

## СИНТЕЗ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИТЕРАЦИОННОЙ ПРОЦЕДУРЫ КАЛИБРОВКИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЙ СНИЖЕНИЕ ТРУДОЕМКОСТИ ПРОЦЕССА КАЛИБРОВКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ БИНС\*

И.Х. Шаймарданов, А.А. Дзуев, А.В. Некрасов, Д.А. Рекунов

АО «Инерциальные Технологии «Технокомплекс», Раменское-8, Россия, e-mail: [itt@inertech.ru](mailto:itt@inertech.ru)

А.В. Козлов<sup>5</sup>

МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия, e-mail: [a.kozlov@navlab.ru](mailto:a.kozlov@navlab.ru)

### Аннотация

**Ключевые слова:** акселерометры, гироскопы, бесплатформенная инерциальная навигационная система, БИНС, калибровка, итерационная процедура калибровки

*В работе рассмотрены вопросы, связанные с калибровкой чувствительных элементов бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС). Синтезирована итерационная процедура калибровки, обеспечивающая существенное снижение требований, предъявляемых к точности выдерживания температуры в ходе осуществления калибровки; существенное снижение трудозатрат на осуществление калибровки чувствительных элементов БИНС. Приведены результаты экспериментальных исследований, подтверждающих эффективность разработанной итерационной процедуры калибровки.*

### Введение

Зависимость инструментальных погрешностей чувствительных элементов (ЧЭ) от температуры окружающей среды обуславливает необходимость осуществления калибровки в некотором диапазоне температур. На практике распространение получил способ построения температурной модели инструментальных погрешностей ЧЭ, подразумевающий проведение испытаний (осуществление процедуры калибровки) при различных фиксированных значениях температуры окружающей среды, обеспечиваемой температурной камерой испытательного стенда [1]. Оценки инструментальных погрешностей ЧЭ, полученные при различных значениях температуры окружающей среды, используются для построения температурной модели. Для этой цели оценки инструментальных погрешностей ЧЭ аппроксимируются с учетом измерений температурных датчиков. Такой подход предъявляет дополнительные требования к обеспечению термостатированного состояния (достижение теплового равновесия между заданной температурой окружающей среды и температурой собственного нагрева испытуемой системы) в ходе проведения калибровки. Это обусловлено допущениями о постоянстве температуры во время проведения испытаний и о постоянстве параметров модели инструментальных погрешностей. Следовательно, осуществление калибровки в условиях изменения температуры будет сопряжено с методическими ошибками [2]. В этом случае требования, предъ-

являемые к обеспечению термостатированного состояния во время проведения испытаний, будут определяться целевой точностью испытуемых приборов и степенью зависимости их инструментальных погрешностей от температуры. В связи с этим возрастает роль способов калибровки, позволяющих снизить требования, предъявляемые к точности выдерживания температуры окружающей среды, без существенной потери точности оценок инструментальных погрешностей ЧЭ.

В АО «Инерциальные технологии «Технокомплекс» для снижения величины методических ошибок обусловленных изменением температуры окружающей в ходе проведения калибровки используются 2 подхода.

Первый подход базируется на учете в составе математической модели инструментальных погрешностей ЧЭ дополнительных параметров, характеризующих линейную температурную зависимость искомых параметров модели. Такой подход обеспечивает: возможность определения температурной зависимости параметров модели инструментальных погрешностей ЧЭ; возможность осуществления процедуры калибровки в условиях непрерывного изменения температуры окружающей среды в широком диапазоне температур; двукратное сокращение трудозатрат на осуществление процедуры калибровки [3].

В основе второго подхода лежит итерационная процедура уточнения температурной моде-

ли инструментальных погрешностей ЧЭ БИНС. Этому подходу и посвящена данная работа.

### Синтез итерационной процедуры калибровки чувствительных элементов

Модель инструментальных погрешностей акселерометров и гироскопов имеет следующий вид [4]:

$$\begin{aligned} \Delta \bar{a}_{\Pi} &= \bar{a}_{\Pi}^0 + \Gamma \bar{a}_{\Pi}, \\ \Delta \bar{a}_{\Pi} &= \begin{pmatrix} \Delta a_{\Pi_1} \\ \Delta a_{\Pi_2} \\ \Delta a_{\Pi_3} \end{pmatrix}, \quad \bar{a}_{\Pi} = \begin{pmatrix} a_{\Pi_1} \\ a_{\Pi_2} \\ a_{\Pi_3} \end{pmatrix}; \\ \bar{a}_{\Pi}^0 &= \begin{pmatrix} a_{\Pi_1}^0 \\ a_{\Pi_2}^0 \\ a_{\Pi_3}^0 \end{pmatrix}, \quad \Gamma = \begin{pmatrix} \Gamma_{11} & 0 & 0 \\ \Gamma_{21} & \Gamma_{22} & 0 \\ \Gamma_{31} & \Gamma_{32} & \Gamma_{33} \end{pmatrix} \\ \Delta \bar{v}_{\Pi} &= \bar{v}_{\Pi}^0 + \Theta \bar{\omega}_{\Pi} + \frac{D \bar{a}_{\Pi}}{g}; \\ \Delta \bar{v}_{\Pi} &= \begin{pmatrix} \Delta v_{\Pi_1} \\ \Delta v_{\Pi_2} \\ \Delta v_{\Pi_3} \end{pmatrix}, \quad \bar{v}_{\Pi}^0 = \begin{pmatrix} v_{\Pi_1}^0 \\ v_{\Pi_2}^0 \\ v_{\Pi_3}^0 \end{pmatrix}, \quad \bar{\omega}_{\Pi} = \begin{pmatrix} \omega_{\Pi_1} \\ \omega_{\Pi_2} \\ \omega_{\Pi_3} \end{pmatrix}; \\ \Theta &= \begin{pmatrix} \theta_{11} & \theta_{12} & \theta_{13} \\ \theta_{21} & \theta_{22} & \theta_{23} \\ \theta_{31} & \theta_{32} & \theta_{33} \end{pmatrix}, \quad D = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \end{pmatrix}. \quad (1) \end{aligned}$$

Здесь  $\Delta a_{\Pi_i}$ , ( $i = 1, 2, 3$ ) – погрешности измерений акселерометров;  $a_{\Pi_i}^0$ , ( $i = 1, 2, 3$ ) – смещения нулей акселерометров;  $a_{\Pi_i}$ , ( $i = 1, 2, 3$ ) – составляющие вектора кажущегося ускорения;  $\Gamma_{ij}$ , ( $i = 1, 2, 3$ ) – погрешности масштабных коэффициентов акселерометров,  $\Gamma_{ij}$  – углы взаимной неортогональности осей чувствительности акселерометров;  $\Delta v_{\Pi_i}$ , ( $i = 1, 2, 3$ ) – погрешности измерений гироскопов;  $v_{\Pi_i}^0$ , ( $i = 1, 2, 3$ ) – систематические составляющие дрейфов гироскопов;  $\omega_{\Pi_i}$ , ( $i = 1, 2, 3$ ) – составляющие абсолютной угловой скорости в осях приборной системы координат;  $\theta_{ij}$  – погрешности масштабных коэффициентов гироскопов;  $\theta_{ij}$  – углы взаимной неортогональности осей чувствительности гироскопов;  $D$  – матрица зависимости систематических составляющих дрейфов гироскопов от величины перегрузки (подлежит учету при калибровке механических гироскопов).

Синтез итерационной процедуры калибровки ЧЭ осуществлялся на основе модели компенсации оценок инструментальных погрешностей:

$$\begin{aligned} \bar{a}_{\Pi} &= (E + \hat{\Gamma})^{-1} (\bar{a}'_{\Pi} - \bar{a}_{\Pi}^0), \\ \bar{\omega}_{\Pi} &= (E + \hat{\Theta})^{-1} \left( \bar{\omega}'_{\Pi} - \bar{v}_{\Pi}^0 - \frac{\hat{D} \bar{a}'_{\Pi}}{g} \right). \quad (3) \end{aligned}$$

Здесь  $\bar{a}_{\Pi}, \bar{\omega}_{\Pi}$  – уточненные измерения ЧЭ;  $\bar{a}'_{\Pi}, \bar{\omega}'_{\Pi}$  – исходные (возмущенные) измерения ЧЭ;  $\bar{a}_{\Pi}^0, \hat{\Gamma}, \bar{v}_{\Pi}^0, \hat{\Theta}, \hat{D}$  – оценки инструментальных погрешностей ЧЭ, которые могут быть определены любым известным способом, обеспечивающим требуемую точность.

В соответствии с моделью компенсации (3) уточненные измерения ЧЭ на текущей итерации процедуры калибровки будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \bar{a}_{\Pi}[k] &= (E + \hat{\Gamma}[k])^{-1} (\bar{a}_{\Pi}[k-1] - \bar{a}_{\Pi}^0[k]), \\ \bar{\omega}_{\Pi}[k] &= (E + \hat{\Theta}[k])^{-1} \left( \bar{\omega}_{\Pi}[k-1] - \bar{v}_{\Pi}^0[k] - \frac{\hat{D}[k] \bar{a}_{\Pi}}{g} \right). \quad (4) \end{aligned}$$

Здесь  $k$  – номер текущей итерации;  $\bar{a}_{\Pi}[k], \bar{\omega}_{\Pi}[k]$  – уточненные измерения ЧЭ на текущей итерации;  $\bar{a}_{\Pi}[k-1], \bar{\omega}_{\Pi}[k-1]$  – уточненные измерения ЧЭ на предыдущей итерации.

В уравнениях (4) уточненные измерения ЧЭ на  $k-1$  итерации будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \bar{a}_{\Pi}[k-1] &= (E + \hat{\Gamma}[k-1])^{-1} (\bar{a}_{\Pi}[k] - \bar{a}_{\Pi}^0[k-1]), \\ \bar{\omega}_{\Pi}[k-1] &= (E + \hat{\Theta}[k-1])^{-1} \left( \bar{\omega}_{\Pi}[k] - \bar{v}_{\Pi}^0[k-1] - \frac{\hat{D}[k-1] \bar{a}_{\Pi}}{g} \right). \quad (5) \end{aligned}$$

Подставив (5) в (4) и соотнеся полученное соотношение с моделью компенсации (3) получим конечные уравнения для итерационной процедуры уточнения оценок инструментальных погрешностей ЧЭ:

$$\begin{aligned} \bar{a}_{\Pi}^0 &= \bar{a}_{\Pi}^0[k-1] + (E + \hat{\Gamma}[k-1])^{-1} \bar{a}_{\Pi}^0[k]; \\ \hat{\Gamma} &= \hat{\Gamma}[k] + \hat{\Gamma}[k-1] + \hat{\Gamma}[k-1] \hat{\Gamma}[k]; \\ \bar{v}_{\Pi}^0 &= \bar{v}_{\Pi}^0[k-1] + (E + \hat{\Theta}[k-1])^{-1} \bar{v}_{\Pi}^0[k]; \\ \hat{\Theta} &= \hat{\Theta}[k] + \hat{\Theta}[k-1] + \hat{\Theta}[k-1] \hat{\Theta}[k]; \\ D &= D[k-1] + (E + \hat{\Theta}[k-1]) D[k]. \quad (6) \end{aligned}$$

Структурная схема, реализующая итерационную процедуру калибровки ЧЭ БИНС, представлена на Рис. 1.

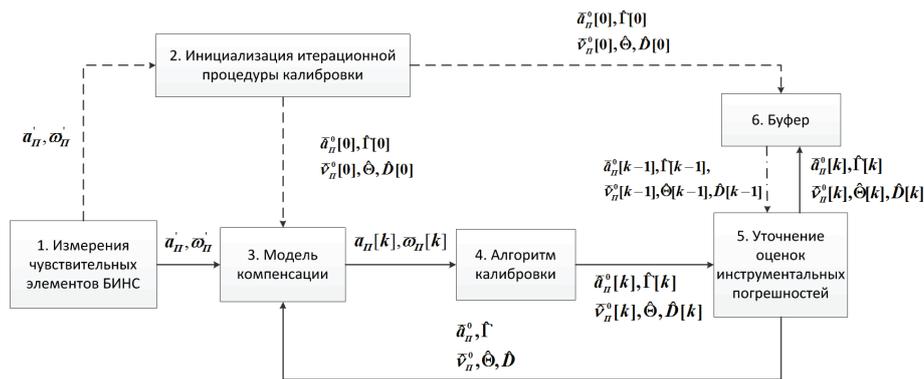


Рис. 1. Структурная схема, реализующая итерационную процедуру калибровки ЧЭ БИНС

В блоке 1 формируются измерения ЧЭ  $\bar{a}_n^i, \bar{\omega}_n^i$ . В блоке 2 формируются начальные значения для инициализации 1 итерации процедуры калибровки. Для этой цели по измерениям  $\bar{a}_n^i, \bar{\omega}_n^i$  формируются приближенные оценки инструментальных погрешностей  $\bar{a}_n^0[0], \hat{\Gamma}[0], \bar{v}_n^0[0], \hat{\Theta}[0], \hat{D}[0]$ , которые загружаются в буфер (блок 6). В блоке 3 измерения ЧЭ  $\bar{a}_n^i, \bar{\omega}_n^i$  уточняются с учетом приближенных оценок  $\bar{a}_n^0[0], \hat{\Gamma}[0], \bar{v}_n^0[0], \hat{\Theta}[0], \hat{D}[0]$  в соответствии с моделью компенсации (3). В блоке 4 реализуется алгоритм калибровки, посредством которого по уточненным измерениям  $\bar{a}_n^i, \bar{\omega}_n^i$  формируются оценки инструментальных погрешностей ЧЭ на 1 итерации  $\bar{a}_n^o[1], \hat{\Gamma}[1], \bar{v}_n^o[1], \hat{\Theta}[1], \hat{D}[1]$ . В блоке 5 в соответствии с (6) приближенные оценки инструментальных погрешностей  $\bar{a}_n^o[0], \hat{\Gamma}[0], \bar{v}_n^o[0], \hat{\Theta}[0], \hat{D}[0]$ , сформированные на этапе инициализации (блок 6), уточняются по аналогичным оценкам  $\bar{a}_n^o[1], \hat{\Gamma}[1], \bar{v}_n^o[1], \hat{\Theta}[1], \hat{D}[1]$ , сформированным на 1 итерации. Уточненные оценки  $\bar{a}_n^o, \hat{\Gamma}, \bar{v}_n^o, \hat{\Theta}, \hat{D}$  загружаются в буфер (блок 6) и используются для инициализации 2 итерации процедуры калибровки в блоке 3.

### Результаты экспериментальных исследований точностных характеристик итерационной процедуры калибровки

Экспериментальные исследования точностных характеристик итерационной процедуры калибровки проводились с использованием точного двухступенного испытательного стенда производства фирмы «Acutronic» (Швейцария). В качестве испытуемого прибора был выбран маятниковый компенсационный акселерометр А-100 производства фирмы АО «Инерциальные технологии «Технокомплекс». Температурная

модель инструментальных погрешностей акселерометров А-100 формировалась в диапазоне температур от  $-55\text{ }^\circ\text{C}$  до  $+60\text{ }^\circ\text{C}$  с шагом  $10\text{ }^\circ\text{C}$ .

В соответствии с данными из Таблицы 1 было сформировано 3 набора измерений с использованием оптимальной программы калибровки из 18 измерительных положений [5]. Каждый из наборов измерений включал по 13 экспериментов, которые проводились в условиях, когда температура за время проведения каждого из экспериментов изменялась не более чем

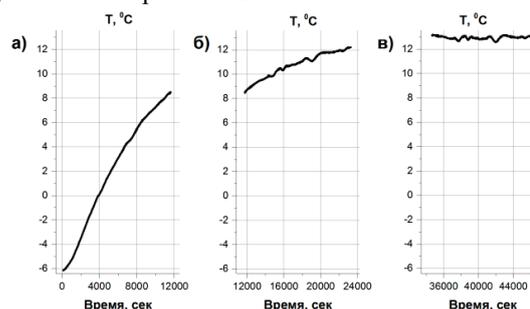


Рис. 2. Характерное изменение температуры в ходе проведения экспериментов: а) 1 набора измерений; б) 2 набора измерений; в) 3 набора измерений

на  $15\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $4\text{ }^\circ\text{C}$  и  $0.5\text{ }^\circ\text{C}$  соответственно (Рис. 2).

Оценки инструментальных погрешностей акселерометров формировались в соответствии с алгоритмом инвариантной калибровки, предложенным в [6] с использованием итерационной процедуры (6). Зависимость оценок инструментальных погрешностей акселерометров от температуры описывалась полиномом 6 порядка. Характерный вид зависимости инструментальных погрешностей акселерометров от температуры, сформированных за две итерации по данным третьего набора измерений представлен на Рис. 3 (на примере смещений нулей и погрешностей масштабных коэффициентов). Разность между аппроксимирующими характеристиками на Рис. 3, сформированными по третьему набору измерений (в условиях термостатированного состояния) и аналогичными характеристиками, сформированными в условиях существенного

изменения температуры (первый и второй набо-

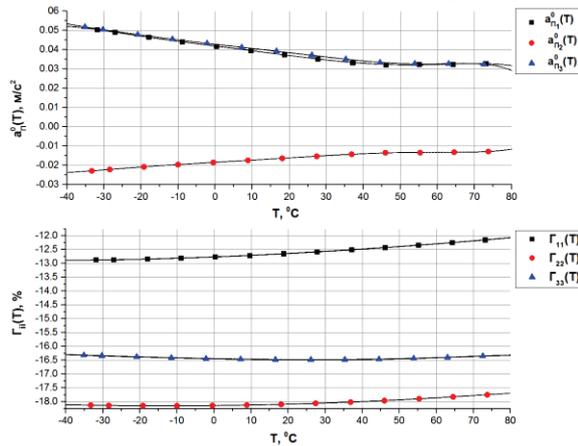


Рис. 3. Характерный вид аппроксимирующих характеристик (на примере 1 набора измерений)

По данным из Рис. 4, 5 можно сделать вывод, что температурная модель инструментальных погрешностей акселерометров, сформированная по 1 и 2 набору измерений, в условиях существенного изменения температуры практически не отличается от аналогичной модели, полученной по 3 набору измерений, в условиях термостатированного состояния. Так, максимальное отличие аппроксимирующих характеристик не превышает:  $0.0002 \text{ м/с}^2$  (5 угл. сек) для смеще-

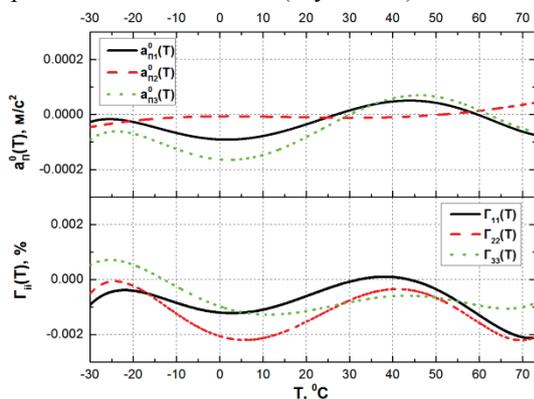


Рис. 5. Разность аппроксимирующих характеристик, сформированных по 3 и 2 наборам измерений

ний нулей;  $0.0025 \%$  (25 ppm) для погрешностей масштабных коэффициентов. Указанные отличия аппроксимирующих характеристик удовлетворяют целевой точности калибровки испытываемых приборов и не являются критичными.

Экспериментальное исследование точностных характеристик температурных моделей испытываемых акселерометров проводилось с использованием набора измерений, сформированного при температуре окружающей среды  $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ . При этом блок акселерометров на испытательном стенде ориентировался в 8 различных измерительных положениях относительно вектора ускорения силы тяжести. Указанный набор измерений был сформирован в условиях, когда

ры измерений) представлена на Рис. 4, 5.

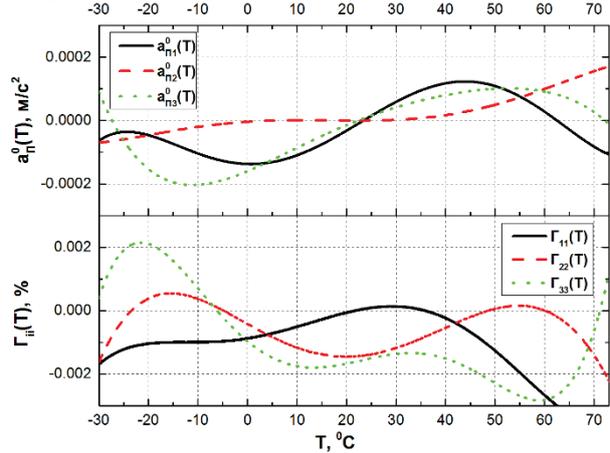


Рис. 4. Разность аппроксимирующих характеристик, сформированных по 1 и 3 наборам измерений

температура окружающей среды менялась на  $+10 \text{ }^\circ\text{C}$  (относительно начальной температуры) со скоростью  $+2 \text{ }^\circ\text{C/мин}$ .

Измерения акселерометров уточнялись с использованием температурных моделей, сформированных по 1, 2 и 3 наборам измерений и использовались для расчета невязки измерений  $\Delta a$  в соответствии с выражением (Рис. 6):

$$\Delta a = g_{II} - g_{Э} = \sqrt{(a'_{II1})^2 + (a'_{II2})^2 + (a'_{II3})^2} - g_{Э}.$$

Здесь  $g_{II}$  – значение модуля вектора ускорения силы тяжести  $\vec{g}$ , рассчитанное по уточненным измерениям акселерометров  $\vec{a}'_{II}$ ;  $g_{Э}$  – эталонное значение модуля вектора  $\vec{g}$  (на месте проведения испытаний составляет  $9.815179 \text{ м/с}^2$ ).

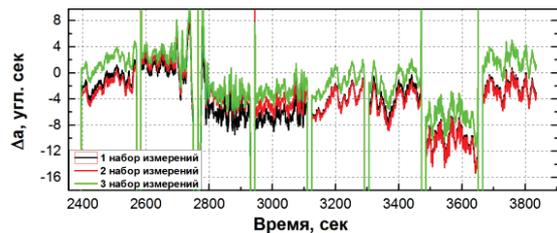


Рис. 6. Точность калибровки акселерометров

По данным из Рис. 6 видно, что значения остаточной погрешности  $\Delta a$  для каждого из наборов измерений практически не отличаются. При этом характеристики центрированы около оси абсцисс, а максимальное значение остаточной погрешности не превышает 16 угл. сек.

## Выводы

Синтезирована итерационная процедура калибровки ЧЭ БИНС. Результаты проведенных

экспериментальных исследований позволяют сделать вывод, что предложенная итерационная процедура обеспечивает:

- точное определение оценок инструментальных погрешностей акселерометров, в условиях, когда температура за время проведения испытаний изменяется на 15 °С;
- существенное снижение требований, предъявляемых к точности выдерживания температуры в ходе проведения испытаний;
- существенное снижение трудозатрат на осуществление калибровки.

#### Литература

1. **Фомичев А.А., Колчев А.Б., Ларионов П.В., Успенский В.Б.** Сплайновая модель температурной зависимости дрейфа лазерного гироскопа // *Материалы XV Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам*. 2008. С. 65 – 67.
2. **Шаймарданов И.Х., Дзуев А.А., Егоров Ю.Г., Некрасов А.В.** Итерационная процедура калибровки чувствительных элементов БИНС // *Авиакосмическое приборостроение*. 2018. №2. С. 3....17.
3. **Козлов А.В. Тарыгин И.Е., Голован А.А., Шаймарданов И.Х., Дзуев А.А.** Калибровка инерциальных измерительных блоков с оценкой температурных зависимостей по эксперименту с переменной температурой: результаты калибровки БИНС-РТ // *Материалы XXIV Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам*. 2017. С. 225....228.
4. **Шаймарданов И.Х., Дзуев А.А., Голиков В.П.** Методы калибровки бесплатформенной навигационной системы (БИНС) различного класса точности // *Материалы XXIII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам*. 2016. С. 46....51.
5. **Егоров Ю.Г, Дзуев А.А.** Синтез оптимальных программ калибровки акселерометров БИНС // *Авиакосмическое приборостроение*. 2017. №5. С. 3....17.
6. **Егоров Ю.Г, Дзуев А.А.** Уравнения инвариантной калибровки акселерометров БИНС // *Авиакосмическое приборостроение*. 2016. №8. С. 3....12.