

УДК 681.723.26; 681.786.5

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ СКАНИРОВАНИЯ В ОПТИЧЕСКОМ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОМ МИКРОСКОПЕ

© И. А. Выхристюк, Р. В. Куликов, Е. В. Сысоев

*Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН,
630058, г. Новосибирск, ул. Русская, 41
E-mail: uic@tdisie.nsc.ru*

Приводятся результаты исследования неравномерности сканирования в оптическом интерференционном микроскопе, выполненные с помощью микрометрического стола и пьезокерамического актюатора. Регистрация интерференции в процессе сканирования осуществлялась быстродействующей цифровой видеокамерой, что позволило подробно зарегистрировать интерференционный сигнал. На полученных результатах сканирования показана неоднородность расстояний между соседними интерференционными полосами вдоль оси отсчётов — номера кадра. Представлена процедура, позволяющая значительно уменьшить величину неоднородности. Применение такой процедуры позволяет сформировать метрическую шкалу вдоль оси сканирования, которая может быть использована при выполнении высокоточных интерференционных измерений микрорельефа поверхности.

Ключевые слова: сканирование фазы интерференции, интерференционные измерения, неравномерность сканирования.

DOI: 10.15372/AUT20240411

EDN: PNJEUC

Введение. Сканирующая интерферометрия является одним из самых продвинутых способов микроскопических исследований [1, 2]. Множество выполненных работ было направлено на улучшение характеристик данного способа как посредством алгоритмов [3, 4], так и с применением новых схмотехнических решений [5, 6].

В системах, реализующих такой способ, для изменения разности оптического хода между интерферирующими пучками света в основном используется либо пьезокерамический актюатор, либо моторизованный микрометрический стол, либо совокупность этих устройств [7–9]. Также существуют решения [10, 11], когда для измерения рельефа поверхности достаточно выполнить съёмку одного кадра. Для этого в работе [10] используется поляризационно-пиксельная видеокамера, позволяющая за один кадр получить четыре сдвинутых по фазе изображения. В [11] профиль рельефа поверхности измеряется по величине искривления интерференционных полос. В основном такие решения применяются для измерения чистых поверхностей с плавным изменением профиля высоты в диапазоне от 0 до $\lambda/2$.

Пьезокерамический актюатор, используемый в современном интерференционном микроскопе, обеспечивает прецизионное сканирование в достаточно большом диапазоне от 0 до 200 мкм. Такие устройства состоят из нескольких собранных в пакет пьезокерамических элементов, обладающих своей собственной нелинейной зависимостью напряжения от положения. С применением обратной связи и калибровки пьезоактюатора получают линейную зависимость напряжения от положения [12]. Также существуют способы алгоритмически устранить нелинейность сканирования [13]. Такие возможности позволяют его использовать как в микро-, так и в нанодиапазоне.

В настоящее время стало проблематичным приобретение импортного высокотехнологического оборудования, к которому можно отнести прецизионный пьезокерамический

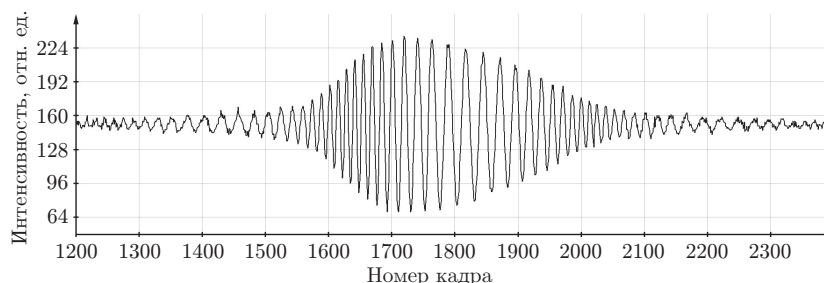


Рис. 1. Коррелограмма: зависимость интенсивности света от номера интерферограммы (кадра)

актюатор с большим диапазоном сканирования. Также существуют задачи, которые требуют большего диапазона измерений. Для этого может применяться микрометрический стол, диапазон сканирования которого значительно больше.

В большинстве оптических интерференционных микроскопов используются столы с диапазоном сканирования до 100 мм. Применение микрометрического стола позволяет выполнять измерения грубых, шероховатых поверхностей, при этом вертикальное разрешение измерений не превышает 0,3 мкм.

Для использования стола при проведении измерений более высокого разрешения необходимо подробнее регистрировать интерференционный сигнал. Такая возможность существует, если использовать относительно высокоскоростную камеру, например ~100 кадр/с, и микрометрический стол, позволяющий выполнять перемещения интерферометра со скоростью, например 1 мкм/с. Однако на полученном интерференционном сигнале могут наблюдаться искажения, связанные с тем, что скорость перемещения каретки стола и/или скорость съёмки кадров могут меняться в процессе регистрации интерферограмм.

Целью данной работы является уменьшение влияния факторов, искажающих интерференционный сигнал, путём формирования метрической шкалы вдоль оси сканирования. Приводятся описание процедуры, которая значительно уменьшает эти искажения, и результаты натурных экспериментов.

Неравномерность сканирования. На рис. 1 показан пример фрагмента интерференционного сигнала (коррелограмма) для одного пикселя интерферограммы. Зависимость была получена на оптическом интерференционном микроскопе из набора интерферограмм, сохранённых в процессе сканирования. Интерферограммы регистрировались ПЗС-камерой Imrex B1641M со скоростью съёмки ~80 кадр/с, установленной в интерферометре микроскопа. Сканирование выполнялось со скоростью 1 мкм/с с помощью микрометрического стола MARZHAUSER SCANplus 50, на каретке которого располагался интерферометр. В качестве источника света в интерферометре применялся светодиод с эффективной длиной волны $\lambda = 467,18$ нм.

Из приведённого на рис. 1 фрагмента видно, что коррелограмма искажена, т. е. расстояние между соседними полосами вдоль оси номера кадра непостоянно и изменялось в процессе сканирования. Для того чтобы определить это изменение, применяется алгоритм обнаружения полос, описанный ниже.

Алгоритм обнаружения полос. Алгоритм обнаружения полос заключается в определении области коррелограммы, где интерференционные явления имеют значимую амплитуду, и фиксации координаты по оси сканирования, в которой находится каждая интерференционная полоса.

В процессе сканирования средний уровень интенсивности может медленно изменяться в достаточно большом диапазоне. Также в коррелограмме присутствует высокочастотный

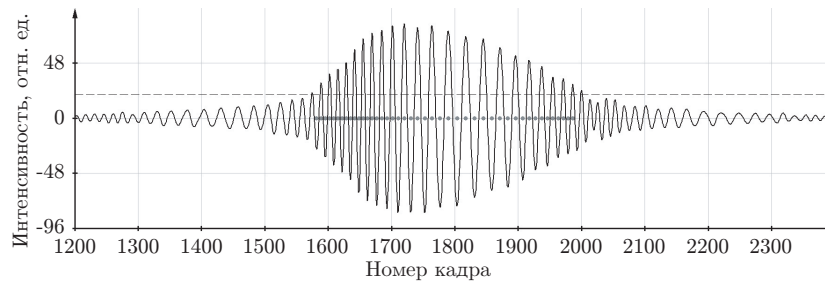


Рис. 2. Результат обнаружения интерференционных полос: сплошная линия — коррелограмма, штриховая — уровень, определяющий границы области обнаружения, точки — положение полос



Рис. 3. Зависимость расстояния между интерференционными полосами от номера кадра: график 1 (серая линия с точками) — для одной коррелограммы, график 2 (чёрная линия) — для множества коррелограмм

шум, который может помешать алгоритму выполнить обнаружение полос. Поэтому выполняется фурье-фильтрация коррелограммы окном, границы начала i_n и конца i_k которого определяются как

$$i_n = 0,5i_{\text{ц}}, \quad i_k = 1,75i_{\text{ц}},$$

где $i_{\text{ц}} = N(V/FPS)/\lambda$ — положение основной частоты интерференционного сигнала; N — количество отсчётов в коррелограмме, кратное 2; V — скорость перемещения каретки микрометрического стола (мкм/с); FPS — скорость съёмки видеокамеры (1/с); λ — эффективная длина волны источника света, используемого в интерферометре (мкм). Значения коэффициентов при вычислении i_n и i_k выбирались таким образом, чтобы не вносить значимые искажения в исходный сигнал. При фильтрации частоты вне окна приравняются к нулю.

В полученной после фурье-фильтрации коррелограмме границы области, в которой выполняется обнаружение полос, определяются на уровне $I_{\text{макс}}/4$. Пересечение коррелограммы с нулевым уровнем даёт положение полос. На рис. 2 показан результат обнаружения полос.

Искажение коррелограмм. Для исследования характера искажения коррелограмм построим график зависимости (рис. 3), по вертикальной оси которого отображаются значения расстояния D между соседними интерференционными полосами, по горизонтальной — номер кадра.

Видно, что максимальный разброс D составляет ~ 8 кадров или, если принять величину расстояния между соседними кадрами как $(V/FPS) = 12,5$ нм, равен 100 нм.

График 1 построен по результатам одной коррелограммы, которая не охватывает весь диапазон области сканирования. График 2 показывает более детальную зависимость D от

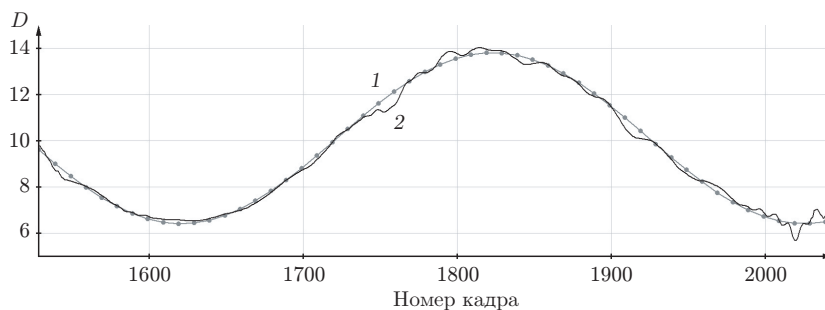


Рис. 4. Зависимость расстояния между интерференционными полосами от номера кадра: график 1 (серая линия с точками) — результат аппроксимации, график 2 (чёрная линия) — результат, полученный по экспериментальным данным

номера кадра, которая является усреднённым результатом, рассчитанным по коррелограммам в области 256×256 точек. Приведённая детализированная зависимость охватывает немного больший диапазон положений и позволяет предположить характер изменения перемещений, выполняемых в процессе сканирования.

Формирование метрической шкалы сканирования. Из рис. 3 видно, что зависимость имеет гармонический характер, и период соответствует примерно 5 мкм. Если принять во внимание, что шаг резьбы винта в микрометрическом столике 1 мм, а количество шагов двигателя на один оборот равно 200, то можно предположить, что обнаруженная неравномерность движения связана с неравномерностью скорости во время совершения двигателем одного шага.

Определив параметры этой гармонической функции и учитывая, что расстояние между соседними интерференционными полосами соответствует $\lambda/4$, можно построить метрическую шкалу вдоль оси сканирования и получить откорректированный сигнал.

Примем, что расстояние между интерференционными полосами меняется по синусоидальному закону:

$$D(n) = a_0 + a \sin((n + n_0)/T), \quad (1)$$

где a_0 и a — среднее расстояние и амплитуда изменения расстояния между полосами вдоль оси номера кадра, n и n_0 — текущий и начальный номера кадра, T — период.

Определить параметры такой зависимости можно с помощью метода минимизации среднеквадратичного отклонения искомой функции (1) относительно известной зависимости (см. рис. 3). Определённые таким способом параметры синусоидальной аппроксимации следующие: $a_0 = 10,1$; $a = 3,7$; $n_0 = 102$; $T = 405$. На рис. 4 показано сравнение экспериментального результата и полученной аппроксимации.

Теперь, имея зависимость $D(n)$, можно получить значение отклонения в любом положении на оси сканирования выполненного измерения. Расстояние, которое прошла каретка микрометрического стола в указанном номере кадра, может быть вычислено как

$$L(n) = (\lambda/4)/\Sigma D(n), \quad n \in [1; N], \quad (2)$$

где суммирование выполняется от начального положения каретки до положения n -го кадра (N — номер последнего кадра). На рис. 5 показана зависимость интенсивности интерференционного сигнала от положения каретки микрометрического стола. Зависимость этого сигнала от номера кадра была приведена на рис. 1.

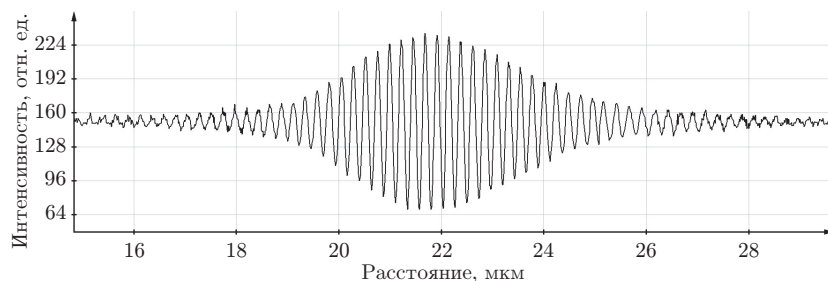


Рис. 5. Зависимость интенсивности интерференционного сигнала от положения каретки микрометрического стола

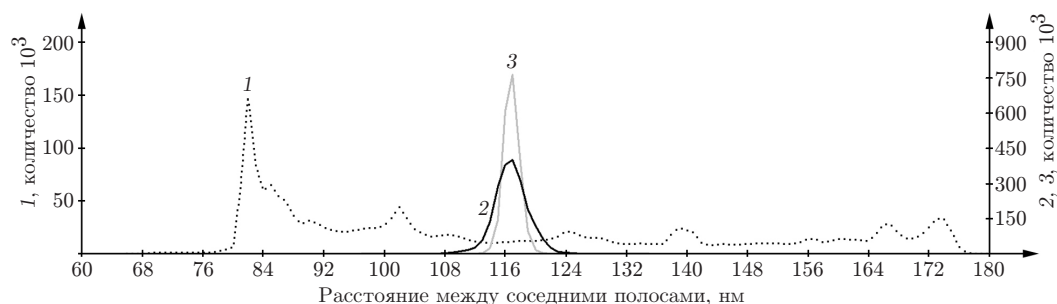


Рис. 6. Распределение расстояний между соседними интерференционными полосами: штриховая линия — гистограмма 1, сплошная чёрная линия — гистограмма 2, сплошная серая линия — гистограмма 3

Очевидно, что полученная зависимость имеет более постоянный период колебаний. Для того чтобы проверить, насколько уменьшилась неоднородность расстояний, было выполнено сравнение распределений значений расстояния между соседними интерференционными полосами до применения вышеописанной процедуры и после неё.

Расчёт распределений выполнялся по всем коррелограммам в области 256×256 точек. Результат, показанный на рис. 6, представляет собой гистограммы, где по оси абсцисс отображаются значения расстояний, по оси ординат — количество таких расстояний, встречающихся в коррелограммах.

Гистограмма 1 представляет собой график распределения расстояний для исходных коррелограмм (см. рис. 1, 2). Расстояние между соседними кадрами в этом случае определялось значением $(V/FPS) = 12,5$ нм.

Гистограмма 2 изображена в виде графика распределения для коррелограмм, прошедших процедуру уменьшения неоднородности расстояний между интерференционными полосами. Максимум в этом распределении наблюдается для расстояний 117 нм, что соответствует четверти длины волны используемого в интерферометре источника света. Ширина распределения у основания ~ 22 нм.

Гистограмма 3 представляет собой график распределения для коррелограмм, также прошедших процедуру уменьшения неоднородности расстояний, но без использования функции (1). В данном случае для расчёта метрической шкалы в качестве табличной функции использовалась сама зависимость (см. рис. 3). Максимум в этом распределении также наблюдается для расстояний 117 нм, а ширина у основания ~ 10 нм.

Применение табличной функции (гистограмма 3) для расчёта метрической шкалы ведёт к получению минимального разброса расстояний между интерференционными полосами. В случае использования функциональной зависимости (гистограмма 2) разброс расстояний в приведённом примере в 2,2 раза больше приведённого в гистограмме 3. При

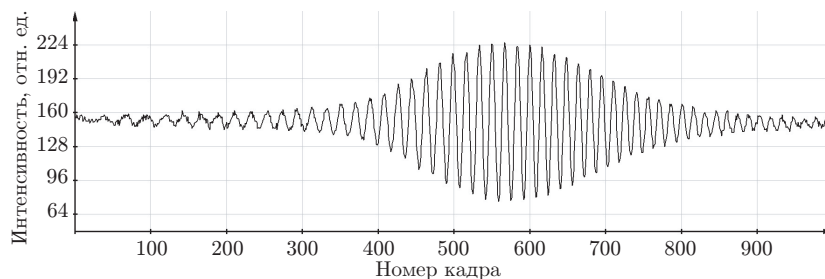


Рис. 7. Коррелограмма, полученная в процессе сканирования пьезокерамическим актюатором АПМ-2-11М

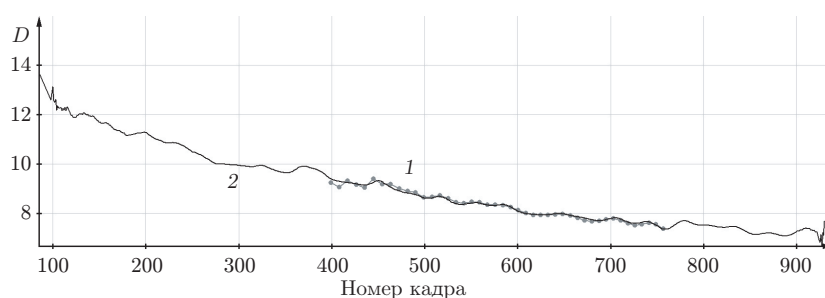


Рис. 8. Зависимость расстояния между интерференционными полосами от номера кадра: график 1 (серая линия с точками) — для одной коррелограммы, график 2 (чёрная линия) — для множества коррелограмм

этом метрическая шкала может быть определена на всём диапазоне сканирования в случае, если неоднородность процесса сканирования является периодичной.

Сканирование пьезокерамическим актюатором. Для примера предложенная процедура уменьшения неоднородности была использована на результатах сканирования, выполненных с применением пьезокерамического актюатора АПМ-2-11М. На рис. 7 приведена одна из коррелограмм, полученная в процессе сканирования. Каких-либо заметных искажений сигнала не наблюдается.

Однако, если построить зависимость расстояния D между соседними интерференционными полосами от номера кадра, то можно увидеть, что искажения всё же присутствуют (рис. 8). Серой линией с точками показано изменение величины D для коррелограммы, приведённой на рис. 7. Чёрная линия отображает усреднённое изменение величины D , рассчитанное по коррелограммам в области 256×256 точек.

Из рис. 8 видно, что в начале процесса сканирования изменение величины D сильнее, нежели в конце, где средний уровень величины на протяжении ~ 200 кадров меняется незначительно. В данном случае неоднородность сканирования определяется гистерезисом используемой пьезокерамики. Максимальный разброс значений D составил ~ 7 кадров, что соответствует 77 нм, если принять величину расстояния между соседними кадрами как $\{(\lambda/4)/[(\min(D) + \max(D))/2]\} \approx 11$ нм.

На рис. 9 приведено распределение расстояний между соседними интерференционными полосами для случая (гистограмма 1) постоянного шага сканирования и для случая (гистограмма 2), когда положение кадра вычисляется через выражение (2), где $D(n)$ используется в качестве табличной функции (см. рис. 8, график 2).

Ширина распределений у основания в гистограмме 1 равна ~ 60 нм, в гистограмме 2 — ~ 12 нм. Максимум распределения в первом случае не соответствует $\lambda/4 = 116,8$ нм, что

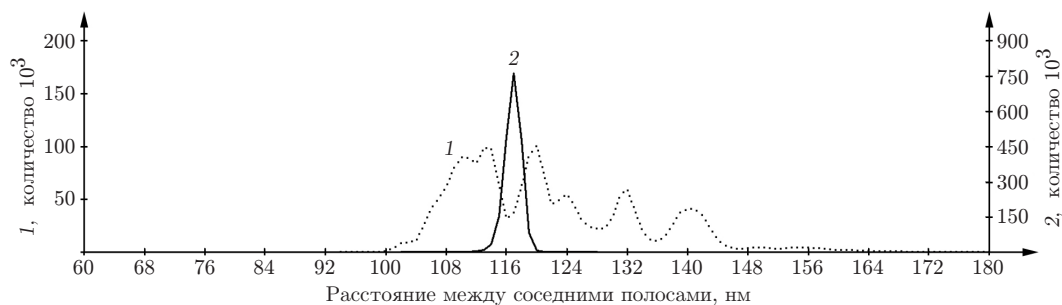


Рис. 9. Распределение расстояний между соседними интерференционными полосами: гистограмма 1 — штриховая линия, гистограмма 2 — сплошная чёрная линия

приведёт к значительным ошибкам при вычислении высот рельефа поверхности методом вертикально сканирующей интерферометрии.

Этот пример показывает, что даже в случае такого прецизионного устройства сканирования, как пьезокерамический актюатор, применение предложенной процедуры позволяет уменьшить присутствующую в процессе сканирования неоднородность и рассчитать метрическую шкалу.

Закключение. Приведённый пример неравномерности сканирования может быть несущественен в случае измерения рельефа поверхности в микрометрическом диапазоне, но при измерениях в нанодиапазоне может приводить к значительным ошибкам.

В работе показано, что применение моторизованного микрометрического стола и быстродействующей камеры позволяет выполнять прецизионную регистрацию коррелограмм, которые могут быть использованы при измерениях в нанодиапазоне. Неоднородность, возникающая в процессе сканирования, может быть значительно уменьшена с помощью предложенной процедуры — в приведённом примере в 10 раз. На основе приведённой аппаратной части (микрометрический стол и быстродействующая видеокамера) с применением процедуры уменьшения неравномерности сканирования может быть построена система, способная измерять рельеф поверхности в нанодиапазоне и не требующая дополнительного прецизионного линейного устройства сканирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Claveau R., Montgomery P., Flury M. Coherence scanning interferometry allows accurate characterization of micrometric spherical particles contained in complex media // Ultramicroscopy. 2020. **208**. DOI: 10.1016/j.ultramic.2019.112859.
2. Kim N., Lee S. W., Yongjun I., Pahk H.-J. Accurate roughness measurement using a method for evaluation and interpolation of the validity of height data from a scanning white-light interferometer // Curr. Opt. and Photon. 2017. **1**, Iss. 6. P. 604–612.
3. Luo S., Sasaki O., Choi S. et al. Advanced signal processing in a white-light scanning interferometer for exact surface profile measurement // Proc. of SPIE. 2018. **10819**. 108190N-1.
4. Sysoev E. V., Kulikov R. V. Microrelief measurements for white-light interferometer with adaptive algorithm interferogram processing // Key Eng. Mater. 2010. **437**. P. 35–39.
5. Serbes H., Gollor P., Hagemeyer S., Lehmann P. Mirau-based CSI with oscillating reference mirror for vibration compensation in in-process applications // Appl. Sci. 2021. **11**, Iss. 20. DOI: 10.3390/app11209642.

6. **Jeon J. W., Jeong H. W., Jeong H. B., Joo K.-N.** High-speed polarized low coherence scanning interferometry based on spatial phase shifting // *Appl Opt.* 2019. **58**, Iss. 20. P. 5360–5365.
7. **Liu X., Li J., Lu W.** PZT local linearity and image sampling strategy for white-light vertical scanning measurement // *Proc. of SPIE.* 2011. **8321**. 83213N.
8. **Chen W., Xiong Y., Chen J., Chen S.** Accurate white light phase-shifting interferometry under PZT scanning error // *Opt. and Lasers in Eng.* 2023. **169**. 107728. DOI: 10.2139/ssrn.4416293.
9. **Сысоев Е. В., Выхристюк И. А., Куликов Р. В.** Повышение достоверности интерференционных измерений при использовании нескольких длин волн // *Автометрия.* 2018. **54**, № 5. С. 64–72. DOI: 10.15372/AUT20180508.
10. **Jeon J. W., Joo K.-N.** Single-shot imaging of two-wavelength spatial phase-shifting interferometry // *Sensors.* 2019. **19**, Iss. 23. 5094. DOI: 10.3390/s19235094.
11. **Cao H.-L., Cheng Z.-H., Yu L.-Y.** Reconstruction of 3-D surface of mirror by processing fringe pattern // *Opt. and Precision Eng.* 2007. **15**, Iss. 4. P. 599–603.
12. **Bruno L., Maletta C.** Real-time calibration of open-loop piezoelectric actuators for interferometric applications // *Int. Journ. Mechan. and Mater. Design.* 2008. **4**, Iss. 2. P. 97–103.
13. **Sysoev E. V., Kulikov R. V., Vykhristyuk I. A., Chugui Yu. V.** Correction of scanning steps to improve accuracy in interferometric profilometer // *Meas. Sci. Rev.* 2015. **15**, N 1. P. 9–12.

Поступила в редакцию 29.12.2023

После доработки 30.05.2024

Принята к публикации 04.06.2024
