

**XXXIV КОНФЕРЕНЦИЯ  
ПАМЯТИ ВЫДАЮЩЕГОСЯ КОНСТРУКТОРА  
ГИРОСКОПИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ  
Н.Н.ОСТРЯКОВА**

**К 120-ЛЕТИЮ УЧЕНОГО**



**1–3 октября 2024 г.**

**Санкт-Петербург**

**СБОРНИК ДОКЛАДОВ**

Санкт-Петербург  
2024

**XXXIV конференция памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова** – СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2024. 285 с. ISBN 978-5-91995-104-9

*В настоящем издании опубликованы расширенные рефераты докладов, представленных на XXXIV конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н.Острякова.*

*Рефераты публикуются в авторской редакции.*

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ ПРОГРАММНОГО КОМИТЕТА КОНФЕРЕНЦИИ**

**АКАДЕМИК РАН В.Г.ПЕШЕХОНОВ**

**ОРГАНИЗАТОРЫ:**

- ГНЦ РФ АО «КОНЦЕРН «ЦНИИ «ЭЛЕКТРОПРИБОР»
- ОБЪЕДИНЕННЫЙ НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРИКЛАДНЫМ НАУКАМ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ РАЗВИТИЮ ПРОМЫШЛЕННОСТИ СПБО РАН
- ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РФ АО «КОНЦЕРН «ЦНИИ «ЭЛЕКТРОПРИБОР»
- САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «ЛЭТИ» ИМЕНИ В.И.УЛЬЯНОВА (ЛЕНИНА)
- УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
- САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО
- САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ (ГУАП)
- ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАШИНОВЕДЕНИЯ РАН

**ПРИ ПОДДЕРЖКЕ:**

- САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОЙ ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ ГРУППЫ РОССИЙСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО КОМИТЕТА ПО АВТОМАТИЧЕСКОМУ УПРАВЛЕНИЮ
- ОТДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИКИ, МАШИНОСТРОЕНИЯ, МЕХАНИКИ И ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ РАН
- МЕЖДУНАРОДНОЙ ОБЩЕСТВЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИИ «АКАДЕМИЯ НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ»
- ЖУРНАЛА «ГИРОСКОПИЯ И НАВИГАЦИЯ»

А. В. КОЗЛОВ, Ф. С. КАПРАЛОВ, Г. О. БАРАНЦЕВ, С. А. ФЁДОРОВ  
(МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва)

## ПОЛНЫЙ ЦИКЛ КАЛИБРОВКИ БЕСКАРДАННЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ В СБОРЕ

*Доклад посвящён обзору широкого набора источников погрешностей инерциальных датчиков и соответствующих им калибровочных процедур, составляющим вместе полный цикл калибровки вновь разрабатываемых инерциальных навигационных систем. Рассмотрены стандартные погрешности, рассинхронизация показаний, разнесение чувствительных масс акселерометров, юстировочные параметры, упругие деформации осей чувствительности и другие. Приводятся численные оценки вызванных ими навигационных ошибок.*

**Введение.** Как правило, публикации и доклады о калибровке бескарданных инерциальных навигационных систем (БИНС), посвящаются только отдельным методикам оценки смещений нулевых сигналов, масштабных коэффициентов и неортогональности осей чувствительности инерциальных датчиков — датчиков угловой скорости (гироскопов) и датчиков удельной силы, приложенной к чувствительной массе (ньютонметров/акселерометров). При этом остальные источники погрешностей считаются уже скомпенсированными. Действительно, перечисленные параметры необходимо оценивать для каждого экземпляра системы отдельно, и от точности их оценок существенно зависят ошибки навигационного решения [1]. Однако фактически полный набор калибровочных параметров и проверочных экспериментов, направленных на установление соответствия погрешностей инерциальных датчиков принятым для них моделям, особенно для вновь разрабатываемых систем, оказывается гораздо обширнее. Доклад посвящён обзору более полного набора источников навигационных ошибок и соответствующих им калибровочных экспериментов, основанному на последнем опыте разработки и калибровки целого ряда навигационных систем различного класса точности — от микромеханического гироскопа и БИНС различного применения до гравиметрических приборов отечественного и зарубежного производства. Многие из них описаны в литературе, но некоторые рассмотренные в докладе методики, а также их сочетания, позволяющие сократить общую продолжительность калибровки, разработаны авторами. Рассматривается также взаимное влияние одних погрешностей на возможность оценки параметров других, естественным образом встречающееся на практике при работе с неполностью калиброванными БИНС в процессе разработки и производства. Приводятся количественные соотношения и примеры, помогающие выделить существенные погрешности для конкретных БИНС и объектов-носителей.

**Типы погрешностей.** В рамках данного доклада разделим источники погрешностей измерений инерциальных датчиков на следующие классы, различающиеся видами и объёмом калибровочных процедур:

- параметры, одинаковые для БИНС одного типа;
- параметры модели погрешностей, индивидуальные для каждого экземпляра БИНС;
- температурные зависимости;
- параметры калибровочного эксперимента.

Далее рассмотрим эти классы по отдельности.

**Параметры, одинаковые для БИНС одного типа.** Следующие погрешности, как правило, калибруются (или контролируются) один раз для БИНС одного типа в процессе разработки:

- рассинхронизация гироскопических трактов;
- рассинхронизация между гироскопической и акселерометрической информацией;
- разнесения чувствительных масс ньютонметров.

Важность синхронизации гироскопических трактов иногда упускается при разработке и калибровке навигационных приборов. По всей видимости, это происходит потому, что проверочные и калибровочные процедуры чаще всего включают в себя повороты БИНС только вокруг приборных осей. В них рассинхронизация гироскопов не приводит к навигационным ошибкам. В то же время реальное движение, например, летательного аппарата или малого судна, как правило включает в себя более сложные вращения. Также некоторые БИНС испытывают суще-

ственные вибрации, при которых рассинхронизация гироскопических трактов может вносить заметный вклад в суммарную навигационную ошибку. Например, для гармонических колебаний вокруг биссектрисы двух приборных осей каждая микросекунда постоянной рассинхронизации между показаниями соответствующих датчиков угловой скорости при амплитуде  $90^\circ$  и периоде 5 с (активное маневрирование), или при амплитуде  $3'$  и частоте 320 Гц (вибрации) приводит к среднему дрейфу ориентации по ортогональной оси около  $0.15^\circ/\text{ч}$ , что неприемлемо для БИНС навигационного класса точности. При рассинхронизации порядка первых миллисекунд эти дополнительные дрейфы становятся существенными даже для грубых микромеханических навигационных устройств. Как правило, синхронизация показаний датчиков угловой скорости должна быть предусмотрена на аппаратном уровне в пределах пренебрежимо малых величин. Для проверки выполнения этого требования, а в случае его нарушения для оценки величины рассинхронизации, в [2] авторами предложен специальный эксперимент. Методика оценки построена таким образом, чтобы не зависеть от остаточных погрешностей калибровки инерциальных датчиков другого происхождения.

Рассинхронизация измерений блоков гироскопов и ньютонометров не так существенна в режиме навигации, однако, как выяснилось в гравиметрических полётах с так называемым «облётот рельефа», она существенно влияет на оценку гравитационных аномалий. Параметры рассинхронизации данного типа проявляются во вращениях вокруг горизонтальной оси с переменной скоростью, и могут быть отделены от других погрешностей в динамическом калибровочном эксперименте, упомянутом ниже.

Разнесение чувствительных масс ньютонометров как источник навигационных ошибок хорошо известно под названием «сайз эффекта». Несмотря на достаточно широкое обсуждение его в литературе, на практике нередко он либо игнорируется, либо сводится к компенсации в соответствии с конструкторскими чертежами блока чувствительных элементов (БЧЭ). Однако на самом деле погрешность такой компенсации может потребовать специальной оценки. Например, в колебательных движениях зависимость навигационной ошибки от частоты является квадратичной, и в зависимости от режима движения объекта-носителя она может составлять сотни метров при недокомпенсации разнесений чувствительных масс порядка 5–10 мм. Приведение измерений ньютонометров в одну точку с высокой точностью актуально и в гравиметрии ввиду экстремальных требований к величине систематических ошибок измерения удельных сил. Поэтому для некоторых БИНС фактически требуемая точность компенсации разнесения имеет величину в пределах 1 мм (см. методику [3]), что практически недостижимо по чертежам ввиду конечных размеров самих чувствительных масс порядка 1 см.

**Параметры, индивидуальные для каждого экземпляра БИНС.** Погрешности, оценка параметров модели которых требуется для каждой системы отдельно, разделим на такие группы:

- погрешности сервисной электроники;
- юстировочные параметры;
- стандартная модель погрешностей инерциальных датчиков;
- расширенные модели погрешностей: упругие деформации осей чувствительности и др.

Погрешности сервисной электроники иногда можно объединить с погрешностями инерциальных датчиков, иногда они компенсируются при помощи так называемой «автокалибровки» в реальном времени, а иногда для их компенсации требуются отдельные калибровочные процедуры. Известно, например, что аналого-цифровые преобразователи ньютонометров могут заметно менять свои тепловые свойства после установки внутрь БИНС, в результате чего для калибровки зависимости смещений их нулевых сигналов и/или масштабных коэффициентов от температуры требуется предусматривать возможность подключения прецизионных резисторов вместо выходных сигналов ньютонометров. В целом тема калибровки сервисной электроники достаточно обширна сама по себе и не рассматривается подробно в докладе. Отметим лишь, что в ряде случаев она является обязательной, и для определения этого факта необходимо предусматривать отдельные исследования.

Юстировочные параметры отвечают за привязку приборной системы координат инерциальных датчиков к корпусу БЧЭ или БИНС [4]. В дальнейшем корпус прибора привязывается к системе координат, связанной с объектом-носителем, но такие процедуры сильно зависят от конкретного объекта и обычно выходят за рамки разработки навигационной системы. Тройка юстировочных углов определяет конечный поворот (возможно, малый). В свою очередь, этот

поворот может быть постоянным (как правило) или переменным, если система амортизации БЧЭ при номинальных полётных перегрузках не гарантирует изменение юстировочных углов в заданных пределах. Например, если суммарные коэффициенты крутильной упругости имеют величину более  $0.5'/g$ , при перегрузке в  $6g$  ошибки юстировки выходят за требуемую границу в  $3'$ . Рекомендуется избегать переменных юстировочных поворотов, так как они приводят к частичной компенсации физического движения БЧЭ, которое измеряется инерциальными датчиками, и факт компенсации необходимо учитывать в их показаниях.

Под стандартной моделью погрешностей инерциальных датчиков в данном докладе подразумеваются смещения нулевых сигналов, ошибки масштабных коэффициентов и неортогональности осей чувствительности. Они достаточно хорошо освещены в литературе (хотя, как правило, в изоляции от остальных источников погрешностей) и также не рассматриваются подробно в настоящем докладе. Наличие этих погрешностей должно учитываться или оговариваться в любой калибровочной процедуре, так как даже у откалиброванных систем могут присутствовать, например, смещения нулевых сигналов в запуске. В докладе рассматриваются две методики калибровки — статическая и динамическая [5], — предназначенных для оценки как параметров стандартной модели погрешностей, так и других параметров.

Расширенные модели погрешностей инерциальных датчиков, включающие нелинейные слабые, имеют ряд особенностей. Во-первых, они должны быть малы настолько, чтобы можно было пренебречь мультипликативными шумовыми погрешностями, возникающими при их компенсации. Во-вторых, наблюдаемость соответствующих им параметров в задачах оценивания, т.е. отделимость от других величин, как правило, плохо изучена. К известным погрешностям такого типа относятся динамические дрейфы механических гироскопов, нелинейности характеристик инерциальных датчиков (несимметричность масштабов, кубические зависимости) и упругие деформации осей чувствительности гироскопов и ньютонометров. Некоторые из них проявляются в особых движениях, некоторые — во время вибраций, вызывая навигационные ошибки больше по величине, чем другие источники ошибок. Их калибровка может быть включена в упомянутые выше методики калибровки стандартной модели погрешностей с обеспечением условий оцениваемости дополнительных параметров (см. [6]). Отдельно рассматриваются варианты БИНС с избыточным числом измерительных каналов, например с шестью ньютонометрами или с шестью ньютонометрами и шестью гироскопами.

**Температурные зависимости.** Некоторые из рассмотренных выше параметров существенно зависят от температуры. Традиционный подход к их калибровке заключается в проведении экспериментов после установления температурного равновесия в нескольких температурных точках. Однако ожидание термостабилизации может быть затратным по времени, поэтому существует возможность включения в модель погрешностей, например, коэффициентов линейной зависимости от температуры, и оценивания их наряду с остальными параметрами, исследованная в [7]. При этом важно предусмотреть контроль наблюдаемости, поскольку в связи с конечной скоростью теплопередачи внутри БИНС изменением температуры инерциальных датчиков сложно управлять так, чтобы обеспечивать какие-либо заданные циклограммы. Кроме того, для микромеханических инерциальных датчиков известны случаи существенных зависимостей их показаний не только от температуры, но и от профиля её изменения во времени.

**Параметры калибровочного эксперимента.** При проведении калибровки встречаются величины, которые требуется оценить не для последующей компенсации погрешностей БИНС, а для того, чтобы получить неискажённые оценки остальных параметров. К ним относятся:

- уклонение осей поворотного стенда от линии отвеса и ошибка их привязки в азимуте;
- отнесение измерительного центра БИНС от центра вращения поворотного стенда [8];
- параметры системы амортизации БЧЭ, описанные выше при рассмотрении юстировки.

Для данных параметров не обязательно обеспечение их полной наблюдаемости, однако важен их учёт в моделях измерений и возможность отделения от величин, которые будут использоваться при работе БИНС в режиме навигации.

**Заключение.** Рассмотрен расширенный перечень источников погрешностей БИНС, которым можно руководствоваться при разработке и испытаниях инерциальных систем. Отмечено, что некоторые игнорируемые на практике источники на самом деле требуют отдельных исследова-

ний, подтверждающих их отсутствие или несущественный вклад в навигационные ошибки для конкретных объектов-носителей. Даны методики их калибровки и контроля.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Kuznetsov A., Molchanov A., Fomichev A., Zheleznov V., Kozlov A.** On Guaranteeing Tolerances for Strapdown INS Instrumental Errors. 30th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS), Saint Petersburg, Russia, 2023, pp. 1-6. DOI: 10.23919/ICINS51816.2023.10168385.
2. **Kozlov A., Kapralov F., Fomichev A.** Calibration of a Timing Skew between Gyroscope Measurements in a Strapdown Inertial Navigation System. 26th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS), St. Petersburg, Russia, 2019, pp. 1-5. DOI: 10.23919/ICINS.2019.8769417.
3. **Kozlov A., Kapralov F.** Millimeter-level calibration of IMU size effect and its compensation in navigation grade systems. 2019 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS), Braunschweig, Germany, 2019, pp. 1-12. DOI: 10.1109/ISS46986.2019.8943630.
4. **Kozlov A.; Kapralov F.** Angular Misalignment Calibration for Dual-Antenna GNSS/IMU Navigation Sensor. Sensors 2023, 23, 77. DOI: 10.3390/s23010077.
5. **Vavilova N., Vasineva I., Golovan A., Kozlov A., Papusha I., Parusnikov N.** The Calibration Problem in Inertial Navigation. Journal of Mathematical Sciences, 253. DOI: 10.1007/s10958-021-05272-y.
6. **Barantsev G., Kozlov A., Shaimardanov I., Nekrasov A.** A Model of the Elastic Dynamic Torsion of a Ring Laser Gyroscope Mechanical Dither and a Method for its Calibration. 29th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS), Saint Petersburg, Russian Federation, 2022, pp. 1-4. DOI: 10.23919/ICINS51784.2022.9815435.
7. **Kozlov A., Tarygin I., Golovan A., Shaymardanov I., Dzuev A.** Calibration of an inertial measurement unit at changing temperature with simultaneous estimation of temperature variation coefficients: A case study on BINS-RT. 24th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS), St. Petersburg, Russia, 2017, pp. 1-3. DOI: 10.23919/ICINS.2017.7995635.
8. **Kozlov A., Sazonov I., Vavilova, N.** IMU calibration on a low grade turntable: Embedded estimation of the instrument displacement from the axis of rotation. 2014 International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), Laguna Beach, CA, USA, 2014, pp. 1-4. DOI: 10.1109/ISISS.2014.6782525.

A.V. Kozlov, F.S. Kapralov, G.O. Barantsev, S.A. Fedorov (Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia). **Complete Calibration Cycle for Assembled Strapdown Inertial Navigation Systems**

*Abstract.* The report provides an extended list of error sources of inertial sensors and their corresponding calibration procedures. Altogether, they constitute a complete calibration cycle, which every navigation system should undergo through its development and production. We discuss standard sensor error model, as well as their timing skew, size effect, angular misalignment, elastic deformations of axes of sensitivity, and other parameters. Quantitative assessment of the produced navigation errors allows one to evaluate whether particular effects should be addressed when developing a new system and its calibration methods.

**XXXIV конференция памяти выдающегося конструктора  
гироскопических приборов Н.Н. Острякова, 2024**

Верстка *А.А. Зуева*

---

Государственный научный центр Российской Федерации АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»  
197046, С.-Петербург, ул. Малая Посадская, 30.  
Тел. (812) 499-82-93, факс (812) 232 33 76,  
e-mail: editor@eprib.ru  
<http://www.elektropribor.spb.ru>