

Измерение параметров углового движения зеркала сканирующего устройства

Пётр Алексеевич Павлов¹, Елена Михайловна Иващенко²✉

^{1, 2} Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

¹pavl-petr@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6254-3145>

²emivashenko@etu.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-6666-995X>

Аннотация. Изучено сканирующее устройство для системы космического мониторинга окружающей среды. Основное внимание уделено исследованию параметров углового движения зеркала сканирующего устройства, поскольку равномерность вращения зеркала во многом определяет качество изображения поверхности Земли. Рассмотрен принцип и проанализированы результаты измерения параметров вращения в широком угловом диапазоне. Измерения выполнены с помощью динамического гониометра-автоколлиматора, откалиброванного на Государственном первичном эталоне единицы плоского угла ГЭТ 22-2014. Рассчитаны повторяемость средней угловой скорости зеркала сканирующего устройства и повторяемость начального угла сканирования. Отмечена нестационарность по математическому ожиданию и дисперсии в случайных отклонениях углового движения зеркала от линейного закона сканирования. С помощью вейвлет-анализа выявлена периодичность возбуждения колебаний в низкочастотной области спектра. Показана возможность применения динамического гониометра-автоколлиматора при измерении не только углового положения зеркала сканирующего устройства, но и угловой скорости.

Ключевые слова: динамический гониометр-автоколлиматор, сканирующее устройство, погрешность измерения

Для цитирования: Павлов П. А., Иващенко Е. М. Измерение параметров углового движения зеркала сканирующего устройства // Измерительная техника. 2021. № 6. С. 3–7. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-6-3-7>

Measurement of the angular motion parameters of the mirror of the scanning device

Petr A. Pavlov¹, Elena M. Ivashchenko²✉

^{1, 2} Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russia

¹pavl-petr@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6254-3145>

²emivashenko@etu.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-6666-995X>

Abstract. A scanning device for a space-based environmental monitoring system has been investigated. The main attention is paid to the study of the parameters of the angular motion of the mirror of the scanning device, the uniformity of rotation of which largely determines the quality of the image of the Earth's surface. The principle and results of measuring the parameters of the mirror rotation carried out in a wide angular range are considered. The measurements were performed using a dynamic goniometer-autocollimator, which has been calibrated at the State Standard of Plane Angle Unit GET 22-2014. The repeatability of the average angular velocity of the scanning device mirror and the repeatability of the initial scanning angle are calculated. Nonstationarity in mathematical expectation and variance in random deviations of the angular motion of the mirror from the linear law of scanning is noted. The use of wavelet analysis revealed the frequency of excitation of oscillations in the low-frequency region of the spectrum. The possibility of using the a dynamic goniometer-autocollimator for measuring not only the angular position of the scanning device mirror, but also the angular velocity is shown.

Keywords: dynamic goniometer-autocollimator, scanning device, measurement error

Введение. В системах мониторинга окружающей среды и космической технике для создания развёртки изображения применяются прецизионные оптико-механические сканирующие устройства [1]. Такие устройства выполняют линейную развёртку кадра с углом сканирования до 20° и

угловой скоростью около $14 \cdot 10^{-4}$ рад/с. Как правило, линейную развёртку кадра осуществляет сканирующее зеркало, угловое движение которого происходит по линейному закону с погрешностью в несколько десятых долей угловой секунды. В настоящее время не существует стандартизованных

средств измерений, позволяющих определять метрологические характеристики прецизионных оптико-механических сканирующих устройств бесконтактным способом в широком угловом диапазоне.

Цель статьи – продемонстрировать возможности измерения параметров углового движения сканирующего зеркала динамическим гониометром, который в режиме измерения внешнего угла выполняет функции автоколлиматора с диапазоном измерения 20° и погрешностью измерения на уровне десятой угловой секунды, а также проанализировать полученные данные.

Принцип работы динамического гониометра-автоколлиматора. Динамический гониометр-автоколлиматор (ДГА) состоит из оптико-механического блока, блока электроники и компьютера. Схема оптико-механического блока, содержащего корпус, сканирующую восьмигранную оптическую призму, опорное зеркало и оптический нуль-индикатор, приведена на рис. 1 [2].

Основное отличие принципа работы ДГА от динамического гониометра [3] для калибровки оптических призм заключается в том, что луч нуль-индикатора 4 не проходит через центр вращения оптической призмы 2. Вращающаяся оптическая призма в этом случае используется для пространственного сканирования светового луча нуль-индикатора. Также в состав ДГА вводится дополнительное опорное зеркало 5. Световой луч нуль-индикатора отражается от вращающейся

призмы и сканирует в плоскости, ортогональной оси вращения. Когда сканирующий луч падает нормально на опорное 5 или контролируемое 6 зеркала, нуль-индикатор вырабатывает импульсы считывания углового положения датчика угла 1, который вращается вместе с оптической призмой.

Процесс измерения угла носит дискретный характер. Частота обновления информации F определяется частотой вращения ν оптической призмы и числом её граней n : $F = n\nu$.

Диапазон сканирования луча нуль-индикатора зависит от величины центрального угла оптической призмы [4]. При его увеличении, как правило, уменьшается количество граней оптической призмы, увеличивается диапазон сканирования и уменьшается частота обновления информации об угловом положении контролируемого зеркала.

Максимальный диапазон сканирования при известных размерах сканирующей оптической призмы и начальном угле сканирования достигается, если расстояние от центра оптической призмы до центра светового луча нуль-индикатора (эксцентриситет e) удовлетворяет уравнению [4]:

$$e = 0,5[D \sin(\varphi_n + \gamma) - b],$$

где D – диаметр описанной вокруг оптической призмы окружности; φ_n – начальный угол сканирования, который определяется положением контрольного зеркала, установленного на основании лазерного динамического гониометра-автоколлиматора; γ – межгранный угол оптической призмы; b – ширина светового луча нуль-индикатора.

При построении ДГА число граней оптической призмы и её размеры подбираются исходя из решаемой задачи.

Основной погрешностью ДГА является систематическая погрешность, которая возникает из-за фазовых искажений волновых фронтов луча нуль-индикатора при его отражении от граней вращающейся оптической призмы [5]. Источник таких искажений – неплоскостность граней оптической призмы.

Систематическая погрешность ДГА определяется экспериментально при измерении постоянного внешнего угла. При повороте оптической призмы на угол 360° получаются значения измеряемого угла, отличающиеся от действительного угла на систематическую погрешность $\Delta\alpha_k$:

$$\Delta\alpha_k = \alpha_k - \bar{\alpha},$$

где $k=1..N$, N – количество граней оптической призмы ДГА (в используемом ДГА $N=8$); α_k – внешний угол, измеренный при отражении от k -й грани оптической призмы; $\bar{\alpha}$ – усреднённое по всем граням оптической призмы действительное значение угла.

Сумма систематических погрешностей при повороте оптической призмы на угол 360° равна нулю:

$$\frac{1}{N} \sum_k^N \Delta\alpha_k = 0.$$

При изменении углового положения контролируемого зеркала 6 происходит смещение светового луча нуль-индикатора

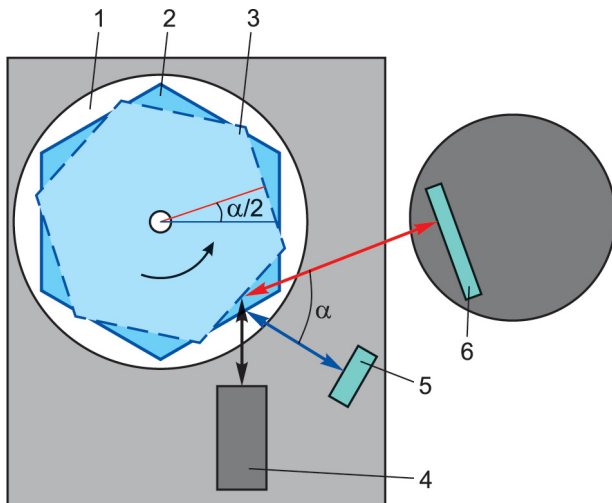


Рис. 1. Схема динамического гониометра-автоколлиматора с внешним зеркалом:

1 – оптический датчик угла; 2, 3 – положения многогранной призмы исходное и в момент измерения соответственно; 4 – нуль-индикатор; 5, 6 – опорное и внешнее контролируемое зеркала соответственно; α – измеряемый угол

Fig.1. Diagram of a dynamic goniometer-autocollimator with an external mirror:

1 – optical angle encoder; 2, 3 – the positions of the optical polygon at the beginning of the measurement range and at the time of measurement, respectively; 4 – null indicator; 5 – reference mirror; 6 – external controlled mirror; α – measured angle

по грани оптической призмы, что приводит к тому, что рассматриваемая систематическая погрешность может зависеть от измеряемого угла. Поэтому вводимые поправки $\Delta\alpha_k(\alpha)$ зависят от номера грани k оптической призмы и измеряемого угла α . Введение поправок $\Delta\alpha_k(\alpha)$ в измеренную систематическую погрешность ДГА позволило значительно уменьшить её значение.

Измерение параметров вращения сканирующего зеркала оптико-механического устройства. Конструктивно оптико-механическое сканирующее устройство состоит из оптико-механического блока и блока электроники [1]. В состав оптико-механического блока входит корпус, сканирующее зеркало, двигатель, датчик углового положения и узел вращения. Корпус оптико-механического блока выполнен в форме цилиндра. Сканирующее зеркало помещено в корпус в виде полого цилиндра и зафиксировано в нём на трёх сферах. Узел вращения спроектирован на дуплексных подшипниках качения с предварительным натяжением.

Движение узла сканирующего зеркала обеспечивается моментным двигателем, входящим в систему управления, в составе которой имеются датчик углового положения индукционного типа [6]. В исходном состоянии зеркало неподвижно, угловое движение зеркало начинает по синхрои импульсу «Скан», вырабатываемому сканирующим устройством, и продолжает в течение примерно трёх минут с последующим возвращением в исходное положение.

Схема измерения параметров углового движения сканирующего зеркала с применением ДГА соответствует схеме, приведённой на рис. 1. Оптико-механический блок ДГА устанавливали таким образом, чтобы оси вращения оптической призмы и сканирующего зеркала были параллельны, а диапазон сканирования зеркала находился в диапазоне измерения ДГА.

ДГА прокалиброван на Государственном первичном эталоне единицы плоского угла ГЭТ 22-2014 методом прямых измерений (СК 02-31-09 «Калибровка средств измерений. Алгоритмы обработки результатов измерений и оценивания неопределённости». Нормативный документ системы менеджмента качества ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»). Расширенная неопределённость измерений составила 0,1". Результаты калибровки приведены в табл. 1, где А – калибруемая точка диапазона измерений; Б – отклонение показаний ДГА от действительных значений угла.

Как следует из табл. 1, систематическая составляющая погрешности не превышает 0,2". Случайная составляющая результата измерения ДГА составляет сотые доли угловой секунды.

Результаты измерений параметров движения сканирующего зеркала. Важными характеристиками оптико-механического сканирующего устройства являются повторяемость начального положения сканирующего зеркала и нелинейность закона сканирования.

Исследование повторяемости. Как отмечалось выше, процесс измерения параметров движения сканирующего зеркала носит дискретный характер, моменты времени измерения углового положения в процессе сканирования

Таблица 1

Результаты калибровки ДГА

А, °	Б, "	А, °	Б, "
1	0,07	11	0,11
2	0,02	12	0,05
3	0,11	13	0,15
4	0,03	14	0,17
5	0,05	15	0,03
6	–0,07	16	–0,02
7	–0,14	17	–0,20
8	–0,15	18	–0,19
9	–0,15	19	0,04
10	0,00	20	0,09

Таблица 2

Линейная аппроксимация результатов измерения углового положения сканирующего зеркала

N	Ω , мкрад/с	α_0 , "
1	-1333,328	116963,99
2	-1333,327	116964,10
3	-1333,331	116964,27
4	-1333,328	116964,20
5	-1333,329	116964,18
6	-1333,326	116964,15
7	-1333,328	116964,47
8	-1333,327	116964,59
9	-1333,325	116964,67
Среднее	-1333,328±0,002	116964,29±0,08

определяются скоростью вращения оптической призмы и числом её граней. Момент прихода импульса «Скан» не синхронизирован с моментом измерения. Поэтому начальное положение сканирующего зеркала α_0 , т. е. его угловое положение в момент прихода импульса «Скан» и угловую скорость Ω , находили из измеренных угловых положений сканирующего зеркала α_k и времени их измерения t_k аппроксимацией данных линейной функцией $\alpha_k = \Omega t_k + \alpha_0$. Аппроксимацию проводили методом наименьших квадратов.

Вычисленные значения угловой скорости Ω и начального углового положения α_0 сканирующего зеркала представлены в табл. 2 для серии из девяти последовательных сканирований (где N – номер скана).

Как следует из табл. 2, повторяемости начального углового положения и угловой скорости составляют соответственно 0,24" и 0,002 мкрад/с. Угловые отклонения зеркала при линейном законе сканирования $\delta_k(t_k) = \alpha_k - (\Omega t_k + \alpha_0)$ показаны на рис. 2, а.

Исследование закона сканирования. Полученная последовательность угловых отклонений зеркала при линейном законе сканирования, представленная на рис. 2, а, исследована на стационарность методами, описанными в [7]. Установлено, что последовательность представляет собой

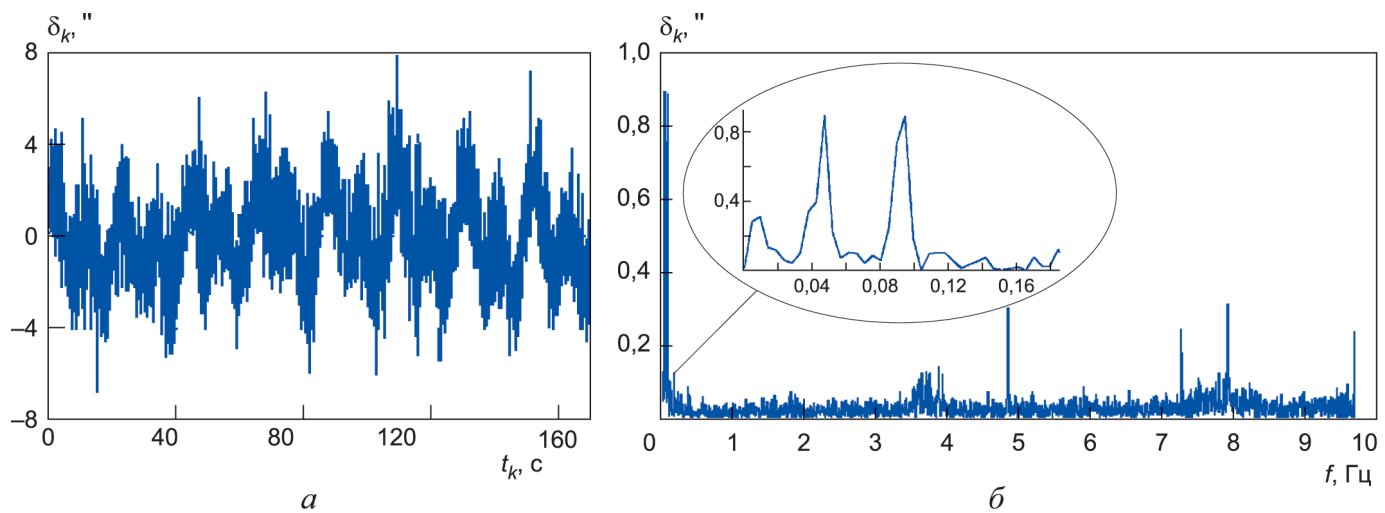


Рис. 2. Угловые отклонения $\delta_k(t_k)$ (а) и Фурье-спектр угловых отклонений (б) сканирующего зеркала при линейном законе сканирования

Fig. 2. Angular deviations $\delta_k(t_k)$ (a) and Fourier spectrum of angular deviations (b) of the scanning mirror with a linear law of scanning

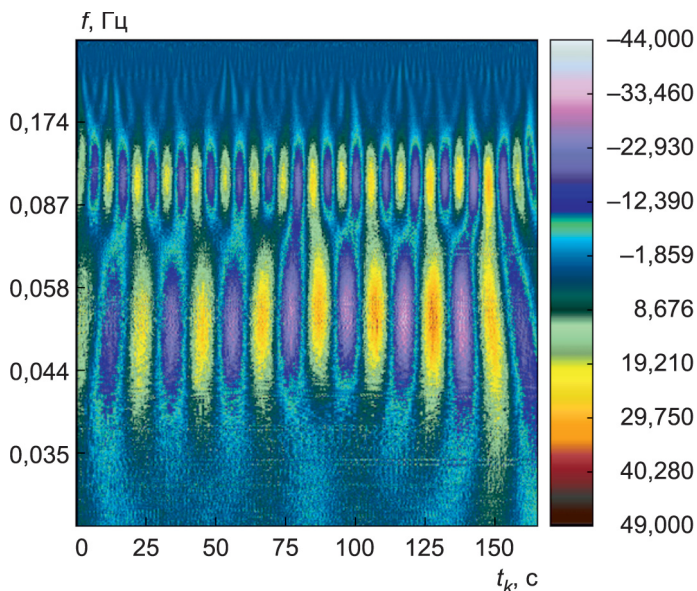


Рис. 3. Вейвлет-спектр угловых отклонений сканирующего зеркала при линейном законе сканирования

Fig. 3. Wavelet spectrum of angular deviations of the scanning mirror with its linear law of scanning

нестационарный по математическому ожиданию и дисперсии случайный процесс.

На рис. 2, б приведён Фурье-спектр угловых отклонений $\delta_k(t_k)$ зеркала при линейном законе сканирования. Частота измерения углового положения сканирующего зеркала с помощью ДГА составила приблизительно 19 Гц, что обеспечено восьмигранной оптической призмой, вращавшейся со скоростью около 3 с^{-1} . Из рис. 2 следует, что гармоники, определившие характер угловых отклонений $\delta_k(t_k)$ зеркала при линейном законе сканирования, располагаются в низкочастотной области спектра. Однако в силу нестационарности случайного процесса они не отражают в полной мере происходившие процессы.

Для дальнейшего анализа и выявления характера изменения гармоник нестационарного процесса во времени применён вейвлет-анализ [8–10]. Вейвлет-анализ отличается от анализа Фурье, прежде всего, базисными функциями. Базисными функциями вейвлет-преобразования являются вейвлеты – волновые функции заданной частоты, локализованные во времени и имеющие нулевое среднее значение. Вейвлет-спектр описывает энергию сигнала на определённой частоте f в конкретный момент времени. Тип базисной вейвлет-функции выбирается соответственно характеристикам анализируемого сигнала. При анализе гармоник нестационарного процесса в диапазоне 0,04–0,1 Гц в качестве базисной функции преобразования выбран вейвлет Морле, который локализован во временной и в частотной областях [11].

На рис. 3 приведён вейвлет-спектр области Фурье-спектра, выделенной на рис. 2, б: частоты в диапазоне 0,04–0,1 Гц периодически появляются и исчезают, а жёлтые и красные области соответствуют временам, когда эти частоты присутствуют в спектре сигнала. Проведённый вейвлет-анализ показал, что сигналы длительностью 6 с, возбуждаемые на частотах 0,04–0,06 Гц, проявляются через каждые 22 с, а сигналы длительностью 2 с на частотах 0,09–0,17 Гц – через каждые 11 с.

Представленные результаты вейвлет-анализа свидетельствуют, что существует периодически повторяющееся импульсное воздействие типа «удар». Красные области вейвлет-спектра показывают, что наибольшая интенсивность этого воздействия наблюдается через 105 и 125 с после начала сканирования. Опираясь на результаты исследований [12, 13], можно предположить, что периодическое возбуждение рассматриваемых частот вызвано характером движения шариков в дуплексных подшипниках качения узла вращения сканирующего зеркала.

Выводы. Проведённые исследования показали, что для измерения параметров вращения зеркала оптико-механического сканирующего устройства бесконтактным способом

с высокой точностью и в широком угловом диапазоне можно использовать динамический гониометр, выполняющий функцию автоколлиматора. Проанализировав полученные результаты измерения, установили, что повторяемости угловой скорости сканирующего зеркала и начального угла сканирования составили 0,002 мкрад/с и 0,24" соответственно. Вейвлет-анализ случайных отклонений от линейного закона сканирования выявил периодичность возбуждения колебаний в низкочастотной области спектра, причиной которых, с высокой степенью вероятности, является движение шариков в подшипниках качения узла вращения сканирующего зеркала.

С помощью ДГА измеряли не только угловое положение сканирующего зеркала, но и время этого измерения, что позволило вычислить угловую скорость сканирующего зеркала и частоты его колебаний. Дальнейшие исследования ДГА авторы настоящей статьи видят в направлении введения ДГА в ранг средства измерений угла и угловой скорости.

Финансирование. Работа осуществлена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 20-19-00412).

Список литературы

1. Рожавский Э. И., Моисеев П. П. Прецизионные оптико-механические сканирующие устройства системы дистанционного зондирования МСУ-ГС // *Механика, управление и информатика*. 2009. № 1. С. 503–509.
2. Павлов П. А. Разработка и исследование высокоточных лазерных гониометрических систем: автореф. дис. докт. техн. наук (СПбГЭТУ «ЛЭТИ», СПб., 2008).
3. Филатов Ю. В. Методы и средства лазерной гониометрии: автореф. дис. докт. техн. наук (ЛИТМО, СПб., 1992).
4. Павлов П. А., Филатов Ю. В., Юдин А. М. Лазерное угломерное устройство с расширенным диапазоном измерения // *Изв. Ленингр. электротехн. ин-та*. 1990. № 427. С. 63.
5. Борн М., Вольф Э. Основы оптики: Пер. с англ. Москва: Наука, 1970. 720 с.
6. Глаголев И. П., Дорохин Ю. П., Мамич В. Ф., Смирнов В. А., Фатеев В. Д. Двухканальный прецизионный преобразователь угла // *Измерительная техника*. 1991. № 4. С. 8–11.
7. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных: Пер. с англ. Москва: Мир, 1989. 540 с.
8. Mallat S. G., *A Wavelet Tour of Signal Processing*, 3rd ed., Academic Press, 2008, 832 p.
9. Pukhova V. M., Kustov T. V., Ferrini G., *2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, January 29 – February 1, 2018, Moscow – St. Petersburg, Russia, IEEE Publ., 2018, pp. 1141–1145. <https://doi.org/10.1109/EIConRus.2018.8317292>
10. Pukhova V., Ferrini G., *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Scanning Probe Microscopy 2017 (SPM-2017)*, August 27–30 2017, Ekaterinburg, Russia, 2017, vol. 256, 012004. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/256/1/012004>

(SPM-2017), August 27–30 2017, Ekaterinburg, Russia, 2017, vol. 256, 012004. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/256/1/012004>

11. Ashmead J., *Quanta*, 2012, vol. 1, no. 1, pp. 58–70. <https://doi.org/10.12743/quanta.v1i1.5>
12. Wang Liqin, Cui Li, Zheng Dezhi, Gu Le, *Chinese Journal of Aeronautics*, 2008, vol. 21, no. 1, pp. 86–96. [https://doi.org/10.1016/S1000-9361\(08\)60012-6](https://doi.org/10.1016/S1000-9361(08)60012-6)
13. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя. Том 2. Москва: Машиностроение, 2001. 912 с.

References

1. Rozhavskii E. I., Moiseev P. P., *Precizionnye optiko-mekhanicheskie skanirujushhie ustrojstva sistemy distancionnogo zondirovaniya MSU-GS [Precision optical-mechanical scanning devices of the MSU-GS remote sensing system]*, *Mechanics, control and informatics*, 2009, no. 1, pp. 503–509. (In Russ.)
2. Pavlov P. A., *Extended abstract of doctoral dissertation in Technical Sciences (Electrotechnical University “LETI”, St. Petersburg, 2008)*. (In Russ.)
3. Yu. V. Filatov, *Extended abstract of doctoral dissertation in Technical Sciences (LITMO, Leningrad, 1991)*. (In Russ.)
4. Pavlov P. A., Filatov Yu. V., Yudin A. M., Lazernoe uglomernoe ustrojstvo s rasshirenym diapazonom izmerenija [Extended range laser goniometer], *Izvestija LETI [Bulletin of the Leningrad Electrotechnical Institute]*. 1990, no. 427, p. 63. (In Russ.)
5. Max Born, Emil Volf, *Principles of Optics*, Oxford, Pergamon Press, 1959.
6. Glagolev I. P., Dorokhin Yu. P., Mamich V. F., Smirnov V. A., Fateev V. D., *Measurement Techniques*, 1991, vol. 34, pp. 325–329. <https://doi.org/10.1007/BF00979302>
7. Julius S. Bendat, Allan G. Piersol, *Random Data Analysis and Measurement Procedures*, New York, Wiley, 1971, 407 p.
8. Mallat S. G., *A Wavelet Tour of Signal Processing*, 3rd ed., Academic Press, 2008, 832 p.
9. Pukhova V. M., Kustov T. V., Ferrini G., *2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, January 29 – February 1, 2018, Moscow – St. Petersburg, Russia, IEEE Publ., 2018, pp. 1141–1145. <https://doi.org/10.1109/EIConRus.2018.8317292>
10. Pukhova V., Ferrini G., *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Scanning Probe Microscopy 2017 (SPM-2017)*, August 27–30 2017, Ekaterinburg, Russia, 2017, vol. 256, 012004. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/256/1/012004>
11. Ashmead J., *Quanta*, 2012, vol. 1, no. 1, pp. 58–70. <https://doi.org/10.12743/quanta.v1i1.5>
12. Wang Liqin, Cui Li, Zheng Dezhi, Gu Le, *Chinese Journal of Aeronautics*, 2008, vol. 21, no. 1, pp. 86–96. [https://doi.org/10.1016/S1000-9361\(08\)60012-6](https://doi.org/10.1016/S1000-9361(08)60012-6)
13. Anuryev V. I., *Spravochnik konstruktora-mashinostroitelja [Handbook of the constructor-machine builder]*, vol. 2, Moscow, Mechanical Engineering Publ., 2001, 912 p. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 06.04.2021; принята к публикации 08.04.2021.