

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЛАЗЕРНЫХ ПРИБОРОВ АКТИВНОГО КОНТРОЛЯ РАЗМЕРОВ ИЗДЕЛИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОРУНДОВЫХ НАКОНЕЧНИКОВ

Статья посвящена расчету погрешности измерений контактных приборов активного контроля (ПАК) размеров изделий с использованием искусственно созданных корундовых наконечников. Показано, что ее большая часть определяется температурной погрешностью, возникающей за счет теплового расширения наконечника при нагреве в результате механического контакта с изделием. Проведенные расчеты основаны на формировании в наконечнике маршрута следования входного и отраженного оптических потоков под углом к его передней поверхности, обеспечивающим полное внутреннее отражение в зоне контакта с изделием.

Произведен расчет погрешности измерений при создании в лазерном интерферометре опорного канала, фиксирующего смещения тыльной стороны наконечника от его теплового расширения. Показано существенное уменьшение погрешности измерений для данного случая.

Ключевые слова: прибор активного контроля, корундовый наконечник, тепловое расширение наконечника, износ наконечника, погрешность измерений, лазерный интерферометр.

Введение. Использование приборов активного контроля (ПАК), повышающих производительность труда на металлорежущих станках до 2–5 раз особенно при измерении размеров изделий с прерывистой поверхностью, таких как сверла, фрезы, развертки и т.д., до сих пор актуально в приборостроении и машиностроении и ракетно-космической отрасли России.

Начиная с зарождения этого направления, в СССР и за рубежом в 60-х годах XX века ведущими в этой области являются научные коллективы МГТУ «СТАНКИН», Омского государственного технического университета, МГТУ им. Н.Э. Баумана, АО «НИИИзмерения», г. Москва, АО «НПО Лавочкина», г. Москва [1–10].

Также за последнее время в России появилось достаточное число публикаций, развивающих это направление [11–14].

Судя по публикациям, вопросы разработки и эффективного использования ПАК являются актуальными и в наиболее технологически развитых странах [15–17]. Но всеми признанным лидером в этой области за рубежом является итальянская фирма Марпос (Marpos) [18].

К 2016 году в ОмГТУ д.т.н., проф. Леуном В.И. был создан и успешно отработан опытный обра-

зец контактного широкодиапазонного ПАК (рис. 1) с использованием инкрементного линейного фотоэлектрического преобразователя перемещений ЛИР-3 [19], произведенного в СКБ ИС (г. Санкт-Петербург). Этот ПАК имеет следующие параметры: дискретность измерения — 0,1 мкм, диапазон измерения — не менее 100 мм, максимальная скорость подведения/отведения наконечника к обрабатываемому изделию перед измерениями не менее 10 мм/с, минимальная скорость двунаправленных перемещений в процессе измерений ≈ 2 мкм/с, дискретность перемещений 1 мкм.

Современная элементная база позволяет существенно упростить управление движением наконечника, повысить точность измерений его смещений и снизить массогабаритные параметры ПАК. Так, к настоящему времени четко обозначился выход на новый технологический уровень развития ПАК, заключающийся в переходе от использования непрозрачных наконечников и фотоэлектрических преобразователей перемещений к более перспективному сочетанию, состоящему, например, из прозрачных наконечников на основе корундов (сапфиры или рубины) и лазерных интерферометров перемещений с погрешностью измерений перемещений на уровне 0,05–0,5 мкм.

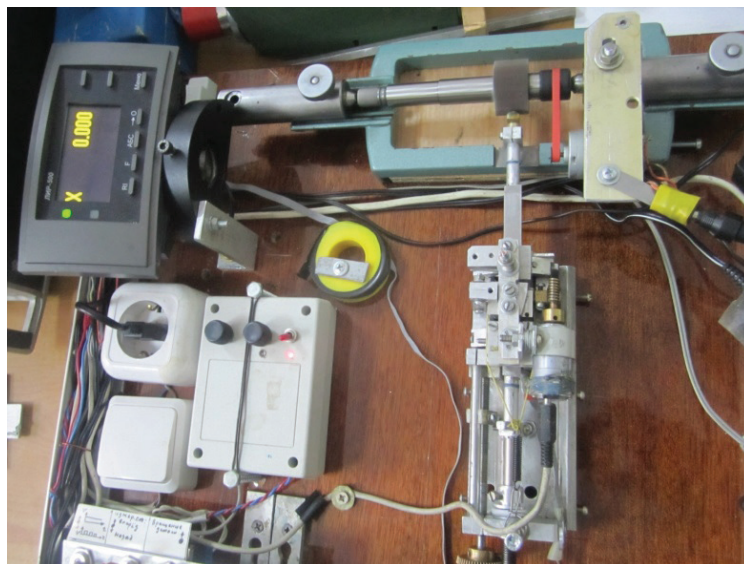


Рис. 1. Общий вид опытного образца ПАК с использованием инкрементного линейного фотоэлектрического преобразователя перемещений ЛИР-3

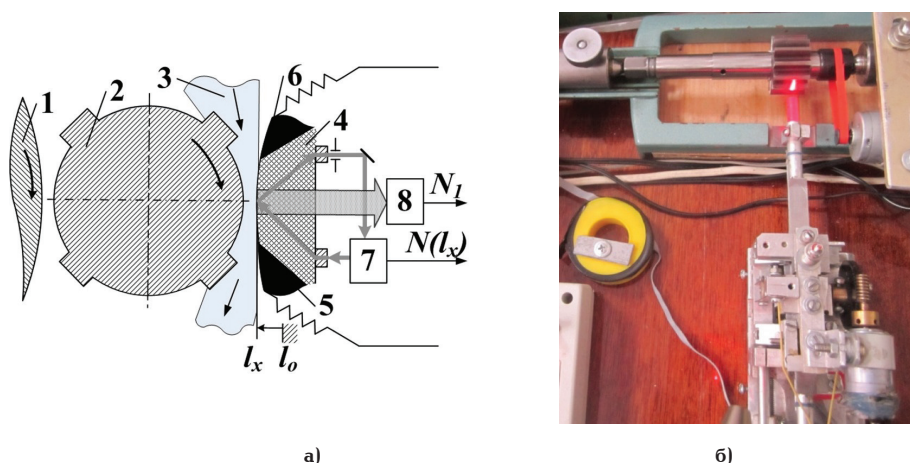


Рис. 2. Лазерные ПАК с корундовыми наконечниками: обобщенная оптическая схема (а), опытный образец с рубиновым наконечником на стадии отработки (б)

Исследования [20, 21] показывают, что прочностные параметры корундов могут быть увеличены при различных физических воздействиях в виде электрического и/или магнитного полей, света, ультразвука, поэтому перспективность использования рубина из-за более высокого поглощения света становится выше бесцветного лейкосапфира. Поэтому, несмотря на прежние авторские исследования, связанные в основном с более доступным сапфиром, и использование его параметров общих с рубинами в качестве основы для расчетов в данной статье и далее расчеты и выводы будут распространяться на корунд(ы), объединяющие более широкий набор родственных монокристаллов на основе Al_2O_3 .

Несмотря на перспективность предложенного направления, подробный метрологический анализ подобных ПАК ранее нигде не был представлен и данная статья предназначена для восполнения этого пробела.

1. Принцип действия и основные технические параметры лазерных ПАК с корундовыми наконечниками. Обобщенную схему лазерных ПАК с корундовыми наконечниками (в дальнейшем —

наконечник) можно представить в виде схемы, изображенной на рис. 2а. Опытный образец такого ПАК с наконечником из рубина во время отработки в ОмГТУ представлен на рис. 2б. Как следует из схемы, в процессе отработки шлифовальным кругом 1 к обрабатываемому изделию 2 в потоке смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) 3 подводится состоящий из корундового светопровода 4 и защитного покрытия 5 наконечник 6, используемый в качестве отражателя подобно отражающей призмы лазерного интерферометра перемещений (в дальнейшем — лазерный интерферометр) 7. С помощью него измеряются все перемещения l_x наконечника 6 относительно точки отсчета l_0 в выбранной системе координат. Измерительная схема 8 позволяет осуществить контроль различных параметров элементов изделия 2 за счет обработки следующих от прозрачного наконечника 6 оптических потоков, в т.ч. и тепловых, в ближнем инфракрасном диапазоне длин волн в пределах спектра пропускания корунда $0,17 < \lambda < 5$ мкм. Подобные измерения оптических потоков позволяют в итоге контролировать шероховатость R_a , наклон поверхности

выступа изделия, температуру изделия и наконечника с формированием соответствующего выходного сигнала N_1 .

Выходной сигнал $N(I_x)$ лазерного интерферометра содержит информацию о перемещениях наконечника I_x в соответствии с выражением (с учетом двойного хода лазерного луча):

$$N(I_x) = \frac{4\pi k_{инт} I_x}{\lambda}, \quad (1)$$

где $k_{инт}$ — коэффициент интерполяции, I_x — измеряемое перемещение наконечника ПАК в процессе активного контроля размеров изделий, λ — длина волны лазера, для гелий-неонового (He-Ne) лазера составляет 0,6328 мкм.

Рассмотрим источник погрешностей в этой оптической схеме (рис. 2а), определяя их значение и влияние на суммарную погрешность ПАК $\Delta I_{пак}$.

2. Метрологический анализ лазерных ПАК с корундовыми наконечниками. Для схемы ПАК с корундовым наконечником, представленной на рис. 2а, основными составляющими погрешности $\Delta I_{пак}$ можно считать погрешность лазерного интерферометра $\Delta I_{ли}$ и погрешность, вызванную тепловым расширением наконечника $\Delta I_{нак}$, учитывая, что они являются независимыми друг от друга и имеют нормальное распределение. В соответствии с этим выражение для суммарной погрешности принимает вид:

$$\Delta I_{пак} = \sqrt{\Delta I_{ли}^2 + \Delta I_{нак}^2}. \quad (2)$$

Как видно на оптической схеме (рис. 2а), из измерительной схемы устранены все промежуточные передаточные механические звенья, обычно применяемые в механических ПАК, и лазерный луч полностью достигает передней поверхности наконечника, освещая ее и отражается от нее, формируя маршрут движения, характерный для призмы.

2.1. Точность измерений лазерных интерферометров перемещений. Оценка точности измерений лазерных интерферометров перемещений произведена на примере акустооптических (АО) лазерных интерферометров. За последние 20–30 лет достигнут существенный прогресс в их совершенствовании, особенно в направлении повышения разрешающей способности. Так при реализации в них акустооптоэлектронной обратной связью разрешающая способность достигает значения $\lambda/1000 \approx 0,6$ нм [22]. При реализации в АО лазерных интерферометрах фазо-цифрового преобразования на основе деления частоты с дискретным управлением фазовым сдвигом позволило достичь повышения разрешающей способности до $\approx \lambda/3000 \approx 0,2$ нм [23]. Это значение разрешающей способности было получено в результате исследований более 15 лет назад и с учетом прогресса в лазерных интерферометрах перемещений, введения в них компенсации изменения параметров окружающей среды, а именно, температуры T , давления P , влажности H , возможности установки за пределами металлорежущего станка с существенным уменьшением влияния вибраций и паразитных механических колебаний его можно использовать для дальнейших расчетов в качестве $\Delta I_{ли}$. Последующее рассмотрение также основано на использовании этого допущения.

2.2. Анализ последствий теплового расширения наконечника ПАК. Как и для большинства измерительных устройств, температурная погрешность

почти всегда является главным источником дополнительной погрешности преобразования. И для рассматриваемых ПАК расчеты основаны на температурной зависимости толщины наконечника $\Delta I_{нак}$ от температуры.

2.2.1. Расчет температурной погрешности, вносимой наконечником. Нагрев наконечника приводит к его тепловому расширению и изменению показателя преломления его материала, влияет на фазовый сдвиг, проходящие оптические потоки и поперечные смещения точки полного внутреннего отражения и отраженного оптического потока.

Для определения паразитного фазового набега $\Delta \Psi_{изм}$ измерительного оптического потока, возникающего от теплового расширения наконечника $\Delta I_{нак}$, можно произвести эквивалентную замену слоя воздуха толщиной $\Delta I_{нак}$ слоем материала наконечника, выполненного, например, из сапфира $\Delta I_{сф}$, равным по толщине — $\Delta I_{нак} = \Delta I_{в} = \Delta I_{сф}$. Тогда вносимый фазовый набег $\Delta \Psi_{изм}$, возникающий между измерительным и опорным оптическими потоками лазерного интерферометра, можно рассчитать по формуле:

$$\begin{aligned} \Delta \Psi_T &= \Delta \Psi_{нак} - \Delta \Psi_{в} = \\ &= \frac{n_{нак} \Delta I_{нак}}{\lambda} - \frac{n_{в} \Delta I_{нак}}{\lambda} = \frac{(n_{нак} - n_{в}) \Delta I_{нак}}{\lambda}. \end{aligned} \quad (3)$$

Для дальнейших расчетов следует определить значения расширения наконечника. При изготовлении наконечника из сапфира имеем $n_{нак} = n_{сф} = 1,76$, а для воздуха $n_{в} = 1$, и выражение (3) приобретает вид

$$\Delta \Psi_T = \frac{0,76 \Delta I_{нак}}{\lambda}. \quad (4)$$

Изменение показателя преломления сапфира от температуры также приводит к паразитному фазовому набегу, вносящему составляющую погрешности. Для расчета этого значения можно использовать то, что, как следует из [24], для обыкновенного луча температурный коэффициент показателя преломления сапфира в интервале $+/-60$ °C составляет $\gamma = 1,28 \cdot 10^{-5}$. Тогда для максимального нагрева наконечника при использовании СОЖ в пределах $\Delta T = 20 \Delta$ °C, подставляя в выражение

$$\Delta n_{сф} = \gamma \cdot n_{сф} \cdot \Delta T, \quad (5)$$

и получаем

$$\Delta n_{сф} = 1,28 \cdot 10^{-5} \cdot 1,76 \cdot 20 = 0,00045.$$

Как видно, изменение показателя преломления сапфира от температуры $\Delta n_{сф}$ существенно меньше, чем разность $(n_{нак} - n_{в})$, равная 0,76 в выражении (4), и поэтому влиянием первого на погрешность измерений можно пренебречь.

Погрешность измерений, вносимая тепловым расширением наконечника, можно определить как $\Delta I_T = \Delta \Psi_{изм} \cdot \lambda$, и с учетом подстановки выражения (4) получим

$$\Delta I_T = 0,76 \Delta I_{нак}. \quad (6)$$

Для обеспечения постоянного отраженного оптического потока независимо от касания изделия с сапфировым наконечником в нем обеспечивается режим полного внутреннего отражения (ПВО)

света от внешней поверхности наконечника. Тогда значение предельного угла α_{np} , для выполнения условия ПВО определяется показателями преломления сапфира $n_{спф}$ и СОЖ $n_{сож}$, являющейся для него внешней средой

$$\alpha_{np} = \arcsin \frac{n_{сож}}{n_{спф}}. \quad (7)$$

Общий ход света в сапфировом наконечнике от теплового расширения с учетом двойного прохождения через него равен $I_1 + I_2 = \Delta l$ и через тригонометрические соотношения с участием угла α_{np} и с учетом выражения (6) и того, что увеличение его толщины $\Delta l_{нак}$ приводит к соответствующему увеличению длины хода, запишем

$$\Delta l'_T = \frac{0,76 \Delta l_{нак}}{\cos \alpha_{np}}. \quad (8)$$

Подставляя (7) в (8), получаем

$$\Delta l'_T = \frac{2 \Delta l_{нак}}{\cos \left(\arcsin \frac{n_{сож}}{n_{спф}} \right)}. \quad (9)$$

Тепловое расширение сапфирового наконечника приводит к фазовому сдвигу, определяющему температурную погрешность, и к поперечным смещениям точки полного внутреннего отражения и отраженного оптического потока.

При этом известно, что $\cos(\arcsin \alpha) = \sqrt{1 - \sin^2(\arcsin \alpha)} = \sqrt{1 - \alpha^2}$.

Поэтому можно записать $\cos \left(\arcsin \frac{n_{сож}}{n_{спф}} \right) = \sqrt{1 - \left(\frac{n_{сож}}{n_{спф}} \right)^2}$ и при подстановке $n_{спф} = 1,76$ и $n_{сож} = 1,47$ получаем $\cos \alpha_{np} = \sqrt{1 - \left(\frac{1,47}{1,76} \right)^2} \approx \sqrt{1 - 0,7} = 0,55$. Тогда выражение (9) принимает

вид:

$$\Delta l'_T = \frac{2 \Delta l_{нак}}{0,55} = 3,64 \cdot \Delta l_{нак}. \quad (10)$$

Значение линейного расширения сапфирового наконечника $\Delta l_{нак}$, охлаждаемого СОЖ при нагреве ΔT на 20°C от 20°C до 40°C , можно рассчитать по формуле

$$\Delta l_{нак} = \beta \cdot l_0 \cdot \Delta T, \quad (11)$$

где β — коэффициент линейного расширения сапфира, l_0 — исходная толщина сапфирового наконечника.

Коэффициент линейного расширения сапфира β , в свою очередь, сам является переменной величиной, зависящей от температуры $\beta(T)$, формулу для которого, согласно [25], следует записать с учетом небольшого упрощения в следующем виде

$$\beta(T) = 5,58 \cdot 10^{-6} + 3,35 \cdot 10^{-9} \cdot T. \quad (12)$$

С учетом полученных выражений (10)–(12) можно записать итоговую формулу для температурной погрешности $\Delta l'_T$

$$\begin{aligned} \Delta l'_T &= 0,76 \cdot 3,64 (5,58 \cdot 10^{-6} + 3,35 \cdot 10^{-9} T) l_0 \cdot \Delta T = \\ &= (15,4T + 9,3 \cdot 10^{-3} T^2) l_0 \cdot 10^{-6}. \end{aligned} \quad (13)$$

Согласно полученной формуле, произведен расчет значений при нагреве наконечника на 20°C для трех значений толщины наконечника: 1 мм, 2 мм и 3 мм, а результаты расчетов в виде трех графиков представлены на рис. 4.

Как следует из расчетов значения температурных погрешностей составляют $\Delta l'_T$ соответственно 0,3 мкм, 0,6 мкм и 0,9 мкм для наконечников толщиной 1 мм, 2 мм и 3 мм.

2.2.2. Расчет поперечных смещений отраженного оптического потока. При угловом освещении лазерным лучом точки контакта изделия с наконечником его продольное тепловое расширение приводит также к поперечным смещениям отраженного оптического потока, которые можно рассчитать по формуле

$$\Delta l_n = 2 \Delta l'_T \cdot \operatorname{tg} \alpha_{np} = 2 \Delta l'_T \cdot \operatorname{tg} \left(\arcsin \frac{n_{сож}}{n_{спф}} \right). \quad (14)$$

Согласно тригонометрическим соотношениям известно, что $\operatorname{tg}(\arcsin \alpha) = \frac{\alpha}{\sqrt{1 - \alpha^2}}$ и поэтому выражение (14) следует изменить к следующему:

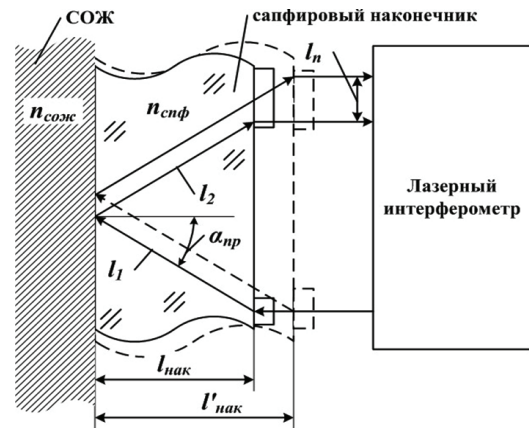


Рис. 3. Ход оптического потока измерительного канала лазерного интерферометра внутри сапфирового наконечника при его тепловом расширении

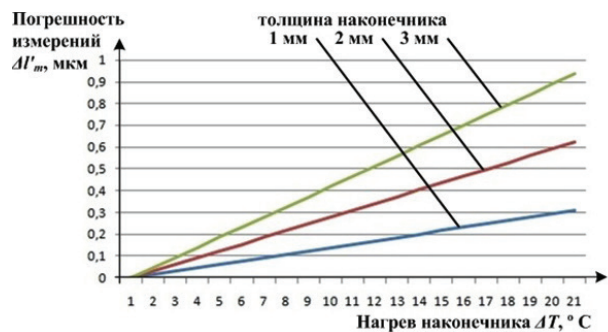


Рис. 4. Графики температурной погрешности сапфирового наконечника

$$\Delta l_n = 2\Delta l'_T \cdot \operatorname{tg} \alpha_{np} =$$

$$= 2\Delta l'_T \cdot \operatorname{tg} \left(\arcsin \frac{n_{\text{сож}}}{n_{\text{спф}}} \right) = 2\Delta l'_T \frac{\frac{n_{\text{сож}}}{n_{\text{спф}}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{n_{\text{сож}}}{n_{\text{спф}}} \right)^2}}. \quad (15)$$

При подстановке значений $n_{\text{спф}} = 1,76$ и $n_{\text{сож}} = 1,47$ и рассчитывая, что $\frac{n_{\text{сож}}}{n_{\text{спф}}} = \frac{1,47}{1,76} = 0,835$, получаем

$$\frac{\frac{n_{\text{сож}}}{n_{\text{спф}}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{n_{\text{сож}}}{n_{\text{спф}}} \right)^2}} = \frac{0,835}{0,55} \approx 1,5, \text{ а значит,}$$

$$\Delta l_n \approx 3\Delta l'_T. \quad (16)$$

Используя полученную формулу с учетом рассчитанных значений $\Delta l'_T$ для трех значений толщины наконечников, получим соответственно 0,9 мкм, 1,8 мкм и 2,7 мкм. Как видно, эти полученные результаты существенно меньше диаметра лазерного пучка, равного 1–2 мм, обычно используемого в лазерных интерферометрах. Поэтому влиянием негативных последствий поперечных смещений отраженного оптического потока можно пренебречь.

2.2.3. Последствия износа передней поверхности наконечника ПАК от контактных измерений размеров изделий. Износ $\Delta l_{\text{изн}}$ передней поверхности сапфирового наконечника в результате его механического контактирования с поверхностью изделия по характеру полностью аналогичен тепловому расширению тела наконечника, но имеет обратный знак.

Значение $\Delta l_{\text{изн}}$ определенное для сапфирового наконечника экспериментально [10] и не превышающее 2–4 мкм, может быть скомпенсировано периодической калибровкой ПАК. Возникающие от износа наконечника поперечные смещения Δl_n отраженного оптического потока, следующего в лазерный интерферометр, определенные с помощью выражения (16), составят не более 12 мкм и также существенно меньше диаметра лазерного пучка, равного 1–2 мм, обычно используемых в лазерных интерферометрах. Поэтому негативными последствиями влияния $\Delta l_{\text{изн}}$ также можно пренебречь.

2.3. Расчет температурной погрешности наконечника ПАК с введением опорного канала в лазерный интерферометр. Для уменьшения погрешности измерений, вносимой ее температурной составляющей, обусловленной тепловым расширением наконечника, предложено создать опорный канал лазерного интерферометра за счет установки на заднюю поверхность наконечника светоделительной призмы (рис. 5). Эта призма изготавливается из кварцевого стекла, обладающего одним из самых малых ТКЛР: от $3,5$ до $6,0 \cdot 10^{-7} \text{ гр}^{-1}$. Она используется для формирования из потока света, освещающего внешнюю грань наконечника, света для опорного канала лазерного интерферометра.

Для данного технического решения результат измерений можно записать в виде системы уравнений для результатов измерений l_0 в измерительном $l_{\text{изм}}$ и опорном $l_{\text{оп}}$ каналах интерферометра с учетом температурной погрешности от нагрева наконечника $\Delta l'_T$:

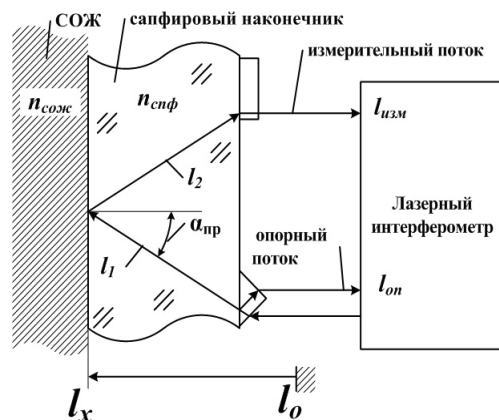


Рис. 5. Ход лучей лазерного интерферометра с формированием опорного канала

$$\begin{cases} l_{\text{изм}} = l_0 + \Delta l'_T, \\ l_{\text{оп}} = l_0 \end{cases} \quad (17)$$

Решая эту систему уравнений с учетом выражения (10), можно определить искомое значение положения внешней поверхности наконечника в виде следующей формулы:

$$l_x = l_0 + \frac{l_{\text{изм}} - l_0}{3,64}. \quad (18)$$

Как следует из полученного выражения, в данном техническом решении температурная погрешность исключается практически полностью, как минимум, до погрешности округления, производимых при расчетах в лазерном интерферометре, не превышая в итоге $\Delta l_{\text{ли}} = 0,2 \text{ нм}$.

3. Итоговый расчет погрешностей ПАК. Как следует из представленного выше материала и в соответствии с выражением (2), погрешность ПАК $\Delta l_{\text{пак}}$ при использовании наконечника $\Delta l'_T$, обусловленная его тепловым расширением, существенно превышает погрешность лазерного интерферометра $\Delta l_{\text{ли}}$ и поэтому последней можно пренебречь. При этом погрешность ПАК $\Delta l_{\text{изм}}$ равна 0,3 мкм, 0,6 мкм и 0,9 мкм для наконечников толщиной 1 мм, 2 мм и 3 мм соответственно. Как видно, при всех исходных данных максимальное значение погрешности ПАК $\Delta l_{\text{пак}}$ определенное по формуле (2), для толщины наконечника 3 мм превышает 1 мкм, что является реально желаемым ориентиром при создании современных ПАК.

При введении опорного канала в лазерный интерферометр погрешность ПАК $\Delta l_{\text{пак}}$ также определенная по формуле (2), составит значение $0,2\sqrt{2} \text{ нм} \approx 0,28 \text{ нм} \approx \frac{\lambda}{2000}$. Полученное значение является достаточно высоким достижением в повышении точности измерений лазерных ПАК с корундовыми наконечниками и демонстрирует реальную возможность существенного повышения точности измерений при введении опорного канала.

Закключение.

1. Погрешность измерений лазерных ПАК с корундовыми наконечниками $\Delta l_{\text{пак}}$ определяется двумя основными составляющими: погрешность измерений лазерного интерферометра $\Delta l_{\text{ли}}$ и температурной погрешностью наконечника, связанной с его тепловым расширением $\Delta l'_T$. При этом значе-

ние температурной погрешности наконечника при нагреве наконечника на 20 °С не превысит 0,3 мкм, 0,6 мкм и 0,9 мкм для толщины наконечника, равной 1 мм, 2 мм и 3 мм, и имеет существенное преобладание в общем значении $\Delta l_{\text{нак}}$.

2. Введение опорного канала лазерный интерферометр, измеряющего смещения тыльной поверхности наконечника, возникающего от его теплового расширения $\Delta l_{\text{нак}}$, существенно уменьшает температурную составляющую погрешности, доводя за счет пересчета ее значения, сопоставимого с $\Delta l_{\text{ли}}$.

3. Тепловое расширение наконечника $\Delta l_{\text{нак}}$ приводит к поперечным смещениям $\Delta l_{\text{попер}}$ отраженного оптического потока, следующего в лазерный интерферометр. Однако при максимальном нагреве на 20 °С наконечника, выполненного толщиной 1–3 мм, значения $\Delta l_{\text{ли}}$ составляют не более 10 мкм, что существенно меньше диаметра лазерного пучка, равного 1–2 мм, обычно используемых в лазерных интерферометрах. Поэтому негативными последствиями влияния $\Delta l_{\text{попер}}$ можно пренебречь.

4. Износ передней поверхности наконечника $\Delta l_{\text{изн}}$, возникающий в результате механического контактирования с поверхностью изделия и приводящий к утоньшению наконечника, аналогичен по характеру теплового расширения наконечника $\Delta l_{\text{нак}}$, но имеет обратный знак. Значение $\Delta l_{\text{изн}}$ определенное для сапфирового наконечника экспериментально и не превышающее 2–4 мкм, может быть скомпенсировано периодической калибровкой ПАК. Возникающие от износа наконечника поперечные смещения $\Delta l_{\text{ли}}$ отраженного оптического потока, следующего в лазерный интерферометр, составят не более 12 мкм и также существенно меньше диаметра лазерного пучка, равного 1–2 мм, обычно используемых в лазерных интерферометрах. Поэтому негативными последствиями влияния $\Delta l_{\text{изн}}$ также можно пренебречь.

5. Общая погрешность измерений лазерных ПАК с корундовыми наконечниками может составлять:

— без опорного канала лазерного интерферометра: 0,3 мкм, 0,6 мкм и 0,9 мкм для наконечников толщиной 1 мм, 2 мм и 3 мм соответственно;

— с опорным каналом лазерного интерферометра — не более $0,28 \text{ нм} \approx \frac{\lambda}{2000}$.

Библиографический список

1. Волосов С. С., Педь Е. И. Приборы для автоматического контроля в машиностроении. М.: Машиностроение, 1970. 310 с.
2. Кондашевский В. В., Лотце В. Активный контроль размеров деталей на металлорежущих станках. Омск: Зап.-Сиб. кн. изд-во, Омское отд-ние, 1976. 431 с.
3. Высоцкий А. В., Соболев М. П., Этингоф М. И. Активный контроль в металлообработке. М.: Изд-во стандартов, 1979. 175 с.
4. Сайт АО «НИИИзмерения». URL: http://www.micron.ru/production/active_instruments/bv-4304/ (дата обращения: 10.02.2018).
5. Пат. 2557381 Российская Федерация, МПК В 24 В 49/00, G 01 В 7/12. Способ активного контроля линейных размеров в процессе обработки изделия и устройство для его реализации / Леун Е. В., Леун А. В.; заявл. 28.11.2013; опубл. 20.07.2015, Бюл. № 20.
6. Леун Е. В. Разработка приборов активного контроля размерных параметров изделий с использованием сапфировых измерительных наконечников // Омский научный вестник. 2016. № 4 (148). С. 123–127.
7. Leun E. V., Leun V. I., Sysoev V. K., Zanin K. A., Shulepov A. V., Vyatlev P. A. The active control devices of the size of products based on sapphire measuring tips with three degrees of freedom // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 944. 2017. Vol. 1. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012073. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/944/1/012073> (дата обращения: 04.02.2018).
8. 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. 89–95.
9. 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. 27.11.2016, Бюл. № 33.
10. Леун Е. В., Шулупов А. В. Исследование и разработка сапфировых измерительных наконечников для приборов активного контроля размерных параметров изделий // Омский научный вестник. 2017. № 3 (153). С. 91–95.
11. Соболев М. П., Этингоф М. И. Автоматический размерный контроль на металлорежущих станках. Смоленск: Ойкумена, 2005. 300 с. ISBN 5-93520-047-3.
12. Леун В. И. Повышение эффективности технологии изготовления и точности измерения линейных размеров изделий инструментального производства, прецизионных деталей приборов и машин средствами автоматического контроля: моногр. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2006. С. 41.
13. Карпеева Е. В., Яковлев А. А., Горбунов В. В. Предпосылки создания прибора активного контроля нового поколения для шлифовального станка // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: межвуз. науч. сб. Саратов, 2003. С. 122–125.
14. Белолопотков Д. А., Добровинский И. Р., Медведик Ю. Т. Повышение точности активного контроля размеров деталей в процессе изготовления // Мир измерений. 2007. № 7. С. 43–46.
15. Industrial metrology: modern measuring systems for monitoring quality in production processes. URL: <https://www.jenoptik.com/products/metrology> (дата обращения: 08.02.2018).
16. Keferstein C. P., Honegger D., Thurnherr H. [et al.]. Process monitoring in non-circular grinding with optical sensor // CIRP Annals — Manufacturing Technology. 2008. Vol. 57. P. 533–536. URL: https://www.kellenberger.com/newswriter_files/CIRP_Tagungsband_S_533-536_Keferstein.pdf (дата обращения: 18.02.2018).
17. Gao Y., Huang X., Zhang Y. Development of an in-process form error measurement system for surface grinding. URL: http://ets.ifmo.ru/tomasov/konferenc/AutoPlay/Docs/Volume%202/4_22.pdf (дата обращения: 18.02.2018).
18. Marposs. URL: <http://www.marposs.com> (дата обращения: 18.02.2018).
19. Преобразователь линейных перемещений ЛИР-3. Каталог продукции СКБ ИС. Инкрементные линейные фотоэлектрические преобразователи. URL: <http://www.skbis.ru/index.php?p=3&c=1&d=118> (дата обращения: 18.02.2018).
20. Акопян С. А. Исследование воздействия электростатического поля на режущую пластину из синтетического корунда // Вестник ГИУА. Сер. Механика, машиноведение, машиностроение. 2012. Вып. 15, № 1. С. 63–70.
21. Пат. 2418669 РФ, МПК В24В 1/00, В24В 51/00. Способ шлифования изделий из сверхтвердых и хрупких материалов / Гридин О. М., Теплова Т. Б.; заявл. 07.12.09; опубл. 20.05.11, Бюл. № 14.
22. Игнатов С. А. Повышение разрешающей способности лазерных измерительных систем для контроля оборудования ГПС методом акустооптоэлектронной обработки информации: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1987. 18 с.
23. Леун Е. В. Особенности схемотехники акустооптических лазерных систем для измерения перемещений с фазо-

цифровым преобразованием // Технология машиностроения. 2002. № 5. С. 33–39.

24. Оптические характеристики Al_2O_3 (сапфир — искусственный корунд) // Сайт ARD-Optics. URL: <http://rus.ardoptics.com/material/sapphire-artificial-corundum.html> (дата обращения: 18.02.2018).

25. Баходдин С. И., Галактионов Е. В., Тропп Э. А. Расчет термических напряжений в профилированных монокристаллах при учете температурной зависимости теплового расширения // Журнал технической физики. 2010. Т. 80, вып. 11. С. 1–5.

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

ЛЕУН Владимир Исидорович, доктор технических наук, профессор секции «Метрология и приборо-

строение» кафедры «Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология» Омского государственного технического университета.

ШАХАНОВ Александр Евгеньевич, кандидат технических наук, начальник отдела АО «НПО Лавочкина».

Адрес для переписки: stankin1999@mail.ru

Для цитирования

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. 98–104. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-98-104.

Статья поступила в редакцию 19.02.2018 г.

© Е. В. Леун, В. И. Леун, А. Е. Шаханов

УДК 621.391.8

DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-104-109

Г. М. СИДЕЛЬНИКОВ
Д. В. ОГНЕВ

Сибирский
государственный университет
телекоммуникаций и информатики,
г. Новосибирск

ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ РАЗНЕСЕННОГО ПРИЕМА СИГНАЛОВ С ФАЗОВОЙ И ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ В КАНАЛАХ С МНОГОЛУЧЕВОСТЬЮ

Рассматривается помехоустойчивость разнесенного приема сигналов с фазовой (ФМ) и относительной фазовой модуляцией (ОФМ) в каналах с многолучевостью при действии аддитивной гауссовской помехой. В основу анализа помехоустойчивости положено рассмотрение деформации сигнальных расстояний из-за многолучевости, где второй луч представлял совокупность многих других лучей. Подробный анализ необходим для определения предельной помехоустойчивости, разных видов модуляции в системах с разнесением. Полученные зависимости сигнальных расстояний от тонкой структуры многолучевого поля позволяют определить эффективность разнесенного приема сигналов с ФМ и ОФМ в каналах со многолучевостью при действии аддитивной гауссовской помехи.

Ключевые слова: многолучевое поле, сигнальное расстояние, потенциальная помехоустойчивость, вероятность ошибок.

Введение. Системы передачи информации с пространственным разнесением сигналов рассматривались как в отечественной [1], так и в зарубежной литературе [2]. Свое дальнейшее развитие они получили после работ Аламоути [3], где предложена была схема разнесения сигналов на передающей стороне, которая возможна при математической обработке сигналов в реальном времени [4].

При анализе эффективности систем с пространственным разнесением на приемной стороне рассматривалось сложение, максимизирующее отношение сигнал — шум сигналов, автовыбор и сло-

жение с равными весам [5]. Обработка в схеме сложения сигналов производилась на основе анализа принимаемого сигнала.

Для систем передачи информации помехоустойчивость выбранного ансамбля сигналов полностью определялась сигнальным расстоянием, которое характеризовало помехоустойчивость системы в целом [6].

С увеличением кратности модуляции и использовании каналов с селективными замираниями повышение помехоустойчивости требовало использование пилот-сигналов [7], что позволяло