

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

*На правах рукописи*

**Тарыгин Илья Евгеньевич**

**Расширенные температурные модели погрешностей  
измерений инерциальных датчиков в задаче калибровки**

1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2024

Диссертация подготовлена на кафедре прикладной механики и управления механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

**Научные руководители:**

*Голован Андрей Андреевич, доктор физико-математических наук*

*Козлов Александр Владимирович, кандидат физико-математических наук*

**Официальные оппоненты:**

*Меркурьев Игорь Владимирович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Национальный исследовательский университет “МЭИ”, кафедра робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин, заведующий кафедрой*

*Садеков Ринат Наилевич, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Национальный исследовательский технологический университет “МИСИС” кафедра “Инженерной кибернетики”, профессор*

*Веремеенко Константин Константинович, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», институт № 3 «Системы управления, информатика и электроэнергетика», начальник научно-исследовательского отделения*

Защита диссертации состоится 5 апреля 2024 г. в 16 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.011.7 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, Главное здание МГУ, механико-математический факультет, аудитория 16-10.

E-mail: [dissovet.msu.011.7@math.msu.ru](mailto:dissovet.msu.011.7@math.msu.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/011.7/2841>.

Автореферат разослан 21 февраля 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат физико-математических наук

М.А. Муницина

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Диссертационная работа посвящена актуальной проблеме калибровки бескарданных инерциальных навигационных систем (БИНС), которые в наши дни являются приборной основой бортовых навигационных комплексов подвижных объектов различного назначения. В качестве первичной информации для построения навигационного решения в БИНС выступают измерения инерциальных датчиков: ньютонометров (акселерометров) и датчиков угловой скорости — ДУС (гироскопов). ДУС измеряют проекции вектора абсолютной угловой скорости объекта на собственные оси чувствительности, а ньютонометры — проекции вектора удельной силы реакции со стороны внешних тел, действующей на их чувствительные массы. В вычислителе БИНС решается прямая задача механики: на основе измерений инерциальных датчиков, моделей силы тяжести, формы и вращения Земли, а также начальных условий определяются параметры движения объекта, на котором установлена БИНС.

Точность навигационного решения во многом определяется инструментальными погрешностями инерциальных датчиков, а именно погрешностями смещений нулевых сигналов, масштабных коэффициентов, углов перекосов осей чувствительности и пр. Задача калибровки состоит в оценке параметров априорной модели погрешностей измерений инерциальных датчиков по результатам калибровочных экспериментов, проходящих на специализированном оборудовании. Решение этой задачи позволяет компенсировать погрешности измерений инерциальных датчиков при функционировании системы. Поскольку инструментальные погрешности подвержены влиянию температуры, а БИНС во время эксплуатации испытывает широкодиапазонную температурную нагрузку, возникает задача учета температурных зависимостей погрешностей измерений инерциальных датчиков во время калибровки. В наши дни калибровке БИНС с учетом температурных зависимостей уделяется большое внимание, поскольку она позволяет повысить точность системы благодаря решению чисто математической задачи (не прибегая к решению сложной технологической задачи по повышению точности систем или к использованию дополнительного оборудования для термостатирования системы). Таким образом, разработка методов калибровки БИНС с учетом температурных зависимостей является актуальной проблемой прикладной механики.

**Целью** диссертации является разработка и обоснование метода калибровки БИНС, учитывающего температурные вариации погрешностей измерений инерциальных датчиков и не требующего установления температурного равновесия в системе (в отличие от большинства других методик); при этом температурные вариации включают зависимости от температуры, скорости изменения температуры и компонент пространственного градиента температуры.

Для достижения поставленных целей решались следующие **задачи**.

1. Разработать математические модели погрешностей измерений инерциальных датчиков, учитывающие зависимости от температуры, производной температуры по времени и пространственного градиента температуры.
2. Сформулировать математическую постановку задачи температурной калибровки и исследовать наблюдаемость в соответствующей задаче оценивания.

3. Провести полунатурное численное моделирование с целью проведения ковариационного анализа и проверки выводов аналитического исследования.
4. Решить задачу оценки производной температуры по времени внутри БИНС по показаниям датчиков температуры, с учетом особенностей измерений.
5. Проверить работоспособность методики при калибровке реальных систем различного класса точности.
6. Модифицировать предложенную в работе методику для случая калибровки блока ДУС без ньютонометров.

**Методология и методы исследования.** В работе используются следующие методы.

1. Методы оптимального оценивания (численно устойчивая реализация дискретного фильтра Калмана методом корня из ковариационной матрицы, его модификация с исключением устаревших измерений, метод градиентного спуска).
2. Методы исследования наблюдаемости и оцениваемости линейных динамических систем (разложение измерений линейной динамической системы по базису линейно независимых функций, ковариационный анализ).
3. Численные методы решения дифференциальных уравнений.

#### **Основные положения, выносимые на защиту.**

1. В случае калибровки БИНС в трех циклах вращения вокруг каждой из приборных осей в плоскости горизонта, необходимым и достаточным условием наблюдаемости параметров расширенной модели погрешностей инерциальных датчиков является линейная независимость функций температуры, производной температуры по времени и компонент пространственного градиента температуры как функций времени.
2. Разработанная методика температурной калибровки БИНС позволяет в разы сократить время, затрачиваемое на проведение калибровочных экспериментов.
3. Разработанный метод оценки скорости изменения температуры по измерениям термодатчиков позволяет получить оценку производной температуры с необходимой точностью в реальном времени, когда шаг квантования измерений термодатчиков велик, и, как следствие, ошибка измерений принципиально отличается от традиционной модели белого шума.
4. Модификация предложенной методики калибровки БИНС позволяет осуществлять с необходимой точностью температурную калибровку блока ДУС без ньютонометров при наличии измерений калибровочного стенда.

**Достоверность и обоснованность результатов** аналитических выводов обусловлена использованием строгих математических методов механики управляемых систем, теории оценивания, обыкновенных дифференциальных уравнений и др. Алгоритмы представленные в работе проверены при помощи численного моделирования и при обработке реальных экспериментов с системами различного класса точности.

**Научная новизна.** В диссертации получены следующие **новые результаты:**

- разработана, исследована и обоснована методика температурной калибровки БИНС, предполагающая оценку коэффициентов температурного влияния на показания инерциальных датчиков внутри БИНС одновременно с оценкой стандартного набора инструментальных погрешностей инерциальных датчиков по результатам калибровочного эксперимента при изменяющейся температуре;
- подтверждена эффективность рассматриваемой методики по результатам калибровки реальных систем различного класса точности по предложенной методике; проведен сравнительный анализ точности навигационного решения БИНС до и после калибровки;
- проведено аналитическое исследование наблюдаемости коэффициентов температурного влияния и исчерпывающее численное моделирование; сформулированы необходимые и достаточные условия наблюдаемости в соответствующей задаче оценивания;
- впервые сформулирована задача оценивания скорости изменения температуры в реальном времени по измерениям датчиков температуры с большим шагом квантования; предложен и обоснован соответствующий алгоритм оценивания, в виде модификации фильтра Калмана; обосновано использование экспоненциальных функций в качестве формирующего уравнения для фазового вектора;
- решена задача температурной калибровки блока ДУС без использования ньютонометров (частный случай) по измерениям датчиков точного калибровочного стенда, с учетом возможного временного рассогласования показаний датчиков БИНС и стенда; по результатам численного моделирования для системы тактического класса точности проведен ковариационный анализ, подтверждена возможность оценки параметров модели погрешностей измерений с точностью, соответствующей классу системы.

**Теоретическая ценность** работы состоит в разработке и анализе математической модели температурной калибровки БИНС, доработке существующих моделей погрешностей инерциальных датчиков, анализе наблюдаемости и оцениваемости параметров температурного влияния.

**Практическая значимость** работы состоит в том, что предложенная методика калибровки БИНС в эксперименте с изменяющейся температурой позволяет сократить время проведения калибровочных экспериментов в несколько раз.

Более того, методика предполагает учет различных коэффициентов зависимости для каждого типа инструментальных погрешностей, что повышает потенциальную точность калибровки в целом. Методика опробована при калибровке БИНС-РТ, производства АО «Инерциальные Технологии Технокомплекса» (г. Раменское); БЧЭММ-1 и БИНС-СП2, производства АО «Московский институт электромеханики и автоматики»; систем разработки АО «Арзамасское научно-производственное предприятие ТЕМП-АВИА» и др.

**Апробация работы.** Результаты работы прошли апробацию на международных и всероссийских научных конференциях:

- XXI, XXIII, XXIV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам, Государственный научный центр Российской Федерации АО «КОНЦЕРН «ЦНИИ «ЭЛЕКТРОПРИБОР» Санкт-Петербург, Россия, 2014, 2016, 2017;
- 8th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST). — IEEE Istanbul, Turkey, June 2017.

**Публикации по теме диссертации.** По материалам диссертации подготовлены публикации в **12** печатных изданиях, **7** из которых изданы в рецензируемых журналах (**5** из которых индексируются в международных системах Scopus и Web Of Science) и **5** в тезисах трудов конференций.

**Личный вклад автора.** Все выносимые на защиту результаты и положения получены лично автором или при его непосредственном участии. Научные руководители А.А. Голован и А.В. Козлов предложили постановку задач и методы их исследования, осуществляли общее руководство работой и контролировали достоверность полученных результатов. Результаты, составляющие основное содержание диссертации, получены непосредственно автором.

Вклад соискателя в работы, опубликованные в соавторстве (согласно списку «Публикаций автора по теме диссертации в журналах, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus») характеризуется следующим образом. В работе [3] вклад автора является основополагающим: математическая постановка задачи, аналитическое исследование наблюдаемости, численное моделирование и подготовка статьи к публикации выполнены автором лично. В работе [4] авторский вклад соискателя составляет  $1/2$  и состоит в проведении, описании и интерпретации результатов численного моделирования, подготовке статьи к публикации. В работе [5] авторский вклад составляет  $1/4$  и состоит в подготовке и анализе результатов численного моделирования.

### **Объем, структура и содержание работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации **151** страница текста с **45** рисунками и **13** таблицами. Список литературы содержит **96** наименований.

Во **введении** дан обзор литературы, обоснована актуальность решаемой проблемы, ставятся задачи исследования, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы. Также представлено краткое содержание работы, перечислены публикации и доклады по теме исследования.

В **первой** главе рассматриваются традиционные модели погрешностей измерений инерциальных датчиков и их модификации, учитывающие зависимости от температуры, производной температуры по времени (скорости изменения температуры) и компонент пространственного градиента температуры. Формулируется математическая постановка задачи калибровки в виде задачи оценивания вектора состояния линейной динамической системы по вектору измерений, линейно связанного с вектором состояния. Исследуется наблюдаемость параметров расширенной модели погрешностей измерений инерциальных датчиков, а также формулируются необходимые и достаточные условия наблюдаемости коэффициентов зависимостей от температуры, производной температуры по времени и компонент пространственного градиента температуры. Далее проводится полунатурное численное моделирование с целью подтверждения выводов аналитического исследования.

В работе векторы обозначаются строчными буквами с нижним индексом, обозначающим, в какой системе координат задан вектор. Вводятся понятия приборного трехгранника  $Mz$ , который по построению связан с осями чувствительности ньютометров, модельного трехгранника  $Mz'$  — числового образа приборного трехгранника, а также опорного (географического) трехгранника  $Mx$ . В опорной системе координат известны векторы силы тяжести  $g_x$  и угловой скорости Земли  $u_x$ . Матрица поворота  $L_z$  задает переход из опорной системы координат в приборную.

Для погрешностей измерений ДУС и ньютометров  $\nu_z, \Delta f_z$  вводятся априорные модели вида<sup>1</sup>:

$$\begin{aligned}\Delta f_z^i &= \Delta f_z^{0i} + K_{\Delta f}^i T_f^i + \Lambda_{\Delta f}^i \dot{T}_f^i + \Pi_{\Delta f}^{ij} \nabla_j T_f^i + \\ &\quad + (\Gamma_j^i + K_{\Gamma_j}^i T_f^i + \Lambda_{\Gamma_j}^i \dot{T}_f^i + \Pi_{\Gamma_j}^{ik} \nabla_k T_f^i) f_z^j, \\ \nu_z^i &= \nu_z^{0i} + K_{\nu}^i T_{\omega}^i + \Lambda_{\nu}^i \dot{T}_{\omega}^i + \Pi_{\nu}^{ij} \nabla_j T_{\omega}^i + \\ &\quad + (\Theta_j^i + K_{\Theta_j}^i T_{\omega}^i + \Lambda_{\Theta_j}^i \dot{T}_{\omega}^i + \Pi_{\Theta_j}^{ik} \nabla_k T_{\omega}^i) \omega_z^j,\end{aligned}\tag{1}$$

здесь  $i, j, k = 1, 2, 3$ ;  $f_z = [f_z^1, f_z^2, f_z^3]^T$  — вектор истинной удельной силы, действующей на приведенную чувствительную массу ньютометров (измерительный центр БИНС), записанный в проекциях на оси приборной системы координат  $Mz$ ;  $\omega_z = [\omega_z^1, \omega_z^2, \omega_z^3]^T$  — вектор истинной абсолютной угловой скорости приборного трехгранника  $Mz$ ;  $\Delta f_z, \nu_z$  — систематические составляющие погрешностей измерений ньютометров и ДУС;  $\Delta f_z^0, \nu_z^0$  — векторы смещений нулевых сигналов ньютометров и ДУС;

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \Gamma_1^1 & 0 & 0 \\ \Gamma_2^1 & \Gamma_2^2 & 0 \\ \Gamma_3^1 & \Gamma_3^2 & \Gamma_3^3 \end{bmatrix}, \quad \Theta = \begin{bmatrix} \Theta_1^1 & \Theta_1^2 & \Theta_1^3 \\ \Theta_2^1 & \Theta_2^2 & \Theta_2^3 \\ \Theta_3^1 & \Theta_3^2 & \Theta_3^3 \end{bmatrix}$$

— матрицы погрешностей масштабных коэффициентов ( $\Gamma_i^i, \Theta_i^i, i = 1, 2, 3$ ) и малых углов перекосов ( $\Gamma_i^j, \Theta_i^j, i, j = 1, 2, 3, i \neq j$ ) осей чувствительности ньютометров и ДУС (вид матрицы  $\Gamma$  обусловлен выбором приборной системы координат);  $T_f, T_{\omega}$  — температуры ньютометров и ДУС;  $K_{\Delta f}^i, K_{\nu}^i$  — коэффициенты зависимости

<sup>1</sup>предполагается суммирование по повторяющимся индексам снизу и сверху — обозначение Эйнштейна

от температуры смещений нулевых сигналов ньютонометров и ДУС;  $K_{\Gamma_j}^i$ ,  $K_{\Theta_j}^i$  — коэффициенты зависимости от температуры масштабных коэффициентов и малых углов перекосов осей чувствительности ньютонометров и ДУС;  $\Lambda_{\Delta f}^i$ ,  $\Lambda_{\nu}^i$  — коэффициенты зависимости от производной температуры по времени нулевых сигналов ньютонометров и ДУС;  $\Lambda_{\Gamma_j}^i$ ,  $\Lambda_{\Theta_j}^i$  — коэффициенты зависимости от производной температуры по времени масштабных коэффициентов и малых углов перекосов ньютонометров и ДУС;  $\Pi_{\Delta f}^{ij}$ ,  $\Pi_{\nu}^{ij}$  — коэффициенты зависимости от пространственного градиента температуры нулевых сигналов ньютонометров и ДУС;  $\Pi_{\Gamma_j}^{ik}$ ,  $\Pi_{\Theta_j}^{ik}$  — коэффициенты зависимости от пространственного градиента температуры масштабных коэффициентов и малых углов перекосов осей чувствительности ньютонометров и ДУС.

В основе предлагаемого метода калибровки лежат кинематические уравнения ошибок БИНС в осях опорной системы координат  $Mx$ :

$$\dot{\beta}_x = \hat{u}_x \beta_x + L_z^T (\nu_z + \nu_z^s),$$

здесь  $\beta_x$  — вектор кинематической ошибки ориентации,  $u_x$  — вектор угловой скорости Земли,  $L_z$  — матрица ориентации приборной системы координат относительно опорной,  $\nu_z^s$  — случайная (немоделируемая) ошибка измерений ДУС с нулевым средним и известным СКО, оператор  $\hat{\cdot}$  ставит в соответствие вектору кососимметрическую матрицу

$$\hat{\beta} = \begin{bmatrix} 0 & \beta_3 & -\beta_2 \\ -\beta_3 & 0 & \beta_1 \\ \beta_2 & -\beta_1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Строится вектор измерений  $w^{acc}$  как разность эталонного и вычисленного по показаниям инерциальных датчиков векторов удельной силы тяжести (приближенное равенство предполагает линеаризацию):

$$w^{acc} = L_z'^T (f_z + \Delta f_z + \Delta f_z^s) - [0, 0, g_0]^T \approx \hat{\beta}_x [0, 0, g_0]^T + L_z'^T (\Delta f_z + \Delta f_z^s), \quad (2)$$

где  $L_z'^T$  — модельная матрица ориентации (вычисленная при интегрировании кинематических уравнений Пуассона),  $\Delta f_z^s$  — случайная (немоделируемая) ошибка измерений ньютонометров с нулевым средним и известным среднеквадратичным отклонением (СКО). Далее вводится вектор состояния, включающий в себя компоненты вектора кинематической ошибки ориентации, параметры введенной априорной модели погрешностей измерений инерциальных датчиков, а также дополнительные неизвестные величины, при необходимости.

Таким образом, имеется линейная динамическая система с измерениями вида:

$$\begin{aligned} \dot{y} &= Ay + q, & \mathbb{M}[qq^T] &= Q, \\ w &= Hy + r, & \mathbb{M}[rr^T] &= R, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $y$  — вектор состояния, содержащий следующие компоненты:

$$[\beta_x^i, \nu_z^{0i}, \Delta f_z^{0i}, \Gamma_j^i, \Theta_j^i, K_{\Delta f}^i, K_{\Gamma_j}^i, K_{\nu}^i, K_{\Theta_j}^i, \Lambda_{\Delta f}^i, \Lambda_{\nu}^i, \Lambda_{\Gamma_j}^i, \Lambda_{\Theta_j}^i, \Pi_{\Delta f}^{ij}, \Pi_{\nu}^{ij}, \Pi_{\Gamma_j}^{ik}, \Pi_{\Theta_j}^{ikT}], \quad (4)$$

а  $q, r$  — случайные процессы типа белого шума. При выполнении соответствующих априорных гипотез о шумах в динамической системе и измерениях, задача калибровки сводится к задаче оптимального оценивания вектора состояния (4) линейной динамической системы (3) по вектору измерений (2), линейно связанному с вектором состояния. Для решения такой задачи используется численно устойчивая реализация фильтра Калмана методом квадратного корня из ковариационной матрицы.

Для *аналитического исследования наблюдаемости* вектора состояния (4) использовался метод разложения измерений по базисным функциям. Сделаем следующие предположения:

1. калибровочный эксперимент состоит из трех циклов вращения, на каждом из них ось вращения лежит в плоскости горизонта;
2. угловая скорость вращения платформы стенда на каждом из циклов является кусочно-постоянной:

$$\Omega_{tt}^k(t) = \begin{cases} \Omega, & t_{k-1} \leq t < \frac{t_k - t_{k-1}}{2}; \\ -\Omega, & \frac{t_k - t_{k-1}}{2} \leq t \leq t_k, \end{cases} \quad \Omega = \text{const} \neq 0 \neq u,$$

где  $t_0$  — начальный момент времени,  $t_k$  — конец  $k$ -го цикла вращений,  $k = 1, 2, 3$ ;

3.  $T_\omega^i = T_f^i = T(t)$ ,  $\dot{T}_\omega^i = \dot{T}_f^i = \dot{T}(t)$ ,  $\nabla_j T_\omega^i = \nabla_j T_f^i = \nabla_j T(t)$ ,  $i, j = 1, 2, 3$  и имеется возможность управления этими функциями при помощи термокамеры;
4. функции  $T(t)$ ,  $\dot{T}(t)$ ,  $\nabla_1 T(t)$ ,  $\nabla_2 T(t)$ ,  $\nabla_3 T(t)$  являются многочленами.
5. калибровка проводится на экваторе;

Тогда справедлива теорема.

При выполнении условий 1–4 для наблюдаемости в системе (3) на отрезке  $t \in [t_0, t_3]$  необходимо и достаточно линейной независимости системы функций  $1, T(t), \dot{T}(t), \nabla_1 T(t), \nabla_2 T(t), \nabla_3 T(t)$  при  $t \in [t_0, t_3]$ .

Для подтверждения выводов аналитического исследования было проведено полунатурное *численное моделирование* в соответствии с методикой:

- моделируются показания инерциальных датчиков (рис. 1, левый верхний график) в калибровочном эксперименте с системой навигационного класса точности на двухосном поворотном стенде с термокамерой;
- в качестве показаний датчиков температуры используются измерения реальных термодатчиков в системе БИНС-РТ во время статического эксперимента в термокамере на температурном переходе (рис. 1, правый верхний график);
- продолжительность эксперимента – 7 часов, эксперимент состоит из коротких вращений (3 мин.) вокруг каждой из приборных осей.

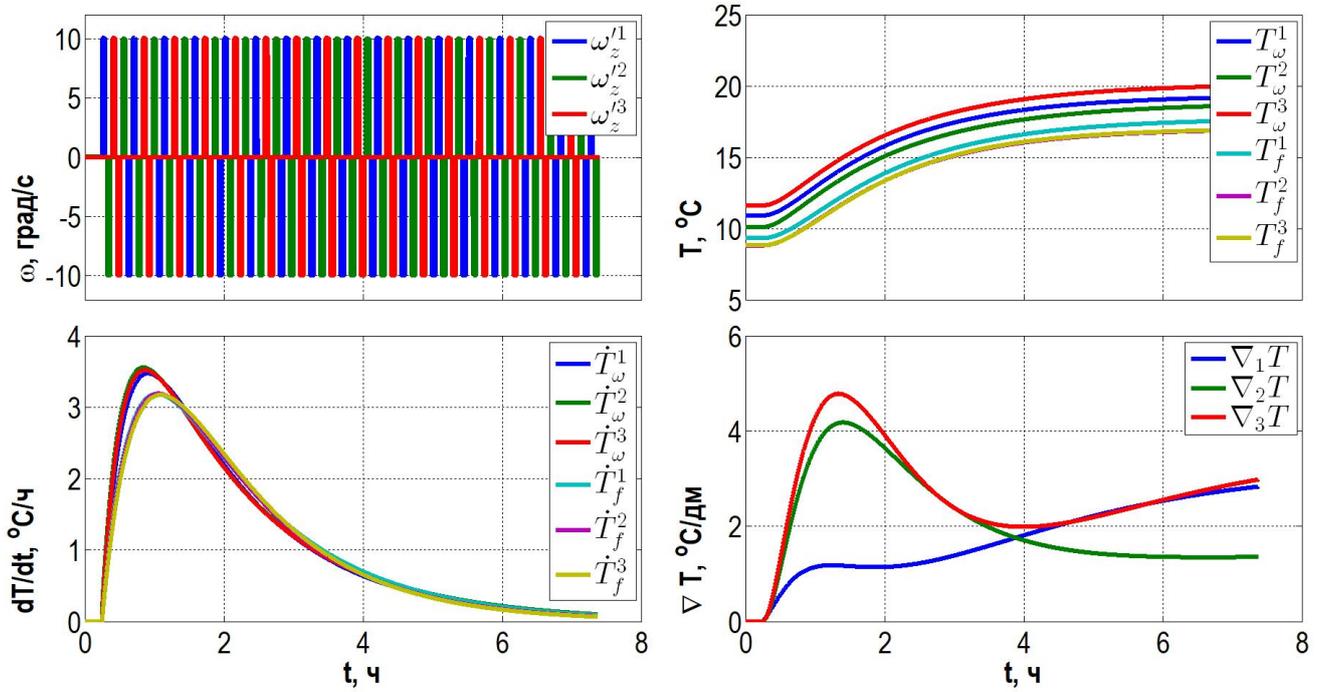


Рис. 1: профиль изменения угловой скорости и функции изменения температуры

По результатам обработки модельных данных проводился ковариационный анализ. Начальные и конечные оценки СКО для параметров модели (1) приведены в таблицах 1 – 2. Из приведенных таблиц следует, что оценки компонент вектора состояния уточняются (в 2.5 раза для смещений нулевых сигналов ДУС и в 100 раз для смещений нулевых сигналов ньютометров, для большинства остальных параметров более чем на порядок) по сравнению с априорными в модели (1), что подтверждает выводы аналитического исследования.

парам.	$\Delta f_z^{01}$	$\Delta f_z^{02}$	$\Delta f_z^{03}$	$\Gamma_1^1$	$\Gamma_2^2$	$\Gamma_3^3$	$\Gamma_2^1$	$\Gamma_3^1$	$\Gamma_3^2$
разм.	мм/сек <sup>2</sup>			ppm			угл.сек.		
$\sigma_o$	5.000	5.000	5.000	500	500	500	100.00	100.00	100.00
$\sigma_k$	0.107	0.078	0.069	16	12	9	9.43	5.67	3.51
парам.	$K_{\Delta f}^1$	$K_{\Delta f}^2$	$K_{\Delta f}^3$	$K_{\Gamma_1}^1$	$K_{\Gamma_2}^2$	$K_{\Gamma_3}^3$	$K_{\Gamma_2}^1$	$K_{\Gamma_3}^1$	$K_{\Gamma_3}^2$
разм.	мм/сек <sup>2</sup> /°C			ppm/°C			угл.сек./°C		
$\sigma_o$	5.000	5.000	5.000	500.0	500.0	500.0	120.00	120.00	120.00
$\sigma_k$	0.009	0.007	0.006	1.3	1.0	0.9	0.80	0.51	0.33
парам.	$\Lambda_{\Delta f}^1$	$\Lambda_{\Delta f}^2$	$\Lambda_{\Delta f}^3$	$\Lambda_{\Gamma_1}^1$	$\Lambda_{\Gamma_2}^2$	$\Lambda_{\Gamma_3}^3$	$\Lambda_{\Gamma_2}^1$	$\Lambda_{\Gamma_3}^1$	$\Lambda_{\Gamma_3}^2$
разм.	мм/сек <sup>2</sup> /(°C/ч)			ppm/(°C/ч)			угл.сек./(°C/ч)		
$\sigma_o$	5.000	5.000	5.000	500.0	500.0	500.0	120.00	120.00	120.00
$\sigma_k$	0.037	0.029	0.029	5.5	4.2	4.1	3.32	2.31	1.58
парам.	$\Pi_{\Delta f}^{21}$	$\Pi_{\Delta f}^{22}$	$\Pi_{\Delta f}^{23}$	$\Pi_{\Gamma_1}^{21}$	$\Pi_{\Gamma_2}^{22}$	$\Pi_{\Gamma_3}^{23}$	$\Pi_{\Gamma_2}^{21}$	$\Pi_{\Gamma_3}^{21}$	$\Pi_{\Gamma_3}^{22}$
разм.	мм/сек <sup>2</sup> /(°C/дм)			ppm/(°C/дм)			угл.сек./(°C/дм)		
$\sigma_o$	5.000	5.000	5.000	500.0	500.0	500.0	120.00	120.00	120.00
$\sigma_k$	0.025	0.021	0.023	3.8	3.1	3.2	2.23	1.74	1.31
парам.	$\Pi_{\Delta f}^{31}$	$\Pi_{\Delta f}^{32}$	$\Pi_{\Delta f}^{33}$	$\Pi_{\Gamma_1}^{31}$	$\Pi_{\Gamma_2}^{32}$	$\Pi_{\Gamma_3}^{33}$	$\Pi_{\Gamma_2}^{31}$	$\Pi_{\Gamma_3}^{31}$	$\Pi_{\Gamma_3}^{32}$
разм.	мм/сек <sup>2</sup> /(°C/дм)			ppm/(°C/дм)			угл.сек./(°C/дм)		
$\sigma_o$	5.000	5.000	5.000	500.0	500.0	500.0	120.00	120.00	120.00
$\sigma_k$	0.010	0.009	0.009	1.4	1.3	1.3	0.64	0.59	0.57

Таблица 1: начальные и конечные оценки СКО оценок параметров модели погрешностей измерений.

парам.	$\nu_z^{01}$	$\nu_z^{02}$	$\nu_z^{03}$	$\Theta_1^1$	$\Theta_2^2$	$\Theta_3^3$	$\Theta_1^2$	$\Theta_1^3$	$\Theta_2^1$	$\Theta_2^3$	$\Theta_3^1$	$\Theta_3^2$
разм.	град/ч			ppm			угл.сек.					
$\sigma_o$	0.050	0.050	0.050	500.0	500.0	500.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
$\sigma_k$	0.023	0.017	0.017	1.1	1.3	2.0	9.0	6.7	2.7	7.6	2.1	3.0
парам.	$K_\nu^1$	$K_\nu^2$	$K_\nu^3$	$K_{\Theta_1}^1$	$K_{\Theta_2}^2$	$K_{\Theta_3}^3$	$K_{\Theta_1}^2$	$K_{\Theta_1}^3$	$K_{\Theta_2}^1$	$K_{\Theta_2}^3$	$K_{\Theta_3}^1$	$K_{\Theta_3}^2$
разм.	град/ч/°C			ppm/°C			угл.сек./°C					
$\sigma_o$	0.0500	0.0500	0.0500	500.00	500.00	500.00	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00
$\sigma_k$	0.0016	0.0010	0.0012	0.08	0.09	0.14	0.69	0.52	0.19	0.54	0.16	0.22
парам.	$\Lambda_\nu^1$	$\Lambda_\nu^2$	$\Lambda_\nu^3$	$\Lambda_{\Theta_1}^1$	$\Lambda_{\Theta_2}^2$	$\Lambda_{\Theta_3}^3$	$\Lambda_{\Theta_1}^2$	$\Lambda_{\Theta_1}^3$	$\Lambda_{\Theta_2}^1$	$\Lambda_{\Theta_2}^3$	$\Lambda_{\Theta_3}^1$	$\Lambda_{\Theta_3}^2$
разм.	град/ч/(°C/ч)			ppm/(°C/ч)			угл.сек./(°C/ч)					
$\sigma_o$	0.0500	0.0500	0.0500	500.00	500.00	500.00	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00
$\sigma_k$	0.0044	0.0026	0.0032	0.26	0.27	0.43	2.19	1.68	0.61	1.62	0.54	0.70
парам.	$\Pi_\nu^{21}$	$\Pi_\nu^{22}$	$\Pi_\nu^{23}$	$\Pi_{\Theta_1}^{21}$	$\Pi_{\Theta_2}^{22}$	$\Pi_{\Theta_3}^{23}$	$\Pi_{\Theta_1}^{22}$	$\Pi_{\Theta_1}^{23}$	$\Pi_{\Theta_2}^{21}$	$\Pi_{\Theta_2}^{23}$	$\Pi_{\Theta_3}^{21}$	$\Pi_{\Theta_3}^{22}$
разм.	град/ч/(°C/дм)			ppm/(°C/дм)			угл.сек./(°C/дм)					
$\sigma_o$	0.0500	0.0500	0.0500	500.00	500.00	500.00	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00
$\sigma_k$	0.0019	0.0009	0.0015	0.18	0.16	0.22	1.23	1.05	0.48	0.99	0.42	0.46
парам.	$\Pi_\nu^{31}$	$\Pi_\nu^{32}$	$\Pi_\nu^{33}$	$\Pi_{\Theta_1}^{31}$	$\Pi_{\Theta_2}^{32}$	$\Pi_{\Theta_3}^{33}$	$\Pi_{\Theta_1}^{32}$	$\Pi_{\Theta_1}^{33}$	$\Pi_{\Theta_2}^{31}$	$\Pi_{\Theta_2}^{33}$	$\Pi_{\Theta_3}^{31}$	$\Pi_{\Theta_3}^{32}$
разм.	град/ч/(°C/дм)			ppm/(°C/дм)			угл.сек./(°C/дм)					
$\sigma_o$	0.0500	0.0500	0.0500	500.00	500.00	500.00	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00
$\sigma_k$	0.0007	0.0003	0.0007	0.12	0.11	0.13	0.65	0.63	0.38	0.71	0.33	0.32

Таблица 2: начальные и конечные оценки СКО оценок параметров погрешностей измерений.

Во **второй** главе рассматривается задача оценивания производной температуры по времени внутри БИНС по измерениям датчика температуры в случае, когда стандартное численное дифференцирование неприменимо, поскольку шаг дис-

кретизации показаний термодатчиков на порядки больше характерного изменения температуры за такт съема. Как следствие, ошибка измерений принципиально отличается от модели белого шума. Предлагается и обосновывается алгоритм оценивания, являющийся модификацией фильтра Калмана. Формирующее уравнение для фильтра получено на основе качественного анализа решения начально-краевой задачи для уравнения теплопроводности. Приводятся результаты оценки производной температуры в реальном времени для БИНС-РТ в серии экспериментов.

Рассматривается начально-краевая задача для нормализованного уравнения теплопроводности в сферических координатах  $(r, \varphi, \psi)$ :

$$\begin{cases} \frac{\partial \tau}{\partial t} = \frac{\partial^2 \tau}{\partial r^2} + \delta, & 0 \leq r < 1, \quad t > 0; \\ \tau(r, 0) = \tau_0(r), & 0 \leq r < 1; \\ \frac{\partial \tau}{\partial r}(1, t) = -q, & \delta, q = const, \end{cases} \quad (5)$$

где искомая функция  $\tau = \tau(r, \varphi, \psi, t)$  задает нормализованную температуру в точке с координатами  $(r, \varphi, \psi)$  в момент времени  $t$ ;  $\tau_0(r)$ —начальная температура;  $\delta(r, \varphi, \psi)$  задает точечный источник тепла в центре области;  $q$  — описывает постоянную теплоотдачу через границу области. Решением задачи (5) являются функции вида:

$$\begin{aligned} \tau(r, t) = -\frac{q}{2}r^2 - 3qt + \left( 3 \int_0^1 \rho^2 f(\rho) d\rho + \delta t \right) + \\ + \frac{2}{r} \sum_{n=1}^{+\infty} \left( \int_0^1 \rho f(\rho) \sin \pi n \rho d\rho \right) \sin(\pi n r) e^{-(\pi n)^2 t}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $f(r) = \tau_0(r) + \frac{q}{2}r^2$ . В (6) слагаемые с бóльшим номером соответствуют более быстрым вариациям температуры, которыми на практике можно пренебречь. Это позволяет использовать только несколько слагаемых из выражения (6):

$$\tau(t) \approx \tilde{\tau}(t) = \alpha + \beta \frac{t - t_0}{T_0} + \gamma e^{-(t-t_0)/T_0},$$

где  $t_0$  соответствует началу окна, в котором выполняется аппроксимация. Параметры  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $t_0$ , и  $T_0$  приближенно считаются локально постоянными, но могут изменяться на протяжении всего интервала обработки. Далее ставится линейная задача оценивания параметров  $[\alpha, \beta, \gamma]^T$ , при этом ширина окна выбирается такой, чтобы обеспечить хорошую обусловленность оценок параметров. Измерения в задаче оценивания формируются в момент изменения показаний термодатчиков следующим образом:

$$\tau'(t - \Delta t) \neq \tau'(t) \quad \implies \quad \tilde{\tau}'(t) = \frac{\tau'(t - \Delta t) + \tau'(t)}{2},$$

где  $\tau'$  — исходный показания термодатчиков;  $\Delta t$  — шаг по времени датчика температуры.

Алгоритм оценки температуры и производной температуры в реальном времени опробован при обработке более 100 записей датчиков температуры БИНС-РТ в различных калибровочных экспериментах при изменяющейся температуре внутри термокамеры. Большинство экспериментов представляют собой температурные переходы с подвижной системой из одной температурной точки в другую продолжительностью около часа. Результаты обработки серии экспериментов приведены в таблице 3.

Метрика	Значение
Среднее (по точкам) отклонение от эталонной оценки, °С/ч.	0.02
Среднее абсолютное отклонение, °С/ч.	0.9
Стандартное отклонение ошибки оценки, °С/ч.	1.3
Средняя оценка запаздывания, мин	1.9

Таблица 3: результаты обработки серии экспериментов при изменяющейся температуре.

В **третьей** главе представлены примеры температурной калибровки для системы навигационного класса точности БИНС-РТ и микромеханической курсовертикали БЧЭММ-1. Приводятся оценки температурных коэффициентов и соответствующих СКО, выполнена компенсация погрешностей и сравнение точности БИНС в режиме автономной навигации до и после калибровки.

*Система навигационного класса точности (БИНС-РТ).* В качестве модели погрешностей измерений инерциальных датчиков у производителя принята модель (1), в предположении отсутствия некоторых температурных зависимостей:

$$\begin{aligned}\Delta f_z^i &= \Delta f_z^{0i} + K_{\Delta f}^i T_f^i + \Gamma_j^i f_z^j + K_{\Gamma_i}^i T_f^i f_z^j, \\ \nu_z^i &= \nu_z^{0i} + K_{\nu}^i T_w^i + \Theta_j^i \omega_z^j + K_{\omega_i}^i T_w^i \omega_z^i, \quad i, j = 1, 2, 3.\end{aligned}\quad (7)$$

Калибровка БИНС-РТ проходила с использованием точного двухосного калибровочного стенда, для угловых измерений которого рассмотрена модель, включающая углы поворота стенда вокруг внутренней и внешней осей и случайные составляющие измерений. Эти измерения позволяют построить дополнительный вектор измерений  $w^{tt}$  в задаче оценивания:

$$w^{tt} = \begin{bmatrix} (L_z^T L_p')_{23} \\ (L_z^T L_p')_{31} \\ (L_z^T L_p')_{12} \end{bmatrix} \approx \delta_x \approx \beta_x + L_z^T (\kappa_p - \xi_p), \quad (8)$$

где матрица  $L_p'$  описывает ориентацию планшайбы стенда относительно опорной системы координат  $Mx$ ; вектор малого поворота  $\delta$  задает переход от модельной системы координат к модельной стендовой, вектор малого поворота  $\kappa$  описывает его

измеренное значение. Случайная составляющая в векторе измерений  $w_{tt}$  считается несмещенным случайным процессом типа белого шума. Таким образом, вектор состояния (4) принимает вид:

$$y = [\beta_x^i, \nu_z^{0i}, \Delta f_z^{0i}, \Gamma_j^i, \Theta_i^j, K_{\Delta f}^i, K_{\Gamma}^i, K_{\nu}^i, K_{\Theta}^i, S^i, \kappa_z^i]^T \in \mathbb{R}^{42}. \quad (9)$$

На рис. 2 приведены графики круговой позиционной ошибки навигационного решения. Видно, что при полной температурной компенсации круговая ошибка заметно меньше и соответствует заявленному классу системы.

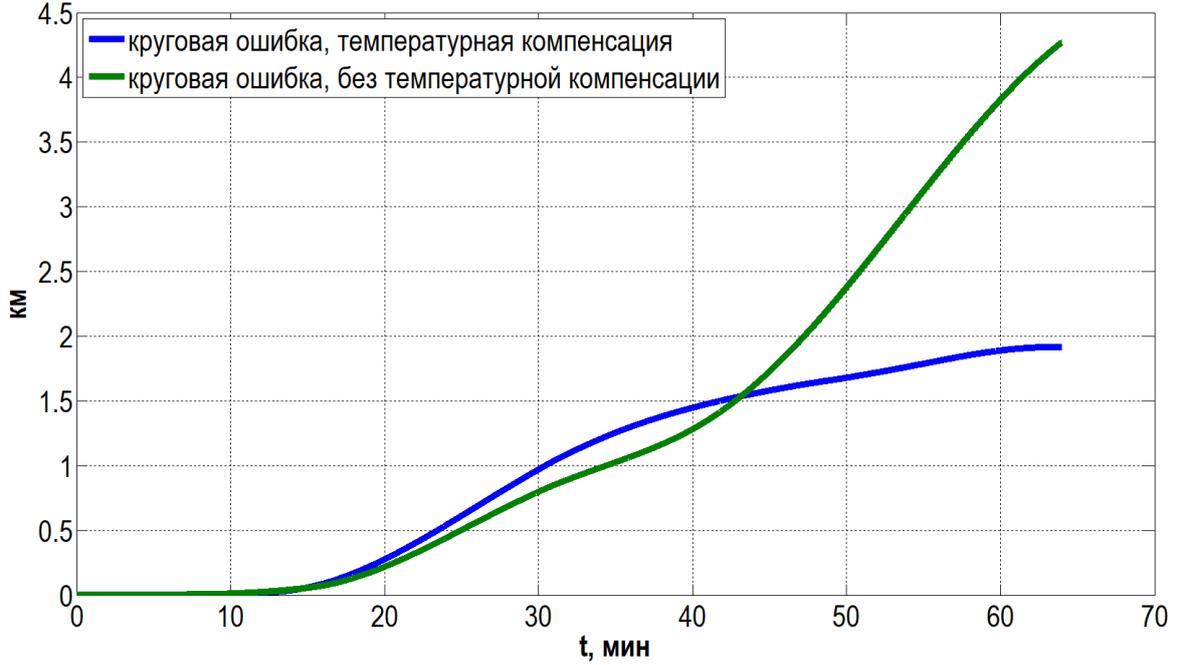


Рис. 2: сравнение круговой позиционной ошибки при полной температурной компенсации и без нее

*Микромеханическая курсовертикаль (БЧЭММ-1)*. В качестве модели погрешностей измерений использовалась модифицированная модель (1), учитывающая коэффициенты зависимости от температуры  $K_{\nu}$ ,  $K_{\Delta f}$ ,  $K_{\Gamma}$ ,  $K_{\Theta}$ , а также коэффициенты динамических дрейфов ДУС, формирующие матрицу  $D$ :

$$\begin{aligned} \Delta f_z^i &= \Delta f_z^{0i} + K_{\Delta f}^i T_f^i + \Gamma_j^i f_z^j + K_{\Gamma}^i T_f^i f_z^j, \\ \nu_z^i &= \nu_z^{0i} + K_{\nu}^i T_{\omega}^i + \Theta_j^i \omega_z^j + K_{\omega}^i T_{\omega}^i \omega_z^i + D_j^i \frac{f_z^j}{g}, \quad i, j = 1, 2, 3, \\ D &= \begin{bmatrix} D_1^1 & D_1^2 & D_1^3 \\ D_2^1 & D_2^2 & D_2^3 \\ D_3^1 & D_3^2 & D_3^3 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Для удержания кинематических ошибок БИНС в линейной зоне, в уравнение Пуассона вводятся обратные связи, а вектор состояния дополняется малыми углами отклонения  $\varkappa$  приборной системы координат  $Mz$  от оси вращения. Корректирующе-

щие измерения об орте оси вращения имеют вид:

$$w_z^{ort} = \begin{bmatrix} \cos \psi_0 \\ \sin \psi_0 \\ 0 \end{bmatrix} \approx \widehat{\beta}_x \begin{bmatrix} \cos \psi_0 \\ \sin \psi_0 \\ 0 \end{bmatrix} + L'_z \begin{bmatrix} 0 \\ -\varkappa_z^3 \\ \varkappa_z^2 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где  $\psi_0$  — азимут оси вращения стенда. Таким образом, вектор состояния (4) дополняется компонентами матрицы динамических дрейфов ДУС и малыми углами  $\varkappa$ :

$$y = [\beta_x^i, \nu_z^{0i}, \Delta f_z^{0i}, \Gamma_j^i, \Theta_i^j, K_{\Delta f}^i, K_{\Gamma}^i, K_{\nu}^i, K_{\Theta}^i, D_j^i, \varkappa_z^i]^T \in \mathbb{R}^{47}. \quad (11)$$

На рис. 3 представлены осредненные в окне шириной 1 сек показания ДУС и ньютонометров на интервале неподвижности одного из циклов вращений. На графиках выделены линии тренда, отображающие зависимость измерений датчиков от температуры. При помощи метода наименьших квадратов были определены коэффициенты температурных зависимостей для одного из ДУС и одного ньютонометра до и после компенсации всех систематических погрешностей, коэффициенты приведены в таблице 4. Из таблицы видно, что после компенсации погрешностей соответствующие коэффициенты уменьшаются на порядок.

параметр	I цикл		II цикл		III цикл	
	до	после	до	после	до	после
$K_{\nu}^2, [\text{град/сек}]/^{\circ}C$	-0.1002	0.0099	-0.0926	0.0176	-0.1130	-0.0025
$\sigma(K_{\nu}^2), [\text{град/сек}]/^{\circ}C$	0.0002					
$K_{\Delta f}^1, [\text{м/сек}^2]/^{\circ}C$	0.0159	0.0011	0.0130	-0.0021	0.0101	-0.0049
$\sigma(K_{\Delta f}^1), [\text{м/сек}^2]/^{\circ}C$	0.000012					

Таблица 4: оценки температурных коэффициентов по МНК на интервалах неподвижности в трех калибровочных циклах до и после компенсации, а также соответствующие оценки СКО

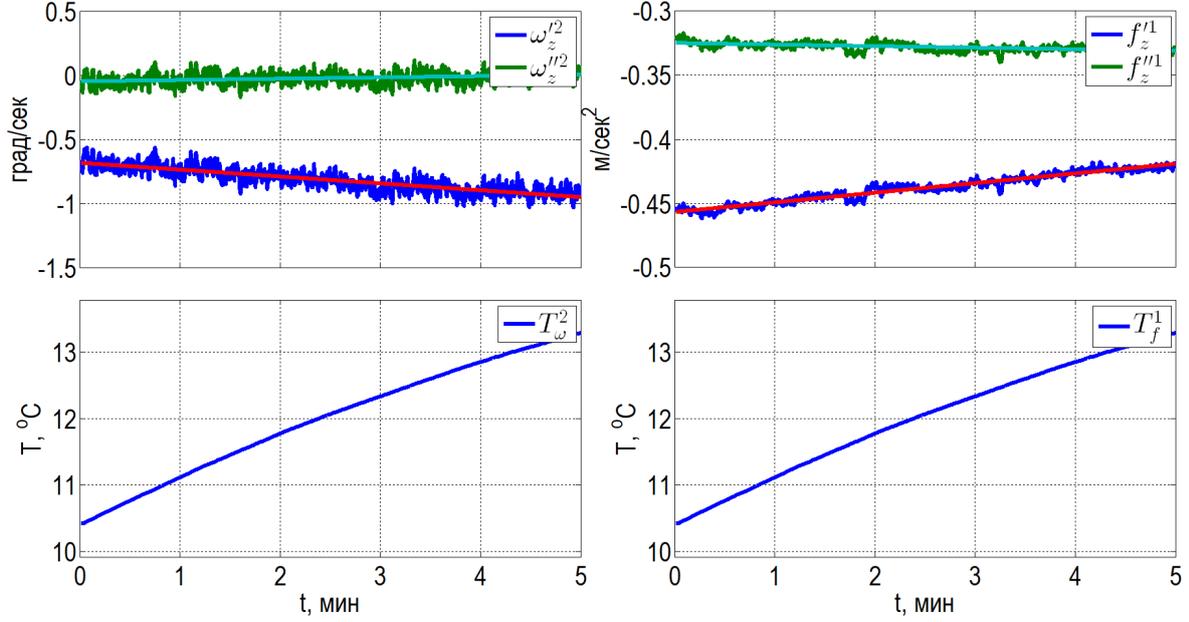


Рис. 3: показания инерциальных датчиков на интервале неподвижности одного из циклов вращений до и после компенсации погрешностей

В **четвертой** главе проанализирована задача температурной калибровки блока ДУС без ньютометров с использованием измерений углов поворота осей двухосного калибровочного стенда.

Приборная система координат  $Mz$  связывается с осями чувствительности ДУС и их модель погрешностей измерений (1) принимает вид:

$$\begin{aligned} \nu_z^i &= \nu_z^{0i} + K_\nu^i T_\omega^i + \Lambda_\nu^i \dot{T}_\omega^i + \Pi_\nu^{ij} \nabla_j T_\omega^i + \\ &+ (\Theta_j^i + K_\Theta^i T_\omega^i + \Lambda_\Theta^i \dot{T}_\omega^i + \Pi_\Theta^{ik} \nabla_k T_\omega^i) \omega_z^j, \\ i, j, k, &= 1, 2, 3, \\ \Theta &= \begin{bmatrix} \Theta_1^1 & 0 & 0 \\ \Theta_2^1 & \Theta_2^2 & 0 \\ \Theta_3^1 & \Theta_3^2 & \Theta_3^3 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (12)$$

По угловым измерениям стенда строится модельная матрица  $L'_p$  ориентации планшайбы стенда относительно опорной системы координат  $Mx$ . Вектор малого поворота  $\delta_p$  задает переход между системами координат, заданными матрицами  $L'_p$  и  $L'_z$ . Поскольку блок ДУС и система управления стенда независимо фиксируют время, в систему вводится систематическое запаздывания  $\tau$  измерений стенда относительно показаний ДУС. Тогда вектор корректирующих измерений (8) принимает вид:

$$w^{tt} = \delta_x = \begin{bmatrix} \Delta L_{23} \\ \Delta L_{31} \\ \Delta L_{12} \end{bmatrix} \approx \beta_x + L_z^{T'} (\kappa_p - (\omega_z - u_z)\tau - \delta\zeta_p), \quad \Delta L = L'_p L_z'^T. \quad (13)$$

Случайная составляющая в векторе измерений  $w^{tt}$  считается несмещенным случайным процессом типа белого шума.

С учетом дополнительных параметров, вектор состояния в задаче оценивания имеет вид:

$$y = [\beta^i, \nu_z^{0i}, \Theta_i^j, K_\nu^i, K_{\Theta_j^i}, \Lambda_\nu^i, \Lambda_{\Theta_j^i}, \Pi_\nu^{ij}, \Pi_{\Theta_j^i}, \kappa_z^i, \tau]^T \in \mathbb{R}^{52}. \quad (14)$$

Далее задача калибровки сводится к задаче оценивания вектора состояния линейной динамической системы по набору измерений.

*Численное моделирование.* Для исследования оцениваемости вектора (14) проведено полунатурное численное моделирование согласно методике из первой главы. Показания ДУС и температурных датчиков аналогичны показаниям на рис.1. Профиль изменения температуры соответствует показаниям термодатчиков во время реального эксперимента с системой при изменяющейся температуре в термокамере. Прототипом моделируемой системы является малогабаритная курсоверткаль на базе твердотельно-волновых гироскопов (МБКВ-ТВГ), производства АО «Пермская Научно-производственная Приборостроительная Компания».

По результатам обработки модельных данных проведен ковариационный анализ. На основе анализа сделан вывод, что конечные оценки компонент вектора состояния уточняются относительно априорных.

В **заключении** к диссертации приводятся основные выводы и результаты работы, а также их значимость.

1. Исследованная ранее другими авторами задача динамической калибровки БИНС на основе уравнений ошибок дополнена моделью температурных зависимостей, включающей в себя: коэффициенты зависимости от температуры, производной температуры по времени и пространственного градиента температуры. Исследована наблюдаемость параметров введенных температурных моделей. Сформулированы необходимые и достаточные условия наблюдаемости температурных коэффициентов. Проведено полунатурное численное моделирование, подтверждающее результаты аналитического исследования.
2. Рассмотрены трудности связанные с калибровкой зависимостей от производной температуры по времени. Предложена и обоснована методика оценки скорости изменения температуры в реальном времени, основанная на качественном исследовании решения начально-краевой задачи для уравнения теплопроводности. Приведены примеры аппроксимации показаний датчиков температуры в постобработке и реальном времени для системы навигационного класса точности.
3. Проанализированы примеры калибровки температурных зависимостей для систем различного класса точности. Проведено сравнение точности БИНС до и после компенсации погрешностей. Представленные результаты подтвердили эффективность предложенной методики калибровки для систем различного класса точности.
4. Рассмотрен частный случай калибровки БИНС, состоящей из трех ДУС. Сформулирована математическая постановка задачи калибровки для блока

ДУС с учетом информации об углах поворота платформы стенда. Исследована наблюдаемость температурных коэффициентов при помощи ковариационного моделирования. Результаты ковариационного анализа подтвердили, что задача такого типа может быть решена при помощи рассматриваемой методики с необходимой точностью.

**Публикации автора по теме диссертации.** По материалам диссертации опубликованы следующие статьи в рецензируемых журналах, индексируемых в международных базах **Web Of Science** и **Scopus**:

1. Тарыгин И.Е. К задаче калибровки инерциальных датчиков при изменяющейся температуре // Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика. — 2019. — № 1. — С. 64–68. = Tarygin I.E. Calibration of inertial sensors in the case of varying temperature // Moscow University Mechanics Bulletin. — 2019. — Vol. 74, № 1. — P. 24–28. <http://dx.doi.org/10.3103/s0027133019010059> (0,4 п.л.; JCI 0.07; SJR 0.174)
2. Тарыгин И.Е. Методика калибровки тепловой модели блока чувствительных элементов, состоящего из трех датчиков угловой скорости // Гироскопия и навигация. — 2019. — Т. 27, № 4. — С. 88–102. = Tarygin I.E. Calibration of the Thermal Model of an Inertial Measurement Unit with Three Angular Rate Sensors // Gyroscopy and Navigation. — 2020. — Vol. 11, № 1. — P. 25–33. <https://doi.org/10.1134/S2075108720010125> (0,9 п.л.; SJR 0.425)
3. Tarygin I.E., Kozlov A.V. Calibration of inertial measurement unit with simultaneous estimation of the temperature time-derivative variations // Mathematics in Engineering, Science and Aerospace (MESA). — 2019. — Vol. 10, № 4. — P. 715–723. (0,6 п.л. / авторский вклад определен; SJR 0.178)
4. Kozlov A.V., Tarygin I.E. Real-time estimation of temperature time derivative in inertial measurement unit by finite-impulse-response exponential regression on updates // Sensors. — 2020. — Vol. 20, № 5. <https://doi.org/10.3390/s20051299> (1 п.л. / авторский вклад определен; JCI 0.89; SJR 0.764)
5. Голован А.А., Матасов А.И., Тарыгин И.Е. Калибровка блока ньютометров с асимметричными моделями показаний чувствительных элементов // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления — 2022. — № 2. — С. 107–119. = Golovan, A.A. Matasov A.I., Tarygin I.E. Calibration of an Accelerometer Unit with Asymmetric Models of Readings of Sensors // Journal of Computer and Systems Sciences International. — 2022. — Vol. 61, № 2. — P. 240–252. <https://doi.org/10.1134/S1064230722020071>. (0,9 п.л. / авторский вклад определен; JCI 0.11; SJR 0.325)

Публикации в трудах конференций, индексируемых в **Scopus**:

6. Голован А.А., Козлов, А.В., Тарыгин И.Е. Калибровка инерциальных измерительных блоков на грубых стендах с оценкой температурных зависимостей

по эксперименту с переменной температурой // XXI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам: сборник материалов. – Государственный научный центр Российской Федерации АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». – 2014. – С. 319–322.

7. Голован А.А., Козлов, А.В., Тарыгин И.Е. Калибровка инерциальных измерительных блоков на грубых одноосных стендах: оценка коэффициентов зависимости от производной температуры // XXIII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам: сборник материалов. – Государственный научный центр Российской Федерации АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». – 2016. – С. 56–61.
8. Голован А.А., Козлов, А.В., Тарыгин И.Е., Шаймарданов И.Х., Дзуев А.А. Калибровка инерциальных измерительных блоков с оценкой температурных зависимостей по эксперименту с переменной температурой: результаты калибровки БИНС-РТ // XXIV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам: сборник материалов. – Государственный научный центр Российской Федерации АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». – 2017. – С. 225–228.
9. Golovan A.A., Kozlov A.V., Tarygin I.E. Calibration of a 3-axis hemispherical resonator gyro assembly // Proceeding of 8th International Conference on Recent Advances in Space Technologies. – IEEE Istanbul, Turkey, 2017. – P. 36–39.
10. Kozlov A.V., Tarygin I.E. Extensive validation of a real-time time derivative filter for quantized temperature measurements // 2020 IEEE SENSORS Proceedings. – Piscataway, NJ, United States. – 2020. – P. 1-5. <https://doi.org/10.1109/sensors47125.2020.9278525>

Прочие публикации:

11. Тарыгин И.Е., Козлов А.В. Анализ наблюдаемости в задаче калибровки температурных моделей погрешностей инерциальных датчиков авиационной навигационной системы // Труды МАИ. – 2016. – № 89. <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-nablyudaemosti-v-zadache-kalibrovki-temperaturnyh-modeley-pogreshnostey-inertsialnyh-datchikov-aviatsionnoy-navigatsionnoy>.
12. Козлов А.В., Парусников Н.А., Вавилова Н.Б., Тарыгин И.Е., Голован А.А. Динамическая стендовая калибровка бескарданных инерциальных навигационных систем в сборе // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – Т. 195, № 1. – С. 241–257.