

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-652-658

УДК 621.3.088

Экспериментальный метод оценки динамической погрешности приборов и датчиков в условиях их эксплуатации

Дмитрий Геннадиевич Грязин¹, Ольга Олеговна Белова²✉

^{1,2} АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

¹ volnagdg@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3562-6815>

² olga_o_belova@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-7924-7169>

Аннотация

Введение. Рассмотрены существующие методы и оборудование для определения динамических характеристик приборов и систем. Предложен новый метод оценки динамической погрешности навигационных приборов. Метод позволит упростить экспериментальную оценку динамической погрешности при контроле характеристик серийных изделий, а также оценить значение погрешности в условиях реальных возмущающих воздействий, соответствующих условиям эксплуатации с использованием испытательного оборудования. **Метод.** Предложенный метод основан на измерении прибором воспроизводимых стендом псевдослучайных испытательных воздействий в заданном спектре частот, соответствующим условиям эксплуатации прибора. При этом дисперсия динамической погрешности исследуемого прибора определяется как площадь под графиком ее спектральной плотности. **Основные результаты.** Для реализации метода использован специализированный стенд, позволяющий воспроизводить колебания в заданном спектре частот. Приведены результаты применения разработанного метода при решении задач оценки динамических погрешностей электронного кренометра. Результаты экспериментальных исследований согласуются с полученными ранее результатами натуральных исследований. **Обсуждение.** Разработанный метод позволяет сократить время оценки динамической погрешности серийно выпускаемых датчиков и приборов до 15–20 мин, так как не требует выполнения измерений на каждой частоте в отдельности. Получена возможность оценки погрешности приборов в реальных режимах эксплуатации.

Ключевые слова

динамическая погрешность, спектральная плотность, условия эксплуатации, стенды, испытания, электронный кренометр

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00090.

Авторы выражают благодарность А.П. Белянцеву за помощь в обработке экспериментальных данных.

Ссылка для цитирования: Грязин Д.Г., Белова О.О. Экспериментальный метод оценки динамической погрешности приборов и датчиков в условиях их эксплуатации // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 3. С. 652–658. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-652-658

Experimental method for estimating the dynamic error of devices and sensors under their operating conditions

Dmitry G. Gryazin¹, Olga O. Belova²✉

^{1,2} State Research Center of the Russian Federation Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation

¹ ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

¹ volnagdg@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3562-6815>

² olga_o_belova@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-7924-7169>

Abstract

Existing methods and equipment for determining the dynamic characteristics of devices and systems are considered. A new method for estimating the dynamic error of navigation devices is proposed. It makes it possible to simplify

© Грязин Д.Г., Белова О.О., 2023

the experimental assessment of the dynamic error of serial products as well as to evaluate its value under conditions of real disturbing influences corresponding to operating conditions using test equipment. The method is based on the measurement by the device of pseudo-random test effects reproduced by the stand in a given frequency spectrum corresponding to the operating conditions of the instrument. In this case, the variance of the dynamic error of the device under study is determined as the area under the graph of its power spectral density. To implement the method, it is proposed to use a specialized stand that allows to reproduce oscillations in a given frequency spectrum. The results of the application of the developed method in solving the problems of estimating the dynamic errors of the electronic inclinometer are presented. The results of experimental studies are consistent with the results of field tests obtained earlier. The developed method makes it possible to reduce the time for estimating the dynamic error of sensors and devices to 15–20 minutes because it does not require measurements at each frequency separately, and also allows to evaluate the error of devices in real modes of its operation.

Keywords

dynamic error, spectral density, operating conditions, stands, tests, electronic inclinometer.

Acknowledgements

The study was funded by Russian Science Foundation, Project No. 23-29-00090.

The authors are grateful to A.P. Belyantsev for his help in processing the experimental data.

For citation: Gryazin D.G., Belova O.O. Experimental method for estimating the dynamic error of devices and sensors under their operating conditions. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 652–658 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-652-658

Введение

Теоретические основы исследований динамических погрешностей (ДП) при различных видах входных воздействий предложены в многочисленных научных работах, например в [1–4]. Для судовых приборов и датчиков характерно полигармоническое входное воздействие в некоторой полосе частот.

Характеристики измерительных каналов приборов и датчиков нормируются в технических условиях для гироскопических приборов и инерциальных датчиков. При этом к числу нормируемых характеристик во многих случаях относятся: время готовности; масштабный коэффициент и его изменение; средняя квадратическая погрешность; уровень шума; дрейф в пуске; устойчивость к внешним возмущающим факторам; изменение характеристик от пуска к пуску и др. [5, 6]. В связи со сложностью экспериментальных работ и продолжительностью измерений ДП и полоса рабочих частот, как правило, не нормируются. При проведении конструкторских испытаний эти характеристики определяются расчетным путем или косвенным методом, например по времени переходного процесса [7].

Разработка всеширотных автоматизированных систем управления движением морских судов, работающих в условиях значительной качки судна, слеминга и вибрации его корпуса, появление высокоскоростных судов на подводных крыльях и воздушной подушке, приборы которых имеют значительные динамические возмущения, привели к необходимости достоверной оценки ДП современных гироскопических датчиков в широкой полосе частот. Отдельной задачей является оценка ДП информационного канала прибора, например измерителя крена, в реальных условиях эксплуатации на конкретном судне в условиях конкретной качки, которая может отличаться от заявленной в технических условиях ДП в полосе рабочих частот. Отметим, что информация о реальной ДП информационных каналов гироскопических приборов и их датчиков позволяет повысить качество проектирования систем управления судном. Кроме того, подобная оценка погрешности

может носить арбитражный характер при проведении анализа нештатных ситуаций. В настоящее время построенные в России гражданские суда не редко оснащаются импортной навигационной аппаратурой. Оценка метрологических характеристик современных гироскопических датчиков и модулей в динамическом режиме будет способствовать созданию новых систем управления традиционными и высокоскоростными судами, повышению качества выпускаемых приборов, но и позволит сертифицировать приборы и датчики в соответствии со стандартами IEC, что безусловно приведет к вытеснению с отечественных судов импортной аппаратуры и расширит круг ее потребителей на международном рынке.

Очевидно, что исследование ДП измерительного канала гироскопического прибора и инерциальных датчиков в нормируемой полосе частот для решения поставленных задач требует разработки нового метода и технических средств для его реализации.

Постановка задачи исследований

Как известно ДП¹ определяется разностью между погрешностью средства измерений в динамическом режиме и его статической погрешностью, соответствующей значению величины в данный момент времени. Ее значение является определяющим при эксплуатации навигационных приборов подвижных объектов.

Для оценки ДП приборов в связи с простотой реализации наибольшее распространение получил метод сопоставления параметров последовательно зарегистрированных гармонических входных воздействий на выбранной частоте, в интересующей полосе частот, с соответствующими параметрами выходного сигнала прибора [8].

Для исследования ДП приборов, вырабатывающих углы крена и дифферента, а также систем стабилизации

¹ РМГ 29-2013 Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Термины и определения. М. Стандартинформ, 2014. 55 с.

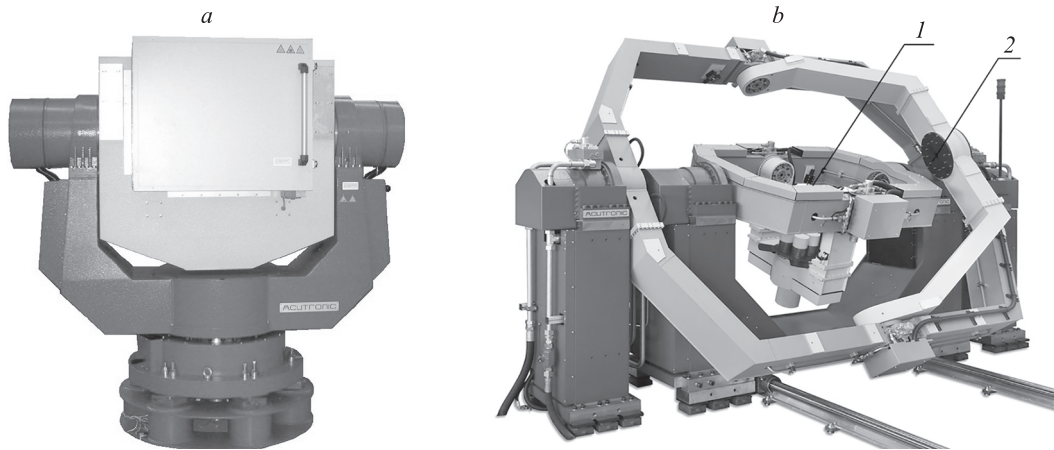


Рис. 1. Трехосный Acutronic AC33V-T450¹ (a) и пятиосный Acutronic HD55H-T65.60² (b) стелды
 1 — платформа для закрепления испытуемой системы; 2 — шайба для установки цели

Fig. 1. Three-axis Acutronic AC33V-T450 (a) and five-axis Acutronic HD55H-T65.60 (b) stands
 1 — platform for fixing the system under test, 2 — table for setting the target

и управления подвижными объектами часто используют специализированные многоосные стелды качки [9, 10].

На рис. 1, a представлен трехосный стелд фирмы Acutronic², используемый для калибровки бесплатформенных инерциальных навигационных систем, а на рис. 1, b — пятиосный стелд, предназначенный для испытания систем астрокоррекции подвижных объектов и головок самонаведения ракет. Особенность пятиосного стелда — возможность воспроизведения не только колебаний в трех плоскостях испытуемой системы, закрепленной на платформе 1, но и углового разворота цели относительно прибора в двух плоскостях. При этом цель — оптический имитатор звезды или термоизлучатель, устанавливается на отдельных рамках на шайбе 2.

Заслуживает внимания стелд для оценки влияния динамических воздействий на системы управления ядерными энергетическими установками (рис. 2) [11]. Он представляет собой раскачивающуюся в двух плоскостях раму, установленную на крестообразном подвесе, на которую помещается исследуемый объект. Стелд может осуществлять колебания, изменяющиеся по гармоническому закону, в двух ортогональных плоскостях.

Таким образом, задача исследования ДП навигационных приборов и систем управления подвижными объектами обычно решается с помощью применения различных стелдов, в большинстве своем специализированных. Выполняется сопоставление параметров последовательных гармонических входных воздействий с соответствующими параметрами выходного сигнала прибора в рабочем диапазоне частот. Недостаток данного метода — невозможность оценки ДП при-

боров и систем при воздействии на них конкретных возмущений, соответствующих условиям их эксплуатации. Например, качки конкретного судна на различном волнении с параметрами, характеризующими реальные условия эксплуатации прибора. Отметим, что при исследовании ДП приборов необходимо задавать гармонические воздействия последовательно на каждой частоте во всем исследуемом диапазоне, что представляется затратным.

Задача настоящей работы — разработка метода оценки ДП гироскопов, позволяющего сократить время экспериментальных работ при серийном про-



Рис. 2. Общий вид стелда для испытаний ядерных энергетических установок [11]

Fig. 2. Overall view of the test stand for nuclear power systems

¹ Acutronic [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.acutronic.com/simulation-test/3-axis-rate-tables/swiss-3-axis-rate-table-series-ac33v-t>, свободный (дата обращения: 20.11.2022).

² Acutronic [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.acutronic.com/>, свободный (дата обращения: 20.11.2022).

изводстве, а также уточнить значение погрешности в конкретных условиях эксплуатации приборов при исследовательских и арбитражных метрологических работах. Решение указанной задачи позволит уменьшить производственные затраты и себестоимость приборов, а также предоставит дополнительную информацию о динамической точности приборов.

Метод оценки динамической погрешности приборов и датчиков

Для сокращения времени оценки ДП навигационных приборов и исследования ее значений в реальных режимах эксплуатации целесообразно задать возмущающие воздействия не последовательно на каждой из частот, а сделать их псевдослучайными, стационарными и соответствующими заданному спектру частот. Задаваемый спектр частот необходимо выбрать исходя из реальных условий эксплуатации прибора или характеристик, указанных в документации на прибор. Исследования спектров периодических, непериодических и почти периодических функций выполнены в рамках создания классической теории информации [12, 13], они получили развитие в работе [14], а применительно к решению инженерных задач — в [15, 16].

Предлагаемый метод оценки использует расчет спектральных характеристик погрешности путем перехода из временной области в частотную с помощью преобразования Фурье [17, 18]. Это позволит оценить дисперсию погрешности прибора в задаваемом частотном диапазоне.

Пусть $x(t)$ — входной сигнал испытательного стенда (эталонное входное воздействие), $y(t) = x(t) + \varepsilon(t)$ — выходной сигнал прибора, где $\varepsilon(t)$ — ДП прибора. Тогда $\varepsilon(t) = y(t) - x(t)$.

Определим спектральную плотность погрешности $S_\varepsilon(f)$, в соответствии с теоремой Винера–Хинчина [13], как одностороннее преобразование Фурье от корреляционной функции погрешности:

$$S_\varepsilon(\omega) = 2 \int_0^\infty R_\varepsilon(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau, \quad (1)$$

где $R_\varepsilon(\tau)$ — корреляционная функция погрешности; τ — интервал корреляции; ω — круговая частота.

Поскольку сигналы на входе и выходе прибора являются коррелированными, то

$$R_\varepsilon(\tau) = R_x(\tau) + R_y(\tau) - R_{xy}(\tau) - R_{yx}(\tau), \quad (2)$$

где $R_x(\tau)$ и $R_y(\tau)$ — автокорреляционные функции сигнала со стенда и выходного сигнала прибора; $R_{xy}(\tau)$ и $R_{yx}(\tau)$ — взаимные корреляционные функции сигнала со стенда и прибора.

Подставив выражение (2) в (1), получим спектральную плотность погрешности исследуемого прибора, которая характеризует дисперсию его погрешности во всем частотном диапазоне. Искомую дисперсию определим как площадь под графиком полученной спектральной плотности:

$$D = \sigma^2 = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty S(\omega) d\omega.$$

Среднеквадратичное отклонение (СКО) ДП σ микромеханического датчика или инерциального измерительного модуля найдем как $\sigma = \sqrt{D}$.

Метод предполагает использование испытательного оборудования, способного воспроизводить колебания в спектре частот, охватывающем весь частотный диапазон работы исследуемого объекта. Метод реализован следующим образом.

1. После установки прибора на стенд выполним запись характеристик, задаваемых стендом $x(t)$, и характеристик, воспроизводимых датчиком или модулем $y(t)$.
2. С помощью программы обработки данных, реализованной, например, в программной среде MATLAB, произведем расчет авто- и взаимных корреляционных функций входного сигнала со стенда и сигнала с исследуемого прибора, и корреляционной функции ДП по формуле (2). При этом интервал корреляции τ определим в зависимости от частоты дискретизации данных и времени записи.
3. Путем преобразования Фурье полученной корреляционной функции ДП осуществим расчет спектральной плотности ДП по формуле (1), площадь под графиком которой определит искомые дисперсию и СКО ДП.

Отметим, что вид полученного графика спектральной плотности характеризует особенности ДП исследуемого прибора, и позволяет определить, например, наличие низкочастотного дрейфа или высокочастотных шумов. Эти данные можно использовать при исследовательских или арбитражных метрологических работах. Однако в большинстве случаев в условиях производства достаточно знания значения СКО ДП.

Преимущества разработанного метода заключаются в том, что время, необходимое для определения ДП приборов, сокращается в несколько раз за счет исключения необходимости испытаний на каждой частоте в отдельности и составляет не более 10–15 мин. Кроме того, метод позволяет оценить ДП прибора в режиме конкретных возмущающих воздействий на судне, при этом спектры качки судов известны или могут быть рассчитаны.

Верификация предложенного метода

Произведем верификацию метода с использованием электронного кренометра (ЭК), представляющего малогабаритную гировертикаль на микромеханических гироскопах и акселерометрах.

С целью оценки значения ДП ЭК применим стенд [19], имитирующий бортовую качку судна. При этом стенд позволяет воспроизводить качку как с одним заданным периодом, так и полигармоническую качку с заданным спектром частот. Управление стендом осуществим с помощью компьютера (рис. 3). При экспериментальных исследованиях на платформе стенда установим ЭК, сигнал которого синхронно запишем на втором компьютере. Исследования состоят из двух этапов.

Предложенный метод предполагает, что исследуемый прибор имеет линейную передаточную характери-



Рис. 3. Стенд качки с установленным электронным кренометром

Fig. 3. Pitching stand with installed electronic inclinometer (EI)

стику. На первом этапе произведем оценку указанного предположения. Для этого выполним исследование коэффициента передачи ЭК при гармонических входных воздействиях, задаваемых с помощью стенда качки в рабочем диапазоне частот. Исследования проведем традиционным способом, путем сравнения воспроизводимых стендом качки гармонических колебаний

с известной частотой и амплитудой с результатами измерений прибора. Условия испытаний: диапазон периодов качки от 3 до 10 с и амплитуды $\pm 2^\circ$, $\pm 5^\circ$ и $\pm 10^\circ$ (таблица).

Из таблицы видно, что масштабный коэффициент ЭК в диапазоне задаваемых частот имеет значение 0,995, а его погрешность составляет $\pm 0,005$, что подтверждает линейность системы измерения угла крена.

На втором этапе исследований выполним непосредственные исследования предложенного метода. Для этого используем результаты проведенных ранее натурных испытаний. В натурных условиях была выполнена оценка погрешности ЭК методом сравнения с эталонным прибором. Эксперимент выполнялся на судне, водоизмещением 100 т. Во время эксперимента были записаны реализации бортовой качки с ЭК, а также с бесплатформенной инерциальной системы, построенной на волоконных гироскопах и имеющей точность на порядок выше исследуемой. Запись реализаций производилась за интервал времени 15 мин. Погрешность ЭК, полученная при натурных испытаниях путем сравнения с эталонным прибором, составила $0,28^\circ$.

Очевидно, что указанные реализации характеризуют реальные условия эксплуатации прибора, на их основе построим амплитудный спектр (далее — спектр) качки судна (рис. 4, а). Далее в лабораторных условиях выполним подбор амплитуд и периодов гармонических колебаний стенда. После установки ЭК на стенд за-

Таблица. Коэффициент передачи электронного кренометра при различных условиях качки
Table. EI gain at various pitching parameters

Амплитуда качки	Период качки, с			
	3	5	7	10
	Коэффициент передачи			
$\pm 2^\circ$	0,994	0,992	0,992	0,990
$\pm 5^\circ$	0,997	0,994	0,994	0,995
$\pm 10^\circ$	0,997	0,998	0,997	0,995

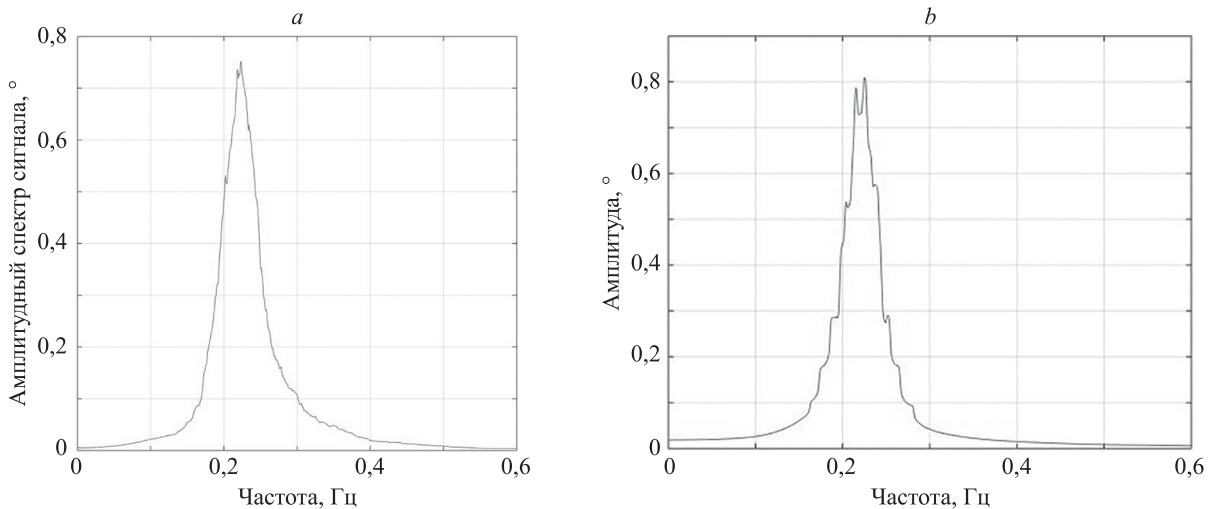


Рис. 4. Амплитудные спектры качки, построенные по реализациям, полученным на: натурных испытаниях (а) и воспроизводимые на стенде (b)

Fig. 4. Pitching amplitude spectrum: based on data from field tests (a); set at the pitching stand (b)

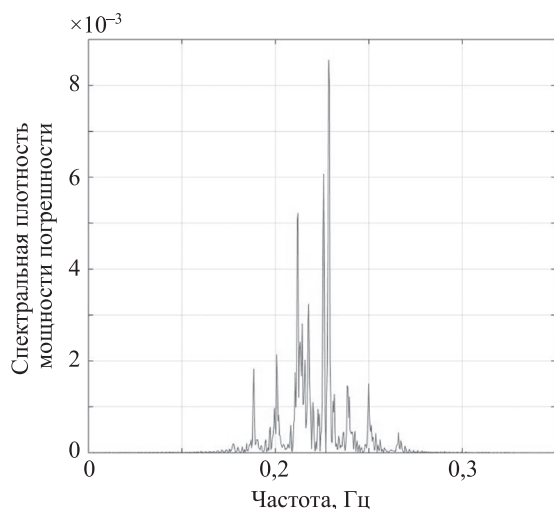


Рис. 5. График спектральной плотности погрешности электронного кренометра

Fig. 5. Power spectral density of EI error

дадим полигармонические колебания, спектр которых приближен к реальному спектру качки, полученному на судне (рис. 4, b).

С использованием реализаций, воспроизводимых стендом колебаний, длительностью 15 мин и записей выходного сигнала ЭК рассчитаем корреляционную функцию погрешности с использованием формулы (2). С помощью преобразования Фурье построим график спектральной плотности мощности погрешности ЭК (рис. 5). Из графика видно, что в показаниях ЭК отсутствует низкочастотный дрейф и высокочастотные шумовые составляющие.

Литература

1. Денисенко В. Динамическая погрешность измерительных каналов АСУ ТП // Современные технологии автоматизации. 2011. № 2. С. 92–101.
2. Ривкин С.С. Расчет динамических погрешностей гироскопических устройств на качающемся основании. Научно-производственное объединение «Азимут», 1991. 96 с.
3. Грановский В.А. Динамические измерения: учебное пособие. Л.: СЗПИ, 1987. 86 с.
4. Захаров И.П., Сергиенко М.П. Метрологическая идентификация динамических характеристик средств измерительной техники. Харьков: СМИТ, 2012. 226 с.
5. Челпанов И.Б., Ефстифеев М.И., Кочетков А.В. Методы испытаний микромеханических датчиков и приборов // Приборы. 2014. № 4(166). С. 16–20.
6. Вавилов В.Д., Тимошенко С.П., Тимошенко А.С. Микро-системные датчики физических величин: монография в двух частях. М.: Техносфера, 2018. 550 с.
7. Нахов С.Ф., Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Депутатова Е.А., Skorobogatov V.V., Nikolaenko A.Iu. Опыт проектирования и изготовления блоков измерителей линейного ускорения на кварцевых маятниковых акселерометрах с аналоговой и цифровой системами управления. Саратов: Саратовский государственный технический университет им. Ю.А.Гагарина, 2021. 240 с.
8. Грязин Д.Г. Расчет и проектирование буев для измерения морского волнения. СПб.: СПбГИТМО (ТУ), 2000. 134 с.
9. Калихман Д.М. Прецизионные управляемые стенды для динамических испытаний гироскопических приборов. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электронприбор», 2008. 296 с.

Дисперсию погрешности ЭК определим как площадь под указанным графиком, СКО погрешности ЭК при этом составило $0,36^\circ$, что согласуется с погрешностью ЭК, полученной при натуральных исследованиях. Очевидно, что разница в указанных значениях СКО объясняется погрешностью эксперимента и воспроизведения задаваемого спектра качки.

Результаты экспериментальных исследований показали, что разработанный метод позволяет производить оценку ДП приборов в условиях, наиболее приближенных к реальным условиям эксплуатации. При этом время, необходимое для проведения исследований, сокращается в 5 раз и составляет не более 15 мин с последующей обработкой данных. При этом полученные результаты хорошо согласуются с результатами полученных ранее исследований.

Заключение

Предложенный метод оценки динамической погрешности giroприборов не требует испытаний прибора на каждой частоте в отдельности и позволяет сократить время экспериментальных исследований при серийном производстве.

Метод дает возможность уточнять значение погрешности и получать дополнительную информацию о динамической точности приборов в конкретных условиях их эксплуатации.

Осуществлена успешная верификация метода на специализированном стенде, способном воспроизводить колебания в заданном спектре частот, при этом были использованы характеристики реальной качки судна и результаты натуральных испытаний аппаратуры.

References

1. Denisenko V. Dynamic error in measuring channels of process control system. *Sovremennye tehnologii avtomatizacii*, 2011, no. 2, pp. 92–101. (in Russian)
2. Rivkin S.S. *Dynamic Errors Calculation of Gyroscopic Devices on an Oscillating Base*. NPO Azimut Publ., 1991, 96 p. (in Russian)
3. Granovskii V.A. *Dynamic Measurements*. Leningrad, SZPI Publ., 1987, 86 p. (in Russian)
4. Zakharov I.P., Sergienko M.P. *Metrological Identification of the Dynamic Characteristics of Measuring Equipment*. Kharkiv, SMIT Publ., 1012, 226 p. (in Russian)
5. Chelpanov I.B., Kochetkov A.V., Evstifeev M.I. Test methods of micromechanical sensors and devices. *Instruments*, 2014, no. 4(166), pp. 16–20. (in Russian)
6. Vavilov V.D., Timoshenkov S.P., Timoshenkov A.S. *Microsystem Sensors of Physical Values*. Moscow, Technosfera Publ., 2018, 550 p. (in Russian)
7. Nakhov S.F., Kalikhman D.M., Kalikhman L.Ia., Deputatova E.A., Skorobogatov V.V., Nikolaenko A.Iu. *Experience in Design and Manufacture of Linear Acceleration Meters Units Based on Quartz Pendulum Accelerometers With Analog and Digital Control Systems*. Saratov, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov Publ., 2021, 240 p. (in Russian)
8. Griazin D.G. *Calculation and Design of Buoys for the Confused Sea Measurements*. St. Petersburg, Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2000, 134 p. (in Russian)
9. Kalikhman D.M. *Precision Controlled Stands for Dynamic Testing of Gyroscopic Devices*. St. Petersburg, State Research Center of the

10. Грязин Д.Г., Величко О.О., Чекмарев А.Б. Метрологическое обеспечение испытаний микромеханических датчиков и модулей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2012. № 7. С. 67–77.
11. Сатаев А.А. Системный анализ и модели теплогидравлических процессов в оборудовании судовых ЯЭУ при воздействии внешних динамических сил: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Нижегородский государственный политехнический университет им. Р.Е. Алексеева. Нижний Новгород, 2022. 23 с.
12. Харкевич А.А. Спектры и анализ / 2-е изд. М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1953. 215 с.
13. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций. М.: Наука, 1968. 449 с.
14. Розин А.М. Теория информации и связи. М.: Энергия, 1971. 184 с.
15. Лэнди Р., Дэвис Д., Албрехт А. Справочник радиоинженера. М., Л.: Госэнергоиздат, 1961. 704 с.
16. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров: определения, теоремы, формулы. М.: Наука, 1974. 832 с.
17. Грязин Д.Г., Величко О.О. Способ определения динамических погрешностей микромеханических инерциальных датчиков и инерциальных измерительных модулей на их основе. Патент RU2546983. Бюл. 2015. № 10.
18. Gryazin D., Belova O. The method for estimating the dynamic error of sensors and modules under their operating conditions and its application // Proc. of the International Russian Automation Conference (RusAutoCon). 2022. P. 777–781. <https://doi.org/10.1109/rusautocon54946.2022.9896370>
19. Грязин Д.Г., Гороховский К.С. Новые средства контроля динамических погрешностей магнитных компасов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2021. Т. 64. № 7. С. 567–575. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2021-64-7-567-575>
- Russian Federation — Concern CSRI Elektropribor, 2008, 296 p. (in Russian)
10. Gryazin D.G., Velitchko O.O., Chekmarev A.B. Measurement assurance of micromechanical sensors and units testing. *Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*, 2012, no. 7, pp. 67–77. (in Russian)
11. Sataev A.A. *System analysis and models of thermal-hydraulic processes in the equipment of shipboard NPPs under the influence of external dynamic forces*. Dissertation abstract for the degree of candidate of technical sciences, Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 2022, 23 p. (in Russian)
12. Kharkevich A.A. *Spectra and Analysis*. 2nd ed. Moscow, Gosudarstvennoe izdatel'stvo tehniko-teoreticheskoy literatury, 1953, 215 p. (in Russian)
13. Sveshnikov A.A. *Applied Methods of the Random Functions Theory*. Moscow, Nauka Publ., 1968, 449 p. (in Russian)
14. Rosie A.M. *Information and Communication Theory*. Blackie, 1966. 175 p.
15. Landee R.W., Davis D.C., Albrecht A.P. *Electronic Designers' Handbook*. McGraw-Hill, 1957.
16. Korn G.A., Korn T.M. *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers Definitions, Theorems, and Formulas for Reference and Review*. McGraw-Hill, 1968, 1130 p.
17. Grjazin D.G., Velichko O.O. method for determining dynamic errors of micromechanical inertial sensors and inertial measurement modules on their basis. *Patent RU2546983*. 2015. (in Russian)
18. Gryazin D., Belova O. The method for estimating the dynamic error of sensors and modules under their operating conditions and its application. *Proc. of the International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*, 2022, pp. 777–781. <https://doi.org/10.1109/rusautocon54946.2022.9896370>
19. Gryazin D.G., Gorokhovskiy K.S. New tools for monitoring the dynamic errors of magnetic compasses. *Journal of Instrument Engineering*, vol. 64, no. 7, pp. 567–575. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2021-64-7-567-575>

Авторы

Грязин Дмитрий Геннадиевич — доктор технических наук, профессор, главный метролог – начальник отдела, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация; профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 25638150600](https://orcid.org/0000-0003-3562-6815), <https://orcid.org/0000-0003-3562-6815>, volnagdg@yandex.ru

Белова Ольга Олеговна — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация, [sc 57190378217](https://orcid.org/0000-0001-7924-7169), <https://orcid.org/0000-0001-7924-7169>, olga_o_belova@mail.ru

Статья поступила в редакцию 25.02.2023
 Одобрена после рецензирования 21.04.2023
 Принята к печати 30.05.2023

Authors

Dmitry G. Gryazin — D.Sc., Professor, Chief Metrologist, Head of Department, State Research Center of the Russian Federation Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation; Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 25638150600](https://orcid.org/0000-0003-3562-6815), <https://orcid.org/0000-0003-3562-6815>, volnagdg@yandex.ru

Olga O. Belova — PhD, Senior Researcher, State Research Center of the Russian Federation Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation, [sc 57190378217](https://orcid.org/0000-0001-7924-7169), <https://orcid.org/0000-0001-7924-7169>, olga_o_belova@mail.ru

Received 25.02.2023
 Approved after reviewing 21.04.2023
 Accepted 30.05.2023



Работа доступна по лицензии
 Creative Commons
 «Attribution-NonCommercial»