УДК 629.056.6

СТАНДАРТИЗАЦИЯ МЕТОДИК ТЕСТИРОВАНИЯ И КАЛИБРОВКИ МЭМС-ДАТЧИКОВ ДЛЯ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Кузнецов К.С.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)», 195251, Российская Федерация, город Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, e-mail: kuznetsov.ks@edu.spbstu.ru

В статье проведён всесторонний анализ текущих подходов к испытаниям и калибровке микроэлектромеханических (МЭМС) акселерометров и гироскопов в составе инерциальных навигационных систем (ИНС). В свою очередь, ИНС используются в авиации, автомобильном транспорте, робототехнических комплексах, а также в бытовой электронике и устройствах дополненной реальности. Рассмотрены действующие международные и российские стандарты (ISO 16063, IEEE 1293, IEEE 2700, IEC 60068, ГОСТ Р 8.820–2013, ГОСТ Р 52931–2008), выявлены их возможности и ограничения при применении к современным МЭМС-сенсорам. Систематизирована классификация ошибок МЭМС-датчиков — смещение нуля (bias), масштабная погрешность, неортогональность осей, температурные зависимости, шумовые характеристики (ARW/VRW, bias instability и др.) — и показана роль методов, таких как Allan variance и PSD, для идентификации шумовых составляющих. Проанализированы практические проблемы отрасли: фрагментарность методик у различных производителей и лабораторий, недостаток специализированной метрологической базы (шестипозиционные стенды, многоосевые поворотные платформы, термокамеры), несопоставимость результатов при различной обработке сигналов и игнорирование перекрёстных эффектов при раздельной калибровке акселерометров и гироскопов. Выполнено сравнение МЭМС с альтернативными технологиями (FOG, RLG), подчёркнуты компромиссные преимущества МЭМС по цене, габаритам и энергоэффективности при ограничениях по точности. Предложена многоуровневая система стандартизации, включающая унифицированные сценарии статико-динамических испытаний, согласованные модели ошибок, единый машиночитаемый формат отчётов (JSON/XML) и набор метрических процедур (Allan deviation, PSD, бюджет неопределённости по GUM). Описаны методики статических и динамических испытаний, совместной калибровки ИНС и примеры обязательных полей для паспортов датчиков. В заключении обоснована необходимость разработки национального стандарта, согласованного с международными документами, как средства обеспечения воспроизводимости испытаний, сопоставимости результатов и повышения доверия к отечественным ИНС на мировом рынке.

Ключевые слова: МЭМС, акселерометры, гироскопы, инерциальная навигация, калибровка, стандартизация, тестирование.

STANDARDIZATION OF TESTING AND CALIBRATION METHODS FOR MEMS SENSORS FOR INERTIAL NAVIGATION SYSTEMS

Kuznetsov K.S.

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)", 195251, Russian Federation, St. Petersburg, Politekhnicheskaya St. 29, e-mail: kuznetsov.ks@edu.spbstu.ru

The article presents a comprehensive analysis of current approaches to the testing and calibration of microelectromechanical (MEMS) accelerometers and gyroscopes within inertial navigation systems (INS). Existing international and Russian standards (ISO 16063, IEEE 1293, IEEE 2700, IEC 60068, GOST R 8.820–2013, GOST R 52931–2008) are examined, with their applicability and limitations in relation to modern MEMS sensors identified. A classification of MEMS sensor errors is systematized, including bias, scale factor error, axis misalignment, temperature effects, and noise characteristics (ARW/VRW, bias instability, and others). The role of methods such as Allan variance and PSD in identifying noise components is highlighted. Key challenges are analyzed, including the fragmentation of existing methodologies among manufacturers and laboratories, the shortage of specialized metrological infrastructure (six-position stands, multi-axis turntables, thermal chambers), the lack of comparability of results due to differences in signal processing approaches, and the neglect of cross-effects when calibrating accelerometers and gyroscopes separately. A comparison with alternative technologies (FOG, RLG) is presented, emphasizing the competitive advantages of MEMS in terms of

cost, size, and energy efficiency, despite their limitations in accuracy. A multi-level standardization system is proposed, encompassing unified static and dynamic test scenarios, harmonized error models, a machine-readable reporting format (JSON/XML), and a set of unified metric procedures (Allan deviation, PSD, uncertainty budgets in accordance with GUM). Methodologies for static and dynamic testing, joint INS calibration, and examples of required sensor passport fields are described.
In conclusion, the necessity of developing a national standard harmonized with international documents is substantiated. Such a standard would ensure reproducibility of testing, comparability of results, and increased confidence in domestic INS solutions on the global navigation technology market.

Keywords: MEMS, accelerometers, gyroscopes, inertial navigation, calibration, standardization, testing.

Введение

Микроэлектромеханические датчики (МЭМС) в последние два десятилетия заняли ключевое место в области навигационных технологий благодаря сочетанию малых габаритов, низкой стоимости и возможности интеграции с микроконтроллерами. На их основе разрабатываются инерциальные навигационные системы (ИНС), применяемые в авиации, автомобильном транспорте, робототехнических комплексах, а также в бытовой электронике и устройствах дополненной реальности.

Несмотря на широкое распространение, эксплуатация МЭМС-акселерометров и гироскопов сопряжена с рядом метрологических проблем: наблюдаются нестабильность нуля, температурные сдвиги, шумы и долговременный дрейф гироскопов. Эти факторы существенно ограничивают точность и надёжность навигационных решений, что особенно критично при применении ИНС в авиации, оборонных системах и автономном транспорте [1].

В настоящее время отсутствует единый подход к методикам испытаний и калибровки МЭМС-датчиков. Международные стандарты (ISO 16063, IEEE 1293, IEEE 2700) регламентируют отдельные процедуры поверки и испытаний, однако они охватывают лишь частные аспекты и не формируют комплексного протокола для работы с МЭМС в составе инерциальных систем. Российские стандарты (ГОСТ Р 8.820–2013, ГОСТ Р 52931–2008) в большей степени ориентированы на классические виброизмерительные средства и требуют актуализации в соответствии с современными технологиями [2-6]. Сравнительный анализ стандартов представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительный анализ стандартов

Стандарт	Объект регулирования	Применимость к МЭМС	Примечания
ISO 16063	Калибровка виброизмерительных средств	Частичная	Общие методики
IEEE 1293	Линейные одноосные акселерометры	Умеренная	Формат спецификаций
IEEE 2700	Сенсоры для портативных устройств	Высокая	Актуально для массового рынка
IEC 60068	Климатические и механические испытания	Частичная	Испытания внешней среды
ГОСТ Р 8.820–2013	Методика поверки акселерометров	Низкая	Для классических приборов
ГОСТ Р 52931–2008	Методы поверки виброаппаратуры	Низкая	Требует актуализации

Таким образом, возникает задача разработки унифицированных методик испытаний и калибровки МЭМС-датчиков, учитывающих как статические, так и динамические режимы работы, а также специфику интеграции в составе инерциальных навигационных систем. Решение данной задачи обеспечит сопоставимость результатов, упростит сертификацию изделий и будет способствовать повышению конкурентоспособности отечественных разработок на мировом рынке.

Обзор существующих стандартов

Анализ существующей нормативной базы показывает, что на международном уровне разработан ряд документов, регламентирующих методы испытаний и параметры сенсоров. В частности, серия стандартов ISO 16063 определяет процедуры калибровки виброизмерительных средств и может применяться к акселерометрам различного типа. Стандарт IEEE 1293 содержит формализованные требования к линейным одноосным акселерометрам и описывает формат спецификаций и методы испытаний. Более современный документ IEEE 2700 устанавливает систему параметров сенсоров, используемых в портативных устройствах, включая МЭМС, что особенно актуально для массового рынка. Кроме того, стандарты серии IEC 60068 охватывают вопросы

климатических и механических испытаний, обеспечивая проверку устойчивости сенсоров к воздействию внешней среды [4-6].

В российской практике применяются нормативные документы, связанные преимущественно с метрологическим обеспечением виброизмерительных средств. Так, ГОСТ Р 8.820–2013 регламентирует методику поверки акселерометров, а ГОСТ Р 52931 описывает методы поверки виброизмерительной аппаратуры. В то же время данные документы в большей степени ориентированы на классические измерительные приборы и лишь частично применимы к современным микроэлектромеханическим сенсорам [2-3].

Сравнительный анализ показывает, что международные стандарты охватывают отдельные аспекты (вибрация, форматы параметров сенсоров), но не формируют комплексного подхода к системному тестированию МЭМС в составе инерциальных навигационных систем. Российские нормативные документы в основном отражают общие метрологические процедуры и требуют актуализации с учётом особенностей работы современных МЭМС-акселерометров и гироскопов.

Классификация ошибок МЭМС-датчиков

Функционирование акселерометров и гироскопов на базе МЭМС сопровождается рядом систематических и случайных ошибок, существенно влияющих на точность ИНС [7]. К числу основных относятся (рис. 1):

- Смещение нуля (bias) — постоянная или медленно изменяющаяся ошибка, которая накапливается в процессе интегрирования сигналов.
- Масштабный коэффициент (scale factor error) — отклонение реальной чувствительности датчика от номинальной.
- Неортогональность осей (misalignment) — несовпадение чувствительных осей сенсора с номинальными осями измерения.
- Температурные эффекты — смещение нуля и изменение коэффициента чувствительности при изменении температуры.
- Шумовые характеристики — случайные процессы, описываемые параметрами angle/velocity random walk (ARW/VRW), bias instability, rate random walk и др.

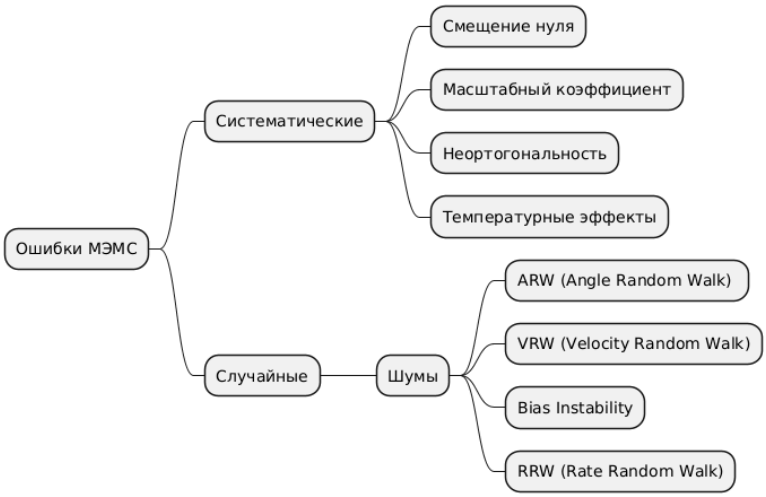

Рисунок 1 – Классификация ошибок МЭМС-датчиков

Для анализа шумов применяется метод Allan variance, позволяющий идентифицировать спектральные составляющие шума. Например, для современных тактических гироскопов уровень bias instability может составлять 1–10°/ч, тогда как для потребительских МЭМС — десятки или сотни °/ч. Систематизация моделей ошибок позволяет корректно учитывать их в фильтрах навигации (например, Калмана) и снижать расхождения между теоретическими и эксплуатационными характеристиками систем [8].

Проблемы и вызовы

Современное развитие методов испытаний МЭМС-датчиков и инерциальных навигационных систем сопровождается рядом нерешённых вопросов. Прежде всего следует отметить фрагментарность существующих методик: различные производители и исследовательские лаборатории используют собственные наборы параметров и метрик, что препятствует сопоставимости получаемых результатов.

Существенным ограничением остаётся и дефицит специализированной метрологической базы. Для проведения корректных испытаний необходимы шестипозиционные стенды, многоосевые поворотные платформы, а также термокамеры с возможностью динамического управления режимами. Однако подобные установки доступны в основном крупным научным центрам и отраслевым НИИ, что сдерживает развитие прикладных исследований [9].

Ещё одной проблемой является несопоставимость результатов. Различия в алгоритмах обработки данных, методах фильтрации, выборе окон усреднения и критериев отбора приводят к тому, что даже при использовании близких аппаратных средств фиксируются существенно отличающиеся характеристики. Это затрудняет накопление единой базы знаний и формирование отраслевых стандартов [10].

Отдельного внимания заслуживает вопрос раздельного тестирования датчиков. В большинстве случаев калибровка проводится для акселерометров и гироскопов по отдельности. Однако в реальных инерциальных системах ошибки возникают на уровне комплексной работы: проявляются перекрёстные влияния, неортогональность осей чувствительности, g-чувствительность гироскопов, а также ошибки синхронизации каналов. Игнорирование этих факторов приводит к расхождению между лабораторными и эксплуатационными характеристиками систем [11].

Сравнение с альтернативными технологиями

МЭМС-датчики конкурируют с более точными, но дорогими технологиями, такими как волоконно-оптические (FOG) и лазерные гироскопы (RLG) [12].

- FOG обладают высокой стабильностью (bias instability до 0,01°/ч), но отличаются большими габаритами и стоимостью.
- RLG обеспечивают ещё более высокую точность и применяются в авиации и космосе, однако требуют сложного обслуживания.
- МЭМС занимают промежуточное положение: уступают по точности, но выигрывают по цене, компактности и энергоэффективности.

Сравнение с альтернативными технологиями представлено в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение с альтернативными технологиями

Технология	Точность (Bias Instability)	Стоимость	Габариты	Применение
Лазерный гироскоп (RLG)	Очень высокая (< 0.01 °/ч)	Очень высокая	Большие	Космос, авиация
Волоконно-оптический гироскоп (FOG)	Высокая (~0.01 °/ч)	Высокая	Средние	Авиация, морская навигация
МЭМС	Средняя-Низкая (1-1000 °/ч)	Низкая	Малые	Автономные системы, роботы, потребительская электроника

Таким образом, именно наличие стандартизированных методик испытаний и калибровки позволяет МЭМС уверенно занять нишу между «дешевыми, но неточными» и «дорогими, но точными» решениями, расширяя спектр их применения в ответственных задачах.

Предлагаемый подход

Для преодоления выявленных ограничений предлагается разработка многоуровневой системы стандартизации, включающей унифицированные сценарии испытаний, согласованные модели ошибок и единый формат представления результатов. Такой подход позволяет обеспечить сопоставимость данных, повысить прослеживаемость измерений и упростить интеграцию в системы моделирования и цифровые двойники.

1. Статические испытания

Базовым методом остаётся шестипозиционный тест акселерометров (±X, ±Y, ±Z), позволяющий оценить смещение нуля, коэффициенты чувствительности и перекрёстные ошибки. При этом используется измерительная модель:

$$a_m = M_a a + b_a + n_a, \quad (1)$$

где:

- a_m – измеренное акселерометром ускорение по трём осям, м/с²;
- a – истинное ускорение, м/с²;
- M_a – матрица масштабных коэффициентов и коррекции неортогональности осей (3×3), учитывающая, что чувствительные оси могут быть смещены относительно идеальных;
- b_a – вектор смещений нуля (bias) по трём осям, м/с²;
- n_a – шум измерений (случайная составляющая), м/с².

Для учёта влияния температуры целесообразно применять циклические испытания в диапазоне рабочих температур с выдержкой до термостабилизации. В ходе экспериментов определяются зависимости:

- смещения нуля $b(T)$, м/с²;
- коэффициентов чувствительности $S(T)$;
- гистерезисные эффекты.

При необходимости строятся полиномиальные модели для температурной компенсации.

Гироскопы оцениваются в условиях нулевой скорости: фиксируется дрейф нуля, вычисляется Allan deviation для параметров bias instability и rate random walk.

2. Динамические испытания

Использование одно-, двух- и трёхосевых поворотных стендов позволяет формировать ступенчатые и гармонические профили угловой скорости и ускорений. Для гироскопа применяется модель:

$$\omega_m = M_g\omega + b_g + K_g a + n_g, \quad (2)$$

где:

- ω_m – измеренная угловая скорость гироскопа, °/с;
- ω – истинная угловая скорость, °/с;
- M_g – матрица масштабных коэффициентов и коррекции неортогональности осей гироскопа (3×3);
- b_g – вектор смещений нуля гироскопа, °/с;
- K_g – матрица или вектор g-чувствительности (показывает, как ускорение влияет на показания гироскопа), °/с на g;
- a – линейное ускорение, м/с²;
- n_g – шум гироскопа, °/с.

Важное значение имеют испытания на вибрационные нагрузки, проводимые по международным стандартам IEC 60068-2-6 и IEC 60068-2-64. Они позволяют выявить устойчивость датчиков к синусоидальным и широкополосным случайным воздействиям. Для проверки ударной прочности применяются профили по ISO 16063-31 [4].

Отдельное направление — испытания влияния электропитания и электромагнитных помех (EMI/EMC), включая оценку воздействия шумов питания на дрейф датчиков.

3. Комплексная калибровка ИНС

Наиболее информативными являются методы совместной калибровки акселерометров и гироскопов. В рамках этого подхода оцениваются матрицы M_a и M_g, векторы смещений b_a и b_g, перекрёстные ошибки, несоосности рамок и временные задержки.

Калибровочные траектории включают совмещённые движения на поворотных столах с контролем температуры, а также специальные «фермерские» траектории, используемые для совместной идентификации параметров в фильтре Калмана.

Сформированные модели ошибок включают g-чувствительность гироскопов, температурные коэффициенты и шумовые характеристики, что позволяет корректно учитывать их в навигационном фильтре.

4. Метрики и обработка результатов

В качестве основных метрик предлагается использовать:

- Allan variance/Allan deviation для извлечения ARW/VRW, bias instability и random walk-параметров с согласованными окнами усреднения τ и фиксированной длительностью записи;
- спектральные показатели (PSD) для анализа шумовых характеристик;
- оценку неопределённости по GUM с указанием составляющих, бюджетов и коэффициентов охвата.

5. Стандартизированный протокол результатов

Для обеспечения машиночитаемости и интеграции в симуляторы предлагается использовать единый формат отчёта (JSON/XML), содержащий обязательные поля: идентификатор датчика, условия испытаний, параметры моделей (M_a, b_a, M_g, b_g, K_g), температурные коэффициенты, Allan-параметры (ARW/VRW, bias instability), PSD,

условия вибро- и ударных испытаний, бюджет неопределённости, дату и средства калибровки.

Пример минимального JSON-паспорта датчика представлен в листинге 1.

Листинг 1 – JSON-паспорт датчика

```
{
  "device_id": "IMU-XYZ-12345",
  "conditions": { "temperature_range_C": [-40, 85], "supply_V": 3.3 },
  "accel": {
    "M_a":  [[1.0008,  0.0012,  -0.0005],[0.0009,  0.9995,  0.0011],[-0.0004,
0.0007, 1.0012]],
    "b_a_mg": [0.8, -1.2, 0.5],
    "temp_coeff": { "b_a_mg_per_C": [0.02, 0.03, 0.01] },
    "VRW_mps2_per_sqrtHz": 0.002
  },
  "gyro": {
    "M_g":  [[1.0005,  0.0007,  -0.0003],[0.0006,  0.9997,  0.0008],[-0.0002,
0.0005, 1.0009]],
    "b_g_dps": [0.05, -0.03, 0.01],
    "K_g_dps_per_g": [0.02, 0.02, 0.03],
    "ARW_dps_per_sqrtHz": 0.12,
    "bias_instability_dph": 8.0
  },
  "uncertainty": { "k": 2, "U_accel_mg": 0.3, "U_gyro_dps": 0.02 }
}
```

UML-визуализация структуры JSON-паспорта датчика в виде классов представлена на рисунке 2.

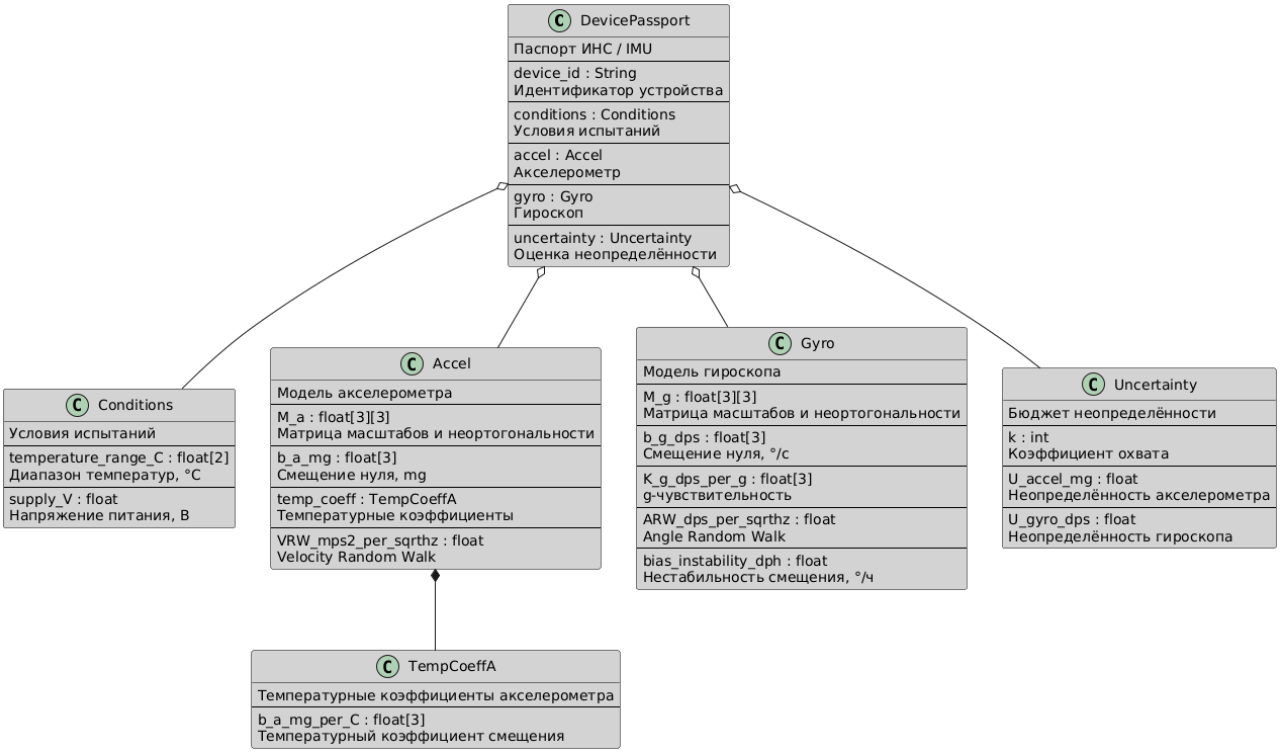

Рисунок 2 – UML-визуализация структуры JSON-паспорта датчика в виде классов

Перспективы применения и роль стандартизации

ИНС на основе МЭМС уже находят применение в самых разных областях [13]:

- авиация и космос — резервная навигация, ориентация спутников;
- автономный транспорт — беспилотные автомобили и морские суда;

- робототехника — управление движением и стабилизация платформ;
- массовый рынок — смартфоны, носимая электроника, дополненная и виртуальная реальность;
- медицина — мониторинг движений и биомеханические исследования.

Однако для выхода на уровень ответственных приложений требуется не только совершенствование сенсоров, но и единые правила метрологической оценки и сертификации. Создание национального стандарта, согласованного с международными (ISO, IEC, IEEE), обеспечит сопоставимость результатов, позволит интегрировать данные в цифровые двойники и повысит доверие к отечественным разработкам.

Заключение

Современные вызовы в области испытаний и калибровки МЭМС-датчиков связаны с фрагментарностью методик, недостаточной метрологической базой и несопоставимостью получаемых результатов. Эти проблемы препятствуют накоплению систематизированных данных, усложняют интеграцию датчиков в состав инерциальных навигационных систем и снижают доверие к конечным решениям при решении ответственных задач.

Перспективным направлением является разработка комплексной, машиночитаемой и прослеживаемой методики, которая обеспечит воспроизводимость испытаний, сопоставимость результатов между лабораториями и производителями, а также ускорит процессы сертификации. Важным шагом представляется инициирование национального стандарта на основе международных документов (ISO 16063, IEC 60068, ISO/IEC 17025, IEEE 528/1293/1431/2700), включающего унифицированный формат отчетов и набор согласованных сценариев статико-динамических испытаний.

Таким образом, создание единого стандартизированного подхода позволит повысить адекватность представления о надежности и точности ИНС, обеспечит сопоставимость исследований и укрепит конкурентоспособность отечественных разработок на мировом рынке навигационных технологий.

Список литературы

1. Голощапов А. Применение МЭМС-технологии в навигации // Компоненты и технологии. – 2014. – № 4 (153). – Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-mems-tehnologii-v-navigatsii (дата обращения: 17.09.2025).
2. ГОСТ Р 8.820–2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2013. – 12 с.
3. ГОСТ Р 52931–2008. Приборы контроля и измерений. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2008. – 10 с.
4. ISO 16063-1:2013. Vibration and shock — Calibration of vibration and shock transducers — Part 1: Basic concepts. – Geneva: International Organization for Standardization, 2013. – 24 p.
5. IEEE Std 1293-2018. IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Laser Gyros. – New York: IEEE, 2018. – 30 p.
6. IEEE Std 2700-2017. IEEE Standard for Sensor Performance Parameter Definitions. – New York: IEEE, 2017. – 7 p.
7. Астахов А. М., Черненькая Л. В. Оценка накапливающейся ошибки акселерометра и гироскопа в задаче навигации при мониторинге и охране магистральных трубопроводов // SAEC. – 2024. – № 1. – Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-nakaplivayuscheysya-oshibki-akselerometra-i-giroskopa-v-zadache-navigatsii-pri-monitoringe-i-ohrane-magistralnyh (дата обращения: 17.09.2025).
8. Pupo L.B. Characterization of Errors and Noises in MEMS Inertial Sensors Using Allan Variance Method: thesis / Leslie Barreda Pupo; supervisors Josep Maria Mirats Tur, Maria Concepcion Santos Blanco. – Barcelona, 2016. – 118 p. – Режим доступа: https://upcommons.upc.edu/bitstreams/9872d2b7-3939-41f8-8bbf-7709b3632f3a/download (дата обращения: 17.09.2025).
9. Серанова А. А., Ермаков Р. В., Львов А. А., Калихман Д. М., Кондратов Д. В. Метод исследования инерциальных датчиков МЭМС-типа, предназначенных для эксплуатации на летательных аппаратах вертолётного типа при воздействии на них синусоидальной вибрации // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. – 2018. – № 3. – Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/metod-issledovaniya-inertsialnyh-datchikov-mems-tipa-prednaznachennyh-dlya-ekspluatatsii-na-letatelnyh-apparatah-vertolyotnogo-tipa (дата обращения: 17.09.2025).
10. Брич И. А. Сравнительный анализ алгоритмов фильтрации данных инерциальных датчиков // Политехнический молодежный журнал. – 2023. – № 2 (79). – С. 5–12. – DOI: 10.18698/2541-8009-2023-02-864

11. Ru X., Gu N., Shang H., Zhang H. MEMS Inertial Sensor Calibration Technology: Current Status and Future Trends // Micromachines (Basel). – 2022. – Vol. 13, № 6. – P. 879. doi: 10.3390/mi13060879. PMID: 35744491; PMCID: PMC9228165.

12. Сысоева С. Тенденции рынка high-end МЭМС-датчиков инерции. Новые уровни характеристик и исполнения // Компоненты и технологии. – 2014. – № 6 (155). – Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/tendentsii-rynka-high-end-mems-datchikov-inertsii-novye-urovni-harakteristik-i-ispolneniya (дата обращения: 17.09.2025).

13. Тимошенков А. С., Кочурина Е. С., Галкин А. А. [и др.]. Перспективы развития инерциальных микроэлектромеханических модулей для наземной навигации // Научный вестник. Развитие систем управления. – 2023. – № 4. – С. 150–161. – EDN ADSDVV.

References

1. Goloshchapov A. Primenenie MEMS-tekhnologii v navigatsii [Application of MEMS technology in navigation] // Komponenty i tekhnologii. – 2014. – No. 4 (153). – Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-mems-tehnologii-v-navigatsii (accessed: 17.09.2025).

2. GOST R 8.820–2013. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmerenii. Metrologicheskoe obespechenie. Osnovnye polozheniya. – Moscow: Standartinform, 2013. – 12 p.

3. GOST R 52931–2008. Pribory kontrolya i izmerenii. Obshchie tekhnicheskie usloviya. – Moscow: Standartinform, 2008. – 10 p.

4. ISO 16063-1:2013. Vibration and shock — Calibration of vibration and shock transducers — Part 1: Basic concepts. – Geneva: International Organization for Standardization, 2013. – 24 p.

5. IEEE Std 1293-2018. IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Laser Gyros. – New York: IEEE, 2018. – 30 p.

6. IEEE Std 2700-2017. IEEE Standard for Sensor Performance Parameter Definitions. – New York: IEEE, 2017. – 7 p.

7. Astakhov A. M., Chernenkaya L. V. Otsenka nakaplivayushcheisya oshibki akselerometra i giroskopa v zadache navigatsii pri monitoringe i okhrane magistral'nykh truboprovodov [Evaluation of accumulated error of accelerometer and gyroscope in navigation task for monitoring and protection of main pipelines] // SAEC. – 2024. – No. 1. – Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-nakaplivayuscheysya-oshibki-akselerometra-i-giroskopa-v-zadache-navigatsii-pri-monitoringe-i-ohrane-magistralnyh (accessed: 17.09.2025).

8. Pupo L.B. Characterization of Errors and Noises in MEMS Inertial Sensors Using Allan Variance Method: thesis / Leslie Barreda Pupo; supervisors Josep Maria Mirats Tur, Maria Concepcion Santos Blanco. – Barcelona, 2016. – 118 p. – Available at: https://upcommons.upc.edu/bitstreams/9872d2b7-3939-41f8-8bbf-7709b3632f3a/download (accessed: 17.09.2025).

9. Seranova A. A., Ermakov R. V., Lvov A. A., Kalikhman D. M., Kondratov D. V. Metod issledovaniya inertsial'nykh datchikov MEMS-tipa, prednaznachennykh dlya ekspluatatsii na letatel'nykh apparatakh vertoletnogo tipa pri vozdeistvii na nikh sinusoidal'noi vibratsii [Research method for MEMS-type inertial sensors intended for operation on helicopter-type aircraft under sinusoidal vibration] // Matematicheskoe modelirovanie, komp'yuternyi i naturnyi eksperiment v estestvennykh naukakh. – 2018. – No. 3. – Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/metod-issledovaniya-inertsialnyh-datchikov-mems-tipa-prednaznachennyh-dlya-ekspluatatsii-na-letatelnyh-apparatah-vertolyotnogo-tipa (accessed: 17.09.2025).

10. Brich I. A. Sravnitel'nyi analiz algoritmov fil'tratsii dannykh inertsial'nykh datchikov [Comparative analysis of algorithms for filtering inertial sensor data] // Politekhnicheskii molodezhnyi zhurnal. – 2023. – No. 2 (79). – P. 5–12. – DOI: 10.18698/2541-8009-2023-02-864.

11. Ru X., Gu N., Shang H., Zhang H. MEMS Inertial Sensor Calibration Technology: Current Status and Future Trends // Micromachines (Basel). – 2022. – Vol. 13, No. 6. – P. 879. doi: 10.3390/mi13060879. PMID: 35744491; PMCID: PMC9228165.

12. Sysoeva S. Tendentsii rynka high-end MEMS-datchikov inertsii. Novye urovni kharakteristik i ispolneniya [Trends in the market of high-end MEMS inertia sensors. New levels of performance and implementation] // Komponenty i tekhnologii. – 2014. – No. 6 (155). – Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/tendentsii-rynka-high-end-mems-datchikov-inertsii-novye-urovni-harakteristik-i-ispolneniya (accessed: 17.09.2025).

13. Timoshenkov A. S., Kochurina E. S., Galkin A. A. [et al.]. Perspektivy razvitiya inertsial'nykh mikroelektromekhanicheskikh modulei dlya nazemnoi navigatsii [Prospects for the development of inertial MEMS modules for ground navigation] // Nauchnyi vestnik. Razvitie sistem upravleniya. – 2023. – No. 4. – P. 150–161. – EDN ADSDVV.