products/cat--scanCONTROL--en.pdf) (дата обращения: 15.06.2018).

25. Леун Е. В., Леун В. И., Шаханов А. Е. Метрологический анализ лазерных приборов активного контроля размеров изделий с использованием корундовых наконечников // *Омский научный вестник*. 2018. № 2 (158). С. 123–127.

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

SPIN-код: 6060-8056

AuthorID: 367560

AuthorID (SCOPUS): 57200722184

Адрес для переписки: stankin1999@mail.ru

Для цитирования

Леун Е. В. Вопросы построения зондовых приборов активного контроля размеров изделий // *Омский научный вестник*. 2018. № 4 (160). С. 127–133. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-160-127-133.

Статья поступила в редакцию 19.06.2018 г.

© Е. В. Леун