

Научная статья

УДК 531.74

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-8-52-57>

Влияние подшипникового узла динамического гониометра на погрешность измерений

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/0000-0003-3645-4402>

Аннотация. С целью повышения точности динамического гониометра исследовано влияние его подшипникового узла на погрешность измерения. Изучены спектральные характеристики случайной погрешности двух динамических гониометров с одинаковыми оптическими датчиками угла и различными подшипниками – аэростатическим и радиально-упорным шариковым. Показано, что использование в гониометре шарикового подшипника приводит к нестационарности случайной погрешности угловых измерений. С использованием вейвлет-анализа и вариации Аллана проанализирована случайная погрешность динамического гониометра, выявлены источники нестационарности и определена его потенциальная точность. Установлено, что применение аэростатического подшипника позволяет повысить точность динамического гониометра и приблизить её значение к точности статического гониометра, в котором влияние подшипникового узла сведено к минимуму. Полученные результаты представляют интерес для пользователей и разработчиков динамических гониометров.

Ключевые слова: динамический гониометр, случайная погрешность, фурье-преобразование, вейвлет-анализ, вариация Аллана

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках гранта № 20-19-00412.

Для цитирования: Павлов П. А., Иващенко Е. М. Влияние подшипникового узла динамического гониометра на погрешность измерения // Измерительная техника. 2022. № 8. С. 52–57. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-8-52-57>

Influence of the dynamic goniometer's bearing on the measurement error

Petr A. Pavlov¹, Elena M. Ivashchenko²✉

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

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

²emivashenko@etu.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-3645-4402>

Abstract. In order to improve the accuracy of the dynamic goniometer, the influence of its bearing on the measurement error was studied. The spectral characteristics of the random error of two dynamic goniometers with the same optical angle encoders and different bearings, aerostatic and angular contact ball bearings, are studied. It is shown that the use of a ball bearing in the goniometer leads to non-stationarity of the random error of angular measurements. Using wavelet analysis and Allan variation, the random error of the dynamic goniometer is analyzed, the sources of nonstationarity are identified, and its potential accuracy is determined. It has been established that the use of an aerostatic bearing makes it possible to increase the accuracy of a dynamic goniometer and bring its value closer to the accuracy of a static goniometer, in which the influence of the bearing assembly is minimized. The results obtained are of interest to users and developers of dynamic goniometers.

Keywords: dynamic goniometer, random error, Fourier transform, wavelet analysis, Allan variation

Financial Support: the research was supported by RSF (project no. 20-19-00412).

Введение. В настоящее время динамические гониометры широко используются в измерительной технике. При измерениях угловая шкала классического (статического) гониометра неподвижна, а динамического гониометра – непрерывно вращается. С одной стороны, это является неоспоримым преимуществом динамического гониометра,

поскольку позволяет снимать показания датчиков угла в режиме их непрерывного вращения в широком диапазоне угловых скоростей [1], измерять угловые перемещения до 20° и внешние углы в диапазоне 0–360° [2]. С другой стороны, подшипниковый узел, обеспечивающий вращение шкалы гониометра, является источником дополнительной

как систематической, так и случайной погрешностей. Потенциальные точности этих приборов во многом определяют случайные стационарные и нестационарные процессы в измерительной аппаратуре. Вклад стационарных процессов в случайную погрешность можно уменьшить путём многократных измерений. В случае нестационарных процессов дело обстоит несколько сложнее.

Для анализа случайных нестационарных процессов существуют определённые методы, например вариация Аллана, вейвлет-анализ. Вариация Аллана [3] предложена в качестве характеристики эталонов времени и частоты ещё в 1960-х гг., а в настоящее время используется при решении множества задач в навигационном приборостроении, астрономии. Однако нет никаких теоретических ограничений на применение вариации Аллана для анализа измеряемых величин других типов. Вейвлеты введены в 1980-х гг. для анализа сейсмических и акустических сигналов [4], в настоящее время широко применяются при анализе нестационарных сигналов, распознавании образов и пр. В отличие от фурье-спектров, в которых локальные особенности сигналов (разрывы, ступеньки и т. п.) проявляются в виде едва заметных всплесков, вейвлет-анализ позволяет выделить эти особенности, а также определить временное изменение частотного состава сигнала. Преобразование Фурье характеризуется высокой локализацией по частоте, но не обладает временным разрешением: не учитывает, что частота колебаний может изменяться во времени. В течение всего измерения сигнала преобразование Фурье позволяет получить только интегрированный спектр, поэтому локальные особенности сигнала отражаются в едва заметных составляющих спектра. Частично эти проблемы решаются применением оконного преобразования Фурье, но его недостатком является использование фиксированного окна, т. е. фиксированного разрешения по времени и частоте для всех точек плоскости преобразования, которое не может быть подстроено к локальным свойствам сигнала [5].

Базисной функцией вейвлет-преобразования является вейвлет, волновая функция заданной частоты, ограниченная во времени и имеющая нулевое интегральное значение. Вейвлет выбирается с учётом характеристик анализируемого сигнала. Также необходимо учитывать разрешения по времени и частоте, которые нельзя оптимизировать одновременно [6]. Свойство локальности вейвлета позволяет подбирать параметры, адаптируясь под анализируемый сигнал, т. е. выделять часть сигнала или вклад определённого масштаба [5]. Подвижное частотно-временное окно одинаково хорошо выделяет и низкочастотные и высокочастотные характеристики сигналов.

По сравнению с преобразованием Фурье точность вейвлет-преобразования несколько меньше, поскольку в нём не усредняются параметры сигнала за анализируемое время, т. е. на заданной частоте не накапливается энергия. Время анализа при вейвлет-преобразовании больше, чем при преобразовании Фурье. Поэтому целесообразно использовать эти

преобразования совместно. Вейвлет-преобразование позволяет посмотреть на исследуемый процесс с другой точки зрения, не является заменой преобразования Фурье и не уменьшает его значимости, особенно при работе со стационарными сигналами. С помощью вариации Аллана можно получить дополнительную информацию о шумовых составляющих процесса.

Цель работы – с применением вейвлет-преобразования и вариации Аллана проанализировать влияние подшипникового узла динамического гониометра на его погрешность путём сравнительного анализа угловых величин, измеренных двумя гониометрами с однотипными датчиками угла, но различными подшипниковыми узлами.

Экспериментальное исследование случайной погрешности динамических гониометров. Исследовали два гониометра – ДГ1 с радиально-упорным прецизионным подшипником SKF71817 и ДГ2 с аэростатическим подшипником. В состав обоих динамических гониометров входил оптический датчик угла ЛИР 4200 (СКБ ИС¹) с голографической угловой решёткой и двумя считывающими головками. Разрешение штрихов ЛИР 4200 составляет 4", неравномерность угловой шкалы – менее 0,5".

На основании оптико-механического блока ДГ1 с помощью спаренного радиально-упорного прецизионного подшипника SKF71817 в вертикальном положении закреплён вал гониометра. На валу установлена угловая шкала оптического датчика ЛИР 4200. Используемый подшипник имеет 4 класс точности, ему соответствует биение вала не более 3 мкм. Для ЛИР 4200 диаметром 164 мм рассчитанное отклонение при таком биении не превышает 0,07". Вал гониометра ДГ2, на котором установлена угловая шкала, закреплён с использованием воздушного подшипника.

Для частоты вращения измерительной оси 0,34 Гц рассчитаны частоты f возмущения оси, вызванные движением элементов подшипника (таблица). При расчёте использованы данные, приведённые в работе [7] и на информационном портале «Вибродиагностика»².

Характер вращения вала при использовании воздушного подшипника описан в [8], а динамическая модель

Частоты, возбуждаемые при использовании радиально-упорного шарикового подшипника

Источник возбуждения	f , Гц
Движение сепаратора	0,17
Дефект сепаратора или шарика	0,50
шарика	1,80
внешнего кольца	4,80
Вращение шариков	2,00
Перекатывание шариков по внешнему кольцу	4,40
по внутреннему кольцу	6,00

¹ Специальное Конструкторское Бюро Измерительных Систем (СКБ ИС): [сайт] URL: <https://skbis.ru/> (дата обращения: 08.07.2022).

² Вибродиагностика: [сайт] URL: <http://vibration.ru> (дата обращения: 08.07.2022).

представлена в [9]. Траектория движения вала плавная и практически неразмытая, т. е. вал движется по постоянной траектории и сохраняет стабильное положение в подшипнике. Возникающие колебания являются случайными и проявляются хаотично.

Для определения массива случайных величин, характеризующих случайную погрешность динамического гониометра, через равные интервалы в течение нескольких оборотов шпинделя снимали показания с двух головок оптического датчика угла и определяли их полусумму

$$\varphi_{im} = (\varphi_{1im} + \varphi_{2im}) / 2,$$

где φ_{1im} , φ_{2im} – результаты измерений первой и второй головок соответственно; i – номер измерения внутри оборота; m – номер оборота.

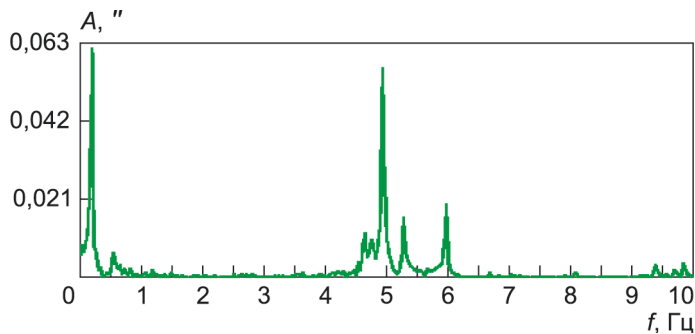


Рис. 1. Фурье-спектр массивов случайных величин, характеризующих случайную погрешность динамического гониометра с радиально-упорным прецизионным подшипником

Fig. 1. Fourier spectrum of the random error of error of dynamic goniometer with precision angular contact bearing

Затем формировали массив случайных величин

$$\delta\varphi_k = \varphi_{im} - \overline{\varphi_i}; \quad \overline{\varphi_i} = M^{-1} \sum_{m=1}^M \varphi_{im},$$

где $k = N(m-1) + i$; N – количество отсчётов за один оборот; M – число оборотов шпинделя за одно измерение.

Полученные массивы случайных величин анализировали на стационарность – искали тренды в последовательности средних значений и дисперсий. При установлении статистической независимости и выявлении тренда применяли непараметрические критерии серий и инверсий [10]. Требовалось использовать оба критерия, поскольку критерий инверсий более мощный для выявления монотонного тренда, а критерий серий – для выявления тренда типа флуктуаций.

Получили следующие результаты исследования на стационарность массивов случайных величин, характеризующих случайную погрешность: для ДГ1 в последовательности средних наблюдается флуктуационный тренд; процессы в ДГ2 стационарны по обоим критериям.

Исследование спектральных характеристик случайной погрешности. Для исследования погрешностей, связанных с вращением, сравним результаты измерения ДГ2 с аэростатическим подшипником и ДГ1 с радиально-упорным шариковым подшипником. Показания двух головок оптического датчика угла снимали при частоте вращения 0,34 Гц.

В фурье-спектре массивов случайных величин (рис. 1), характеризующих случайную погрешность ДГ1, наблюдались частоты в области 4,5–6,0 Гц и центральная частота 0,17 Гц. Эти частоты соответствуют расчётным значениям, представленным в таблице.

Так как массивы анализируемых случайных величин, характеризующих случайную погрешность ДГ1, не являются стационарными, для анализа возмущений использовали

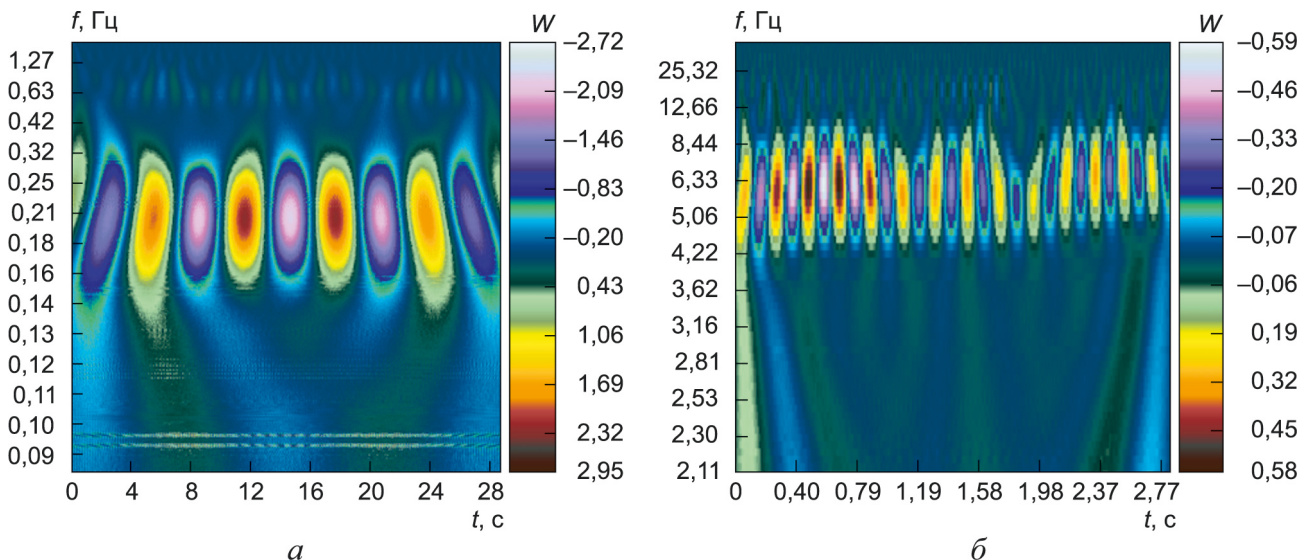


Рис. 2. Вейвлет-спектр массивов случайных величин, характеризующих случайную погрешность динамического гониометра с радиально-упорным прецизионным подшипником для временных интервалов измерений, соответствующих десяти (а) и одному (б) оборотам вала

Fig. 2. Wavelet spectrum of the random error of dynamic goniometer with precision angular contact bearing withing ten turns (a) and one turn (b)

вейвлет-анализ, позволяющий наблюдать изменения частотного состава с течением времени. В качестве материнского вейвлета выбрали вейвлет Морле, имеющий одинаково высокое разрешение как по времени, так и по частоте. На рис. 2 представлены вейвлет-спектры для ДГ1, представляющие собой значения вейвлет-коэффициентов W в частотно-временной области, которые отражают сходство между сигналом и дочерним вейвлетом: чем больше вейвлет-коэффициент, тем больше сходство. Значения коэффициентов W определяют цвет соответствующей области.

Вейвлет-спектр для частот 0,18–0,25 Гц представлен во временном интервале измерения, соответствующем 10 оборотам (рис. 2, а). Данный спектр соответствует спектрограмме гармонического колебания, на которой отчетливо наблюдаются переходы сигнала через нуль (тёмно-синий) и максимумы и минимумы сигнала (бордового и белого цветов соответственно). Отметим, что частота в вейвлет-спектре отличается от частоты в фурье-спектре и расчётного значения, это связано с особенностями вейвлет-преобразования. При построении вейвлет-спектра вертикальную ось образует параметр масштаба, при этом стандартное обратное соотношение между масштабом и частотой не всегда соответствует конкретному случаю. Поэтому зачастую используется термин «псевдочастота».

Для лучшей детализации область высоких частот представлена в промежутке времени, соответствующем одному обороту (рис. 2, б). В верхней области частот 4,5–8,0 Гц также наблюдается картина, характерная для гармонических колебаний. Однако в этом случае нестационарность выражена сильнее – интенсивность воздействия существенно снижается после 0,8 с (максимумы и минимумы на спектрограмме становятся менее выражены).

Появление области частот 0,15–0,20 Гц объясняется процессом коллективного перемещения шариков в подшипнике (сепаратора), частота которого близка к половинной частоте вращения шпинделя, а в области 4,5–8,0 Гц – перекачиванием шариков по внешнему и внутреннему кольцам, а также дефектами внешнего кольца. Эти выводы согласуются с результатами исследования динамики шариковых подшипников [7] и с расчётным значением (см. таблицу).

Отметим, что наиболее выражены в спектре частоты 4,8 и 6,0 Гц, это позволяет сделать вывод, что в подшипнике имеется дефект внешнего кольца (4,8 Гц), а перекачивание шариков по этому кольцу вызывает частоту 6,0 Гц.

Дополнительно к описанным частотам ударное взаимодействие между телами и кольцами качения подшипника возбуждает колебания элементов подшипника на собственных частотах. Вибрация на собственных частотах почти всегда порождается несколькими различными элементами подшипника, которые генерируют несколько собственных частот различной амплитуды. Амплитуда собственных частот имеет тенденцию случайно флуктуировать.

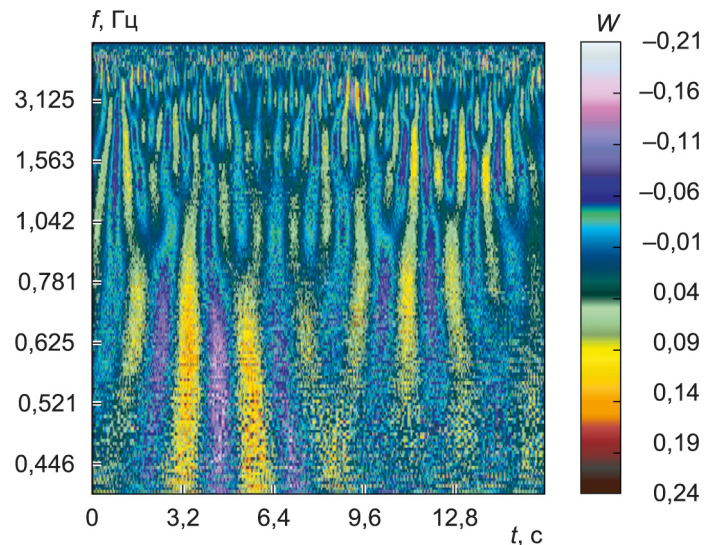


Рис. 3. Вейвлет-спектр случайных величин, характеризующих случайную погрешность динамического гониометра с аэростатическим подшипником

Fig. 3. Wavelet spectrum of the random error of dynamic goniometer with air bearing

Если повреждения подшипника связаны с усталостью, истиранием и подобными эффектами, то порождаемые вибрации обычно являются случайными и высокочастотными (см. сайт «Вибродиагностика»). Этот эффект наблюдается в ДГ1, где присутствуют колебания вблизи 5 Гц. Вейвлет-анализ показывает, что вибрации на этой частоте обладают большой нестационарностью.

На рис. 3 приведён вейвлет-спектр случайной погрешности ДГ2. В вейвлет-спектре отсутствуют ярко выраженные частоты, наблюдаются хаотическое появление частотных составляющих.

Анализ шумовых составляющих с использованием вариации Аллана. Вычислим вариацию Аллана согласно [11]:

$$\sigma^2(\tau) = \sum_{l=1}^{n-1} \frac{[\delta_{l+1}(\tau) - \delta_l(\tau)]^2}{2(n-1)},$$

где $\delta_l(\tau)$ – средние значения процесса $\delta(\tau)$ в интервалах I_l длиной τ , $l=1 \dots n$; $I_l = [t_0 + l\tau, t_0 + (l+1)\tau]$.

Для идентификации шума и определения его характеристик строят зависимость $\sigma(\tau)$ в логарифмическом масштабе. Для шумов различных типов наклоны графика будут различаться, коэффициенты наклона определены в стандарте³.

Сравним вариации Аллана для ДГ1 с шариковым подшипником и ДГ2 с аэростатическим подшипником (рис. 4, кривые 1, 2 соответственно). Наклон кривой 2 соответствует угловому белому шуму, а наклоны кривой 1 – гармоническим колебаниям.

Оценим потенциальную точность динамического гониометра, которая определяется при отсутствии влияния

³ IEEE Std 647-1995. IEEE Standard specification format guide and test procedure for single-axis laser gyros.

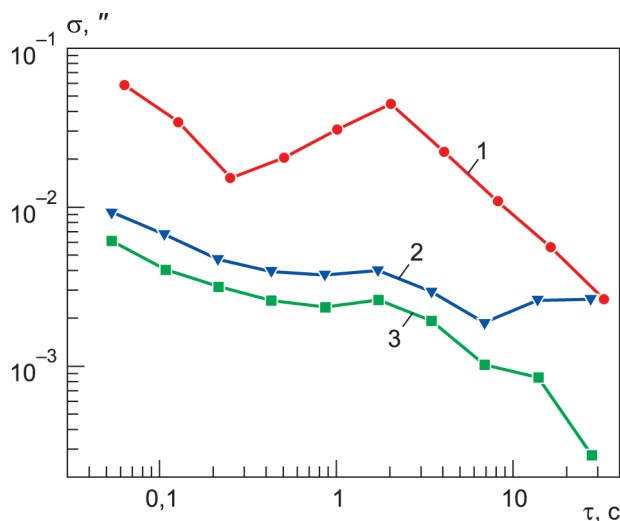


Рис. 4. Вариация Аллана для случайных величин, характеризующих случайную погрешность динамических гониометров с радиально-упорным прецизионным (1) и аэростатическим (2) подшипниками; 3 – потенциальная точность

Fig. 4. Allan-variation of the random error of dynamic goniometer with: precision angular contact bearing (1) and air bearing (2); 3 – potential accuracy

подшипникового узла. Предположим, что сигналы одной измерительной головки с разными фотоприёмниками, расположенными внутри измерительной головки на расстоянии примерно 3 мм друг от друга, менее всего подвержены влиянию возмущающих факторов. Для определения потенциальной точности измерим угол поворота шпинделя ДГ одним из фотоприёмников через равные угловые интервалы, задаваемые вторым фотоприёмником. Вариация Аллана, соответствующая измеренной потенциальной точности, представлена кривой 3 на рис. 4. Она несколько отличается от ожидаемой кривой вариации Аллана с наклоном $-1/2$, которая соответствует белому шуму. Возможно, в данном эксперименте влияние подшипникового узла исключено не полностью.

Из рис. 4 следует, что вариация Аллана при времени усреднения 1 с составляет 0,02" и 0,003" для ДГ1 и ДГ2 соответственно. Отсутствие влияния подшипникового узла позволяет говорить о потенциальной точности гониометра, и вариация Аллана в этом случае равна 0,002".

Закключение. Применение вейвлет-преобразования для анализа частотных составляющих погрешности угловых измерений позволило выявить влияние подшипникового узла динамического гониометра на погрешность измерения. Основными источниками случайной погрешности и её нестационарности являются процессы вращения шариков относительно сепаратора и их коллективного перемещения. В динамическом гониометре с аэростатическим подшипником наблюдается хаотическое появление частотных составляющих.

Анализ вариаций Аллана показал, что использование аэростатического подшипника позволяет повысить точность

динамического гониометра и приблизиться к его потенциальной точности – точности статического гониометра, где влияние подшипникового узла сведено к минимуму.

Список источников

1. Павлов П. А., Филатов Ю. В., Бурнашев М. Н. и др. Унифицированный ряд стенов контроля параметров цифровых преобразователей угла // Сборник докладов международной научной конференции «Наука и образование: технология успеха», Санкт-Петербург, Россия, 2016. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), 2016. С. 63–67.
2. Бохман Е. Д., Иванов П. А., Ларичев Р. А. и др. Автоматизированная углоизмерительная система для передачи направлений // Гироскопия и навигация. 2019. Т. 27. № 2(105). С. 95–104. <https://doi.org/10.17285/0869-7035.2019.27.2.095-105>
3. Allan D. W., Statistics of atomic frequency standards, *Proc. IEEE*, 1966, vol. 54, no. 2, pp. 221–230. <http://dx.doi.org/10.1109/PROC.1966.4634>
4. Mary Beth Ruskai, Gregory Beylkin, etc., *Wavelets and their Applications*, Boston, Jones and Barlett Publisher, 1992, 474 p.
5. Яковлев А. Н. Введение в вейвлет-преобразования. Новосибирск: Издательство НГТУ, 2003. 104 с.
6. Воскобойников Ю. В. Вейвлет-фильтрация сигналов и изображений (с примерами в MathCad): монография. Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2015. 188 с.
7. Ануриев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя. М.: Машиностроение, 2001. 920 с.
8. Космынин С. В., Чернобай С. П. Анализ точности вращения высокоскоростных шпинделей с газостатическими опорами // СТИН. 2006. № 6. С. 10–13.
9. Махов А. А., Поздняк Г. Г. Динамическая модель шпинделя на аэростатических опорах // Вестник РУДН. Серия Инженерные исследования. 2004. № 1(8). С. 76–82.
10. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных: Пер. с англ. Москва: Мир, 1989. 540 с.
11. Сирая Т. Н. Статистическая интерпретация вариации Аллана как характеристики измерительных и навигационных устройств // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28. № 1(108). С. 3–18. <https://doi.org/10.17285/0869-7035.0027>

References

1. Pavlov P. A., Filatov Yu. V., Burnashev M. N., etc., *Nauka i obrazovanie: tehnologii uspecha, Proceedings of the International Conference*, St. Petersburg, 2016, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", 2016, pp. 63–67. (In Russ.)
2. Bokhman E. D., Ivanov P. A., Larichev R. A., et al, *Gyroscopy Navigation*, 2019, vol. 10, no. 2, pp. 180–185. <https://doi.org/10.1134/S2075108719030039>
3. Allan D.W., *Statistics of atomic frequency standards. Proc. IEEE*, 1966, vol. 54, no. 2, pp. 221–230. <http://dx.doi.org/10.1109/PROC.1966.4634>

4. Mary Beth Ruskai, Gregory Beylkin, etc., *Wavelets and their Applications*, Boston, Jones and Barlett Publisher, 1992, 474 p.
5. Yakovlev A. N., *Vvedenie v vejvlet preobrazovanija [Introduction to wavelet transforms]*, Novosibirsk, NGTU Publ., 2003, 104 p. (In Russ.)
6. Voskoboynikov Yu. V., *Vejvlet filtrazija signalov I izobrazhenij (s primerami MathCad): monografiya*, Novosibirsk, NGASY (Sibstrin) Publ., 2015, 188 p. (In Russ.)
7. Anurjev V. I., *Spravochnik konstruktora-mashinostroitel'ya [The handbook of designer-mechanician]*, Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2001, 920 p. (In Russ.)
8. Kosminin S. V., Chernobai S. P., Analiz tochnosti vrashcheniya vysokoskorostnykh shpindelej s gazostaticeskimi oporami, *STIN*, 2006, no. 6, pp. 10–13. (In Russ.)
9. Machov A. A., Pozdnyak G. G., Dinamicheskaya model' shpindelya na aerostaticeskikh oporah, *Vestnik RUDN, ser. Inzhenerenie issledovaniya*, 2004, no. 1(8), pp. 76–82. (In Russ.)
10. J. S. Bendat, A.G. Piersol, *Random Data Analysis and Measurement Procedures*, John Wiley & Sons, Inc., 1986.
11. Siraya T. N., *Gyroscopy Navig.*, 2020, vol. 11, pp. 105–114. <https://doi.org/10.1134/S2075108720020078>

Статья поступила в редакцию 31.05.2022; одобрена после рецензирования 17.06.2022; принята к публикации 18.06.2022.
The article was submitted 31.05.2022; approved after reviewing 17.06.2022; accepted for publication 18.06.2022.