

Д. Г. ГРЯЗИН, О. О. БЕЛОВА

## МЕТОД ОЦЕНКИ ПОГРЕШНОСТИ НАВИГАЦИОННЫХ ПРИБОРОВ С ПОМОЩЬЮ ЛАБОРАТОРНЫХ СТЕНДОВ В УСЛОВИЯХ, ПРИБЛИЖЕННЫХ К ЭКСПЛУАТАЦИИ НА СУДНЕ

*В статье предложены новые подходы к оценке погрешности навигационных приборов в динамическом режиме, представляющей собой стационарный процесс. Они основаны на воспроизведении псевдослучайных колебаний в заданном спектре частот в соответствии с условиями эксплуатации на судне. Методы адаптированы для применения на существующем испытательном оборудовании и позволяют упростить экспериментальную оценку погрешности при контроле характеристик серийных изделий. Апробация осуществлялась в лабораторных условиях при оценке погрешностей электронного кренометра и магнитного компаса в динамическом режиме. Результаты этих экспериментов согласуются с полученными ранее в ходе натурных исследований. Погрешность электронного кренометра оценивалась также в динамическом режиме с помощью детерминированного подхода – при воспроизведении гармонических колебаний с известной частотой и амплитудой. Показано, что погрешность, полученная при детерминированном подходе, не в полной мере отражает реальную погрешность приборов в условиях их эксплуатации.*

*Предложенные методы позволяют сократить время оценки погрешности датчиков и систем с нескольких часов до 15-20 минут, так как не требуют выполнения измерений на каждой частоте в отдельности. С их помощью можно также получить дополнительную информацию о составляющих погрешности приборов. Сделан вывод о том, что при оценке погрешности приборов в динамическом режиме на испытательном стенде целесообразно воспроизводить входное воздействие, соответствующее конкретным условиям эксплуатации.*

**Ключевые слова:** погрешность в динамическом режиме, спектральная плотность, стенды, испытания, навигационные приборы, электронный кренометр, магнитный компас.

### Введение

Основная погрешность прибора или датчика в динамическом режиме вызвана нелинейностью его частотной характеристики. При этом согласно РМГ 29–2013 [1] в настоящее время динамическая погрешность рассматривается как дополнительная,

---

**Грязин** Дмитрий Геннадиевич. Доктор технических наук, профессор, главный метролог – начальник отдела, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»; Университет ИТМО (С.-Петербург). Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением». ORCID 0000-0003-3562-6815.

**Белова** Ольга Олеговна. Кандидат технических наук, заместитель главного метролога – начальника отдела, АО Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». ORCID 0000-0001-7924-7169.

а именно как «разность между погрешностью средства измерений в динамическом режиме и его статистической погрешностью, соответствующей значению величины в данный момент времени». Следует отметить, что в предыдущей версии РМГ 29 [2] динамическая погрешность определялась как «погрешность средства измерений, возникающая при измерении изменяющейся (в процессе измерений) физической величины». Таким образом, в настоящее время динамическая погрешность непосредственно связана со статической, т.е. погрешностью статической характеристики.

Статические характеристики инерциальных приборов и датчиков определяются путем воспроизведения на их входе постоянной измеряемой величины. Например, для калибровки акселерометров используют метод разворота датчика в гравитационном поле Земли. При этом статическая погрешность может содержать порог чувствительности, вариацию показаний и шумовую составляющую. В том случае если чувствительный преобразователь датчика не носит признаков механической системы, порог чувствительности обусловлен уровнем его шума, а вариация показаний – блужданием нуля [2]. В механических системах порог чувствительности и вариация показаний во многом зависят от трения, в том числе внутреннего, возникающего в элементах чувствительного преобразователя. Подвесы современных микромеханических гироскопов и акселерометров, несомненно, характеризуются внутренним трением. Известно, что подвесы чувствительных элементов микромеханических преобразователей имеют нелинейную жесткость [3]. Это приводит к тому, что их внутреннее трение вызвано частотой и амплитудой изменения входного воздействия. В некоторых случаях оно может быть пренебрежимо малым. Давно доказано теоретически и то, что сила и момент трения механических систем в динамическом режиме – кинетическое трение – меньше статического. Это подтверждено испытаниями различных образцов материалов по стандартам ASTM, например ASTM D1894 [4]. Таким образом, сила и момент трения микромеханических преобразователей в динамическом режиме при определенных методиках исследований будут меньше, чем в статическом.

Несомненно, определение динамической погрешности, предложенное в РМГ 29–2013, учитывает инерционные свойства прибора или датчика, отражающиеся на его частотной характеристике, однако оказывается крайне неудачным при рассмотрении характеристик микромеханических датчиков. Дело в том, что при вычитании из динамической погрешности ее статической составляющей погрешность датчика может стать отрицательной, что противоречит физическому смыслу. Эта особенность относится не только к микромеханическим приборам, но и к другим средствам измерений. Таким образом, следует нормировать и оценивать не динамическую погрешность, а точность измерений в динамическом режиме, что согласуется с РМГ 29–2013.

Экспериментальный расчет динамических характеристик объектов регулирования дает наиболее достоверную информацию о погрешности прибора в динамическом режиме (ПДР). При решении большинства инженерных задач, в том числе при проектировании навигационных приборов, систему считают линейной с сосредоточенными параметрами. При ее работе каждая степень свободы описывается своим дифференциальным уравнением. В этом случае в соответствии с ГОСТ 8.256 к полным динамическим характеристикам системы относятся: дифференциальное уравнение, импульсная и переходная характеристики, передаточная функция, совокупность амплитудной и фазочастотной характеристик.

Экспериментальным методам оценки динамических характеристик систем посвящено множество работ, например [5, 6]. Анализируется главным образом реакция системы на известные возмущения:

- однократное скачкообразное, которому соответствует переходный процесс, называемый кривой разгона и отражающий переходную характеристику;
- однократное импульсное, которому соответствует переходный процесс, отражающий импульсную характеристику;
- периодические возмущения с определенной частотой, которым соответствует установившийся процесс колебаний выходной величины.

В последнем случае по изменениям амплитуд выходной величины относительно входной определяют частотные характеристики системы. Этот способ является трудоемким, поскольку требует последовательного воспроизведения множества частот в исследуемом диапазоне.

Если переходная или импульсная характеристики имеют колебательный вид, то несложно определить частоту собственных колебаний и декремент затухания системы, а если апериодический – нужно знать параметры входного воздействия. При этом обработка экспериментально записанной переходной или импульсной характеристики заключается в ее сглаживании и аппроксимации. Сглаживание необходимо для устранения разброса экспериментальных данных. С этой целью применяют, например, метод скользящего усреднения [7]. Для аппроксимации характеристики и получения передаточной функции и постоянной времени задействуются метод площадей, интерполяционный метод и др. [8, 9]. Недостатком всех этих подходов является значительная погрешность.

В некоторых случаях динамические характеристики системы определяются путем статистического анализа кривых, которые показывают изменение во времени обычных эксплуатационных входной и выходной величин объекта; реакция системы на специальные возмущения не оценивается. Вместе с тем этот метод требует знания характеристик не только выходного, но и входного сигнала и обработки большого объема информации, в связи с чем редко применяется на практике. Спектральный метод [10] тоже нечасто используется для оценки погрешностей современных гироскопических датчиков, что обусловлено его сложностью.

Таким образом, к недостаткам классических методов расчета отражающих ПДР динамических характеристик систем относятся существенные временные затраты и невозможность оценить действительное значение погрешности прибора в конкретном режиме эксплуатации на судне. Тем не менее классические подходы активно развиваются, правда, в основном они востребованы при проектировании устройств [11]. Отметим, что на судовые приборы, предназначенные для определения параметров ориентации, в большинстве случаев действуют полигармонические возмущения с ограниченным спектром частот. Реальная погрешность при этом может значительно отличаться от ПДР, во всем диапазоне рабочих частот обусловленной частотными характеристиками прибора.

В настоящей статье предложен метод оценки ПДР навигационных приборов, позволяющий уточнить значение погрешности в конкретных условиях эксплуатации, а также сократить длительность их испытаний при серийном производстве. Благодаря методу можно снизить производственные затраты и себестоимость приборов, а кроме того, получить дополнительную информацию о составляющих погрешности приборов, что полезно, например, при исследовательских испытаниях.

В первом разделе статьи предлагаемый метод теоретически обосновывается, далее описывается процесс его верификации в ходе стендовых и натурных испытаний различных навигационных приборов. В заключении представлены результаты исследований, перечислены преимущества нового метода, а также предложены направления дальнейших работ.

### Спектральный метод оценки погрешности навигационных приборов в динамическом режиме

Чтобы сократить время оценки ПДР навигационных приборов и исследовать их значения в ходе реальной эксплуатации, возмущающие воздействия, например колебания стенда по оси чувствительности, не следует воспроизводить последовательно на каждой из частот – они должны быть псевдослучайными, стационарными и соответствующими задаваемому спектру частот. Последний нужно выбирать исходя из условий реальной эксплуатации прибора или характеристик, указанных в документации. Спектры периодических, непериодических и почти периодических функций изучались в рамках классической теории информации [12, 13], а в дальнейшем [14] – в частности, применительно к решению конкретных инженерных задач [15, 16].

Отметим, что теоретические основы спектральной обработки данных базируются на случайных процессах или их суммах [17]. При этом важно знать, являются ли указанные процессы коррелированными – они наиболее распространены, поскольку при оценке характеристик приборов входная (задающее воздействие) и выходная (сигнал прибора) величины зависимы друг от друга. К некоррелированным процессам можно отнести, в частности, полезный сигнал прибора и случайный шум от внешних воздействий.

Разработанный метод оценки ПДР предусматривает задание возмущающих воздействий (например, качки) в спектре частот, а не на каждой частоте в отдельности, а также расчет спектральных характеристик погрешности путем перехода из временной области в частотную с помощью преобразования Фурье [18]. Подход также учитывает корреляцию входного и выходного сигналов. Это позволяет оценить погрешность прибора через ее дисперсию в задаваемом частотном диапазоне. Отметим, что метод применим для оценки погрешностей, представляющих собой стационарный процесс.

Рассмотрим метод оценки ПДР для коррелированных сигналов.

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

Спектральная плотность погрешности  $S_\varepsilon(\omega)$  в соответствии с теоремой Винера–Хинчина [13] определяется 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,  $\tau$  – переменная интегрирования.

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  $R_x(\tau)$  – автокорреляционная функция сигнала со стенда;

$R_y(\tau)$  – автокорреляционная функция выходного сигнала прибора;

$R_{xy}(\tau), R_{yx}(\tau)$  – взаимные корреляционные функции сигнала со стенда и прибора.

Подставляя выражение (2) в (1), получим спектральную плотность погрешности исследуемого прибора, которая характеризует дисперсию его погрешности во всем частотном диапазоне. Корреляционная функция и спектральная плотность ПДР прибора также могут быть рассчитаны с использованием временной реализации  $\varepsilon(t)$ . Однако расчет спектральной плотности ПДР позволит получить дополнительную информацию и провести более детальный анализ составляющих погрешности приборов, что может пригодиться при метрологических исследованиях.

Искомая дисперсия определяется как площадь под графиком полученной спектральной плотности:

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

Среднеквадратичная ПДР прибора рассчитывается по формуле  $\sigma = \sqrt{D}$ .

Метод предполагает привлечение испытательных стендов, способных воспроизводить колебания в спектре частот с учетом частотного диапазона исследуемого прибора. Прибор устанавливается на стенд, при этом производится синхронная запись реализаций задаваемых стендом гармонических возмущений  $x(t)$  и сигнала с изучаемого прибора  $y(t)$ . Далее эти данные обрабатываются с целью расчета авто- и взаимных корреляционных функций полученного со стенда входного сигнала и сигнала прибора и, соответственно, корреляционной функции ПДР по формуле (2). Расчет производится в программной среде, например *Matlab*. Дальнейшее преобразование Фурье полученной корреляционной функции ПДР позволяет вычислить спектральную плотность ПДР по формуле (1), площадь под графиком которой соответствует искомой дисперсии и среднеквадратичной ПДР.

Вид полученного графика спектральной плотности характеризует особенности ПДР исследуемого прибора и позволяет обнаружить, например, наличие низкочастотного дрейфа или высокочастотных шумов, что можно использовать в исследовательских или арбитражных метрологических работах. Тем не менее в большинстве случаев в условиях производства достаточно знать среднеквадратическую ПДР.

Преимущества разработанного метода заключаются в том, что он позволяет оценить ПДР прибора в условиях конкретных возмущающих воздействий на судне, при этом спектры качки судов известны или могут быть рассчитаны. Кроме того, время, требуемое для определения ПДР приборов, сокращается в несколько раз, так как нет необходимости проводить испытания на каждой частоте в отдельности, и составляет не более 10-15 мин.

### **Верификация предложенного метода при коррелированных процессах**

Метод проверялся путем сравнения результатов стендовых и натуральных испытаний приборов. В ходе исследований были задействованы два прибора – электронный кренометр (ЭК) и магнитный компас (МК). ЭК – это малогабаритная гировертикаль на микромеханических гироскопах и акселерометрах [19]. Конструкция судового МК традиционна [20] и представляет собой котелок, заполненный демпфирующей

жидкостью и установленный в двухступенном кардановом подвесе. Целью эксперимента была оценка погрешностей выработки углов рыскания МК и углов качки ЭК в динамическом режиме.

ПДР приборов определялись на одном и том же стенде, где воспроизводились колебания как с заданными периодом и амплитудой, так и полигармонические с заданным спектром частот [21]. Приборы размещались на платформе стенда, ось которого при испытаниях МК была направлена вертикально для имитации рыскания судна (рис. 1, а), а при испытаниях ЭК – горизонтально для имитации бортовой качки (рис. 1, б). Сигналы ЭК и МК записывались синхронно с сигналами, получаемыми со стенда. В обоих случаях погрешности приборов были коррелированы с задаваемым воздействием.

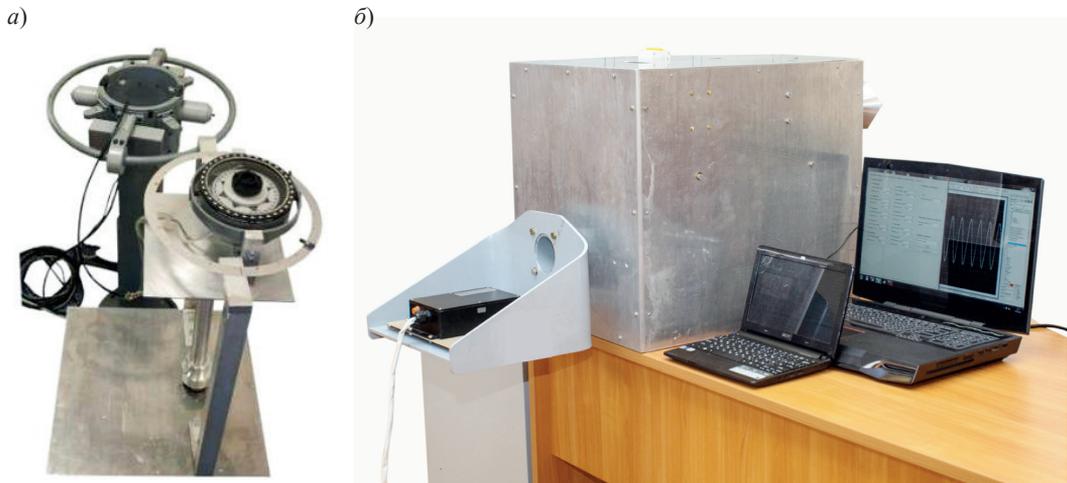


Рис. 1. Испытательный стенд с установленным МК (а) и ЭК (б)

Отметим, что при испытаниях МК было необходимо исключить дополнительное влияние магнитных полей на показания прибора. Для этого стенд с установленным на нем прибором размещался внутри электромагнитного экрана, обеспечивающего экранирование и позволяющего воспроизводить в его камере различные значения вертикальной и горизонтальной составляющих магнитного поля Земли.

На первом этапе исследований ПДР ЭК оценивалась традиционным детерминированным методом, предполагающим последовательное сравнение задаваемых на стенде гармонических колебаний с известной частотой и амплитудой и результатов измерений прибора. В ходе экспериментов периоды качки выбирались в диапазоне от 3 до 10 с, амплитуды –  $\pm 2^\circ$ ,  $\pm 5^\circ$  и  $\pm 10^\circ$ . Полученные данные приведены в таблице. Видно, что среднеквадратическая погрешность ЭК в диапазоне задаваемых частот при различных амплитудах качки составляет от  $0,028^\circ$  до  $0,32^\circ$ .

На втором этапе исследований оценивалась ПДР МК и ЭК с помощью предлагаемого спектрального метода и сравнивались результаты лабораторных и натурных испытаний приборов.

Для подготовки эксперимента привлекались данные, полученные в ходе ранее проведенных натурных испытаний ЭК и МК на судне водоизмещением 100 т. ПДР этих приборов оценивалась путем сопоставления показаний ЭК о бортовой качке и МК о магнитном курсе с измерениями БИНС на ВОГ, а также гирокомпаса ГКУ-5. Точность последних позволяет считать их эталонными по отношению к исследуе-

мым устройствам. Данные записывались в течение 15 мин. Среднеквадратическая погрешность ЭК, вычисленная в ходе натурального эксперимента, в отличие от эталонного прибора составила  $0,28^\circ$ , среднеквадратическая погрешность МК по сравнению с гироскопасом –  $1,68^\circ$ .

Т а б л и ц а

Среднеквадратическая погрешность ЭК в различных условиях качки

Амплитуда качки	Период качки, с			
	3	5	7	10
	Среднеквадратическая погрешность ЭК			
$\pm 2^\circ$	0,035°	0,077°	0,028°	0,083°
$\pm 5^\circ$	0,065°	0,071°	0,074°	0,059°
$\pm 10^\circ$	0,32°	0,067°	0,068°	0,074°

На основе показаний БИНС и ГКУ-5 были построены амплитудные спектры (далее – спектры) качки (а) и рыскания (б) судна (рис. 2, сплошная линия). Затем были подобраны амплитуды и периоды гармонических колебаний стенда для воссоздания в лабораторных условиях спектров, соответствующих реальным данным о качке и рыскании (рис. 2, пунктирная линия). Отметим, что остается дискуссионным вопрос о методах сглаживания графика спектральной плотности при подборе параметров гармонических составляющих [22]. При построении амплитудных спектров удалось добиться необходимой гладкости кривых и при этом не сильно исказить дисперсию.

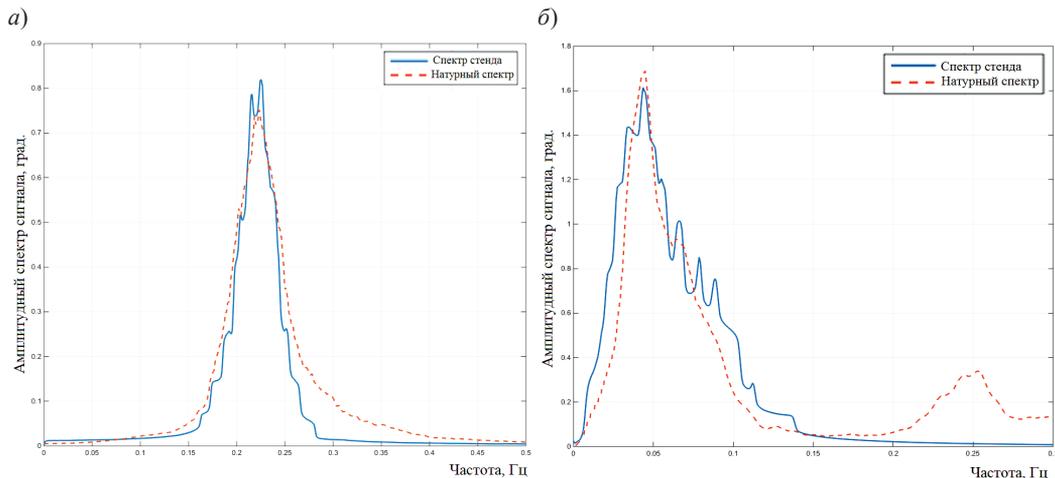


Рис. 2. Амплитудные спектры качки (а) и рыскания (б), построенные по данным, полученным в ходе натуральных испытаний (пунктирная линия) и в лабораторных условиях (сплошная линия)

Далее ЭК и МК устанавливались на стенд, в течение 15 мин воспроизводились полигармонические колебания в спектре частот с одновременной записью данных со стенда и выходных сигналов приборов. На основе полученной информации по формуле (2) были рассчитаны корреляционные функции погрешности. Путем дальнейшего преобразования Фурье были построены графики спектральной плотности мощности погрешностей ЭК (рис. 3, а) и МК (рис. 3, б).

Полученные графики спектральной плотности позволяют детально проанализировать составляющие ПДР приборов, что можно применить в метрологических исследованиях. Так, из графика, представленного на рис. 3, *а*, видно, что в показаниях ЭК отсутствует низкочастотный дрейф и высокочастотные шумовые составляющие, а в показаниях МК, как следует из графика на рис. 3, *б*, наблюдается низкочастотный дрейф.

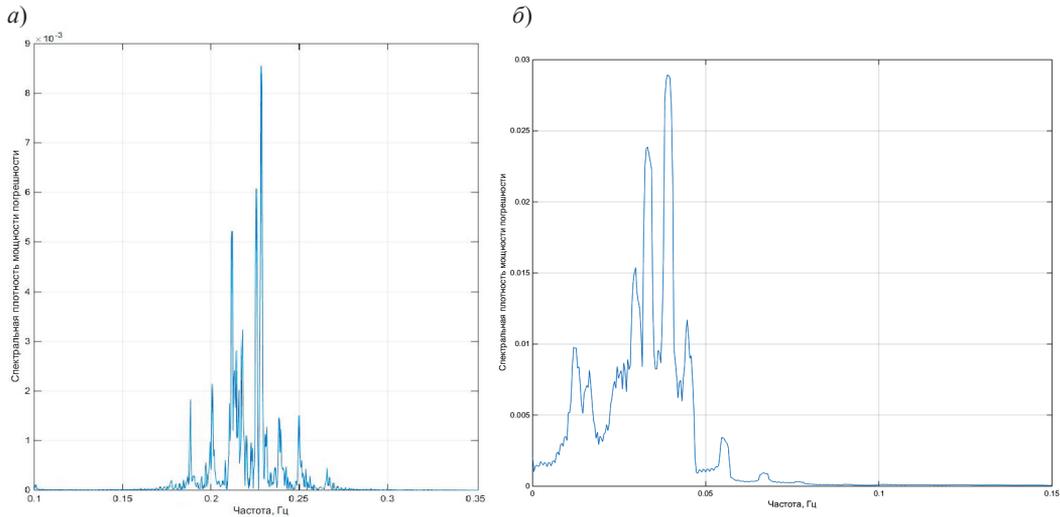


Рис. 3. График спектральной плотности погрешности ЭК (*а*) и МК (*б*)

Дисперсия погрешности приборов определялась как площадь под указанными графиками. Среднеквадратическая погрешность ЭК при этом равна  $0,36^\circ$ , МК –  $1,2^\circ$ . Напомним, что в ходе натурных испытаний среднеквадратическая погрешность ЭК составила  $0,28^\circ$ , МК –  $1,68^\circ$ . Можно сделать вывод, что результаты натурных и лабораторных испытаний согласуются друг с другом, разница объясняется погрешностью эксперимента и воспроизведения задаваемого спектра качки.

Отметим, что ПДР ЭК, рассчитанная с помощью детерминированного подхода, существенно отличается от значений, полученных при спектральном подходе и в ходе натурального эксперимента, т.е. традиционные методы не позволяют оценить реальную погрешность приборов в условиях их эксплуатации. В связи с этим целесообразно в процессе стендовых испытаний навигационных приборов воспроизводить не отдельные гармонические колебания с известными частотой и амплитудой, а задавать их в спектре частот.

Результаты экспериментов показали, что предлагаемый метод на основе спектрального подхода позволяет оценивать ПДР приборов в условиях, наиболее приближенных к реальным. Время, необходимое для выполнения исследований, сокращается в 5 раз и составляет не более 25 мин, включая последующую обработку данных.

Отметим, что метрологические характеристики стенда угловых колебаний определялись в статическом режиме. Этого вполне достаточно для воспроизведения низкочастотных колебаний. В случае использования предложенных подходов для изучения характеристик датчиков на частотах более 1 Гц целесообразно аттестовать стенд с помощью высокотехнологичных методов, например описанных в [23–25].

## Выводы

В статье рассмотрены детерминированный и спектральный подходы к оценке ПДР приборов, представляющей собой стационарный процесс. Первый подход основан на сравнении имитируемых стендом гармонических колебаний с известными частотой и амплитудой и получаемых результатов измерения прибора. При спектральном подходе возмущающие воздействия задаются не последовательно на каждой из частот, а являются псевдослучайными и соответствуют спектру частот, характерному для реальных условий эксплуатации прибора.

Второй подход предполагает оценивание ПДР навигационных приборов с помощью лабораторных стендов. Он базируется на применении спектрального метода обработки данных и позволяет учитывать взаимную корреляцию процессов, поскольку в большинстве случаев ПДР вычисляется именно при коррелированных входных и выходных процессах.

Метод прошел верификацию на специализированных стендах, способных имитировать колебания в заданном спектре частот. Для этого были использованы характеристики реальной качки и рыскания судна и результаты натурных испытаний аппаратуры. Эксперименты показали, что ПДР, найденные с помощью спектрального метода, соответствуют полученным в ходе натурных испытаний, в то время как ПДР, которые были определены посредством детерминированного подхода, отличаются от реальной погрешности приборов при их эксплуатации. Таким образом, при оценке ПДР приборов во время стендовых испытаний целесообразно воспроизводить не отдельные гармонические колебания с известными частотой и амплитудой, а входное воздействие, соответствующее по спектру частот колебаний конкретным условиям эксплуатации приборов.

Разработанный метод позволяет:

- упростить экспериментальную оценку погрешности в динамическом режиме при контроле характеристик серийных изделий, поскольку нет необходимости тестировать прибор на каждой частоте в отдельности;
- сократить время испытаний с нескольких часов до 15-20 минут;
- уточнять значение погрешности и получать дополнительную информацию о динамической точности приборов в конкретных условиях их применения.

Отметим, что при задании стендом полигармонических колебаний будут проявляться и погрешности самого стенда, обусловленные работой его системы управления и погрешностью позиционирования платформы [26], однако их оценка является предметом отдельного рассмотрения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **РМГ 29-2013.** Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. М.: Стандартинформ, 2014. 55 с.
2. **РМГ 29-99.** Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. М.: Стандартинформ, 2008. 58 с.
3. **Распопов В.Я.** Микромеханические приборы. М.: Машиностроение, 2007. 400 с.
4. <https://blog.goldsupplier.com/ru/coefficient-of-friction-testing/>
5. **Техническая кибернетика.** Теория автоматического регулирования: в 4 кн. Книга 2. Анализ и синтез линейных непрерывных и дискретных систем автоматического регулирования / под ред. В. В. Солодовникова. М.: Машиностроение, 1967. 682 с.

6. Быстров С.В., Григорьев В.В., Мансурова О.К. и др. Анализ свойств динамических систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62. №10. С. 886–892.
7. Балакирев В.С., Дудников Е.Г., Цирлин А.М. Экспериментальное определение динамических характеристик промышленных объектов управления. М.: Энергия, 1967. 232 с.
8. Макаров И.М., Менский Б.М. Линейные автоматические системы. М.: Машиностроение, 1982. 504 с.
9. Пахоменков Ю.М. Идентификация постоянной времени динамического звена по мгновенным значениям переходной функции с учетом погрешностей измерений // Системы управления и обработки информации. 2020. №4 (51). С. 45–52.
10. Felski, A., Jaskólski, K., Zwolak, K., Piskur, P., Analysis of Satellite Compass Error's Spectrum, *Sensors (Basel)*, 2020, Jul 22; 20 (15):4067, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7435794>.
11. Артамонов Д.В., Литвинов А.Н., Юрков Н.К. Методика проведения экспериментально-теоретических динамических исследований в процессе проектирования приборных устройств // Надежность и качество сложных систем. 2017. №4 (20). С. 28–34.
12. Харкевич А.А. Спектры и анализ. М.: Гос. изд. технико-теоретической литературы, 1953. 215 с.
13. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций. М.: Наука, 1968. 449 с.
14. Розн А.М. Теория информации и связи. М.: Энергия, 1971. 184 с.
15. Лэндли Р., Дэвис Д., Албрехт А. Справочник радиоинженера. М.: Гос. энергетическое издательство, 1961. 704 с.
16. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1974. 832 с.
17. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. М.: Мир, 1971. 408 с.
18. Способ определения динамических погрешностей микромеханических инерциальных датчиков и инерциальных измерительных модулей на их основе. Патент на изобретение №2546983, авторы Грязин Д.Г., Величко О.О. Опубликовано: 10.04.2015. Бюл. № 10.
19. Грязин Д.Г., Падерина Т.В. Разработка электронного кренодифференциатора на микромеханических датчиках, свободного от действия переносных ускорений // Гироскопия и навигация. 2023. Т. 31. №2 (121). С. 51–64.
20. Кардашинский-Брауде Л.А. Современные судовые магнитные компасы. СПб.: ФГУП «ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 1999. 138 с.
21. Грязин Д.Г., Гороховский К.С. Новые средства контроля динамических погрешностей магнитных компасов // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64. № 7. С. 567–575.
22. Hangfang Zhao, Lin Gui, Nonparametric and parametric methods of spectral analysis, *MATEC Web of Conferences*, 2019, 283, 07002, FCAC 2018, <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928307002>.
23. Боронахин А.М., Вейнмейстер А.В. и др. Метод оценки динамических погрешностей испытательных стендов, предназначенных для калибровки инерциальных датчиков // Материалы XXXII конференции памяти Н.Н.Острякова. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2020. С. 108–110.
24. Иванов П.А., Лазарев В.А. и др. Исследование характеристик трехосного стенда для испытаний навигационных систем // Гироскопия и навигация. 2022. Т. 30. №3 (118). С. 80–93. DOI 10.17285/0869-7035.00100.
25. Анисимов С.А. Динамические методы аттестации испытательных стендов для калибровки инерциальных систем // Материалы XIV конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2012. 515 с.
26. Vasilevskyi, O., Kulakov, P., Spectral method to evaluate the uncertainty of dynamic measurements, *Technical Electrodynamics*, 2017, 4(4):72–78, <https://www.researchgate.net/>.

**Gryazin, D.G.** (Concern CSRI Elektropribor, JSC; ITMO University, St. Petersburg) and **Belova, O.O.** (Concern CSRI Elektropribor, JSC)

Method of Estimating the Error of Navigation Devices Using Laboratory Benches under Conditions Close to Operation on Board a Ship, *Гироскопия и навигация*, 2025, vol. 33, no. 2 (129), pp. 131–141.

**Abstract.** The article proposes new approaches to estimating the error of navigation devices in the dynamic mode, which is a stationary process. These approaches are based on generating pseudo-random oscillations in a given frequency spectrum in accordance with the operating conditions on board a ship. The approaches are adapted for use on available testing equipment and make it possible to simplify the experimental error estimation when monitoring the performance of serial products. Testing was carried out in laboratory conditions with estimating the errors of an electronic inclinometer and a magnetic compass in the dynamic mode. The results of these experiments are consistent with those obtained earlier during field research. The error of the electronic inclinometer was also estimated in the dynamic mode using a deterministic approach – when generating harmonic oscillations with a known frequency and amplitude. It is shown that the error obtained with the deterministic approach does not fully display the real error of the devices under their operating conditions.

The proposed methods allow us to reduce the time for estimating the error of sensors and systems from several hours to 15-20 minutes, because they do not require separate measurements at each frequency. These methods also allow obtaining additional information on the components of the device error. It is concluded that when assessing the error of devices in the dynamic mode on a test bench, it is advisable to generate an input signal corresponding to specific operating conditions.

**Key words:** dynamic error, spectral density, test benches, tests, navigation devices, electronic inclinometer, magnetic compass.

Материал поступил 08.04.2024