

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА ШУМА В КАНАЛЕ АКСЕЛЕРОМЕТРА ИНЕРЦИАЛЬНОГО НАВИГАЦИОННОГО МОДУЛЯ

Д.В.Павлов, М.Н.Петров*

ASSESSMENT TECHNIQUE FOR DETERMINING THE CIRCUIT NOISE INTENSITY IN THE ACCELEROMETER OF INERTIAL NAVIGATION MODULE

D.V.Pavlov, M.N.Petrov*

ЗАО «ЭЛСИ», Великий Новгород, lukinkg@mail.ru

*Институт электронных и информационных систем НовГУ, Mikhail.Petrov@novsu.ru

Данная работа посвящена исследованию случайных составляющих погрешностей выходного сигнала в акселерометрическом канале инерциального навигационного модуля, в котором использован акселерометр MMA7331LT. Выполнена оценка спектрального состава случайных составляющих погрешностей акселерометра с применением метода вариации Аллана. Получены коэффициенты, характеризующие интенсивность различных типов шумов.

Ключевые слова: MEMS-акселерометр, погрешности выходного сигнала, шум, вариация Аллана, дисперсия Аллана, интенсивность шумов, спектральная плотность мощности, белый шум

This work is devoted to the research of accidental component errors in output signals in the accelerometer channel of inertial navigation module (INM) in which the accelerometer MMA7331LT is used. The authors assessed the accuracy of accelerometer and intensity of its accidental component errors using the Allan variance method. Some temporal coefficients characterizing noise intensity are received.

Keywords: MEMS accelerometer, errors of an output signal, noise, Allan variance, noise intensity, power spectral density, white noise

Введение

Теоретические и экспериментальные исследования, связанные с синтезом имитационных моделей инерциальных навигационных систем (ИНС), инерциальных датчиков и командно-измерительных приборов, интенсивно ведутся за рубежом и в России. Основной проблемой при проектировании имитационных моделей являются учет и моделирование случайных составляющих погрешностей. Сложность решения этой задачи связана с тем, что структура и характер шумовых составляющих имеют различную спектральную плотность мощности, время корреляции и интенсивность. Поэтому выявление отдельных составляющих шума в канале измерения инерциального датчика — непростая задача для моделирования, так как интенсивность составляющих шумов может зависеть от условий экспериментальных измерений.

Традиционно для описания и моделирования случайных процессов используются математические методы, основанные на вычислении корреляционных функций и спектральных плотностей мощности [1]. Однако в последнее время для оценки спектрального состава шума широкое распространение получил метод вариации Аллана.

Целью настоящей работы является оценка спектрального состава случайных составляющих погрешности выходного сигнала акселерометра MMA7331LT для определения их вклада в результирующую погрешность.

Оценка интенсивностей отдельных составляющих шума может быть использована для реализации передаточной функции формирующего цифро-

го фильтра акселерометрического канала ИНМ с целью повышения точности имитационной модели акселерометра.

Данная работа является продолжением исследовательских работ по разработке моделей акселерометра MMA7331LT [2,3].

Погрешности выходных сигналов MMA7331L

Основной проблемой навигационных систем, работающих длительное время в автономном режиме, является наличие погрешности, которая накапливается с течением времени.

Погрешность выходных сигналов акселерометра можно представить в виде выражения:

$$\varepsilon = \varepsilon_s + \tilde{\varepsilon}, \quad (1)$$

где ε_s — систематическая погрешность; $\tilde{\varepsilon}$ — случайная погрешность.

Значение систематической погрешности остается постоянным или закономерно изменяющимся при повторных измерениях и преобразовании линейного ускорения. Погрешность второго вида изменяется случайным образом при повторных измерениях и преобразовании линейного ускорения.

Возникновение систематической ошибки в MEMS-акселерометре обусловлено следующими факторами:

— случайная погрешность, связанная с нестабильностью внутренних микроэлектронных компонентов схемы;

— наличие собственных частот микромеханической конструкции чувствительного маятникового элемента;

— воздействием возмущающих сил или моментов на подвижные части маятника акселерометра.

Систематическая погрешность состоит из основной и дополнительной составляющей. Последняя связана с чувствительностью акселерометра к дополнительным внешним факторам (магнитному полю, скорости нагрева, вибрациям, давлению и т.д.).

Основная составляющая систематической погрешности акселерометра будет отличаться для разных экземпляров одной марки акселерометра. Эта составляющая связана с температурой и скоростью нагрева акселерометра.

Систематическую погрешность можно учесть с помощью эксперимента и последующей аппроксимации полученных данных. Коррекция случайных погрешностей представляет более сложную процедуру, поскольку воздействие от этого типа погрешностей меняется случайным образом от эксперимента к эксперименту.

Ранее в работах [2] и [3] авторами разработаны различные варианты имитационной модели акселерометра. В них представлены методики калибровки среднеквадратичного отклонения шума и дрейфа нуля акселерометра в виде полиномиальных зависимостей от температуры. Предполагалось, что длительный дрейф представляет собой систематическую составляющую погрешности, а переменная составляющая дрейфа и случайные шумы вносят вклад в случайную составляющую погрешности.

В этих работах случайная составляющая погрешности представлялась интегральной величиной, используя допущение, что интенсивность результирующего шума распределена по нормальному закону. Ее оценка в широком интервале температур позволяет повысить точность имитационной модели до уровня 4%. Однако для дальнейшего повышения точности имитационной модели желательно дать оценку спектрального состава шума. Это связано с тем, что амплитуда и спектральный состав отдельных составляющих шума зависят от времени работы ИНМ, изменяясь даже при одной температуре.

В данной работе проведена идентификация отдельных компонент шума, что позволит повысить точность модели акселерометра путем разработки формирующего цифрового фильтра ИНМ, позволяющего снизить амплитуду интегрального шума ИНМ.

Анализ основных типов шума

Согласно литературным источникам [4,5] в канале инерциальных датчиков можно выделить семь компонент шума.

1. Шум квантования.

Природа этого типа шумов обусловлена дискретной природой датчиков. Появление такого типа шума объясняется малым различием между амплитудами аналогового сигнала и амплитудами точек, выбранных с учетом разрешения АЦП. В связи с этим результаты цифрового сигнала будут немного отличаться от исходного аналогового сигнала.

В зависимости от типа АЦП шум квантования может возникать при округлении до определенного

разряда или при отбрасывании младших разрядов. При этом теряется часть информации исходного аналогового сигнала.

Этот тип шума характеризуется малым временем корреляции. Это означает, что он может быть отфильтрован полосовым фильтром.

Погрешность такого типа не накапливается со временем, а связана только с потерей части исходной информации аналогового сигнала.

2. Случайное блуждание скорости (Velocity Random Walk).

Этот шум описывается винеровским случайным процессом. Он представляет компоненту аддитивного белого шума, которая проявляется в отклонении значений линейной скорости от ожидаемых случайным образом. Эта компонента шума влияет на результат интегрирования ускорения. В результате увеличивается среднеквадратическое отклонение (СКО) напряжения шума с ростом времени:

$$\sigma_V(t) = \sigma_W \cdot \sqrt{T_0 \cdot t}, \quad (2)$$

где $\sigma_V(t)$ — СКО случайного блуждания скорости, σ_W — СКО белого шума на канале акселерометра, T_0 — период дискретизации, t — время.

Данный тип шума описывается спектром белого шума с малым временем корреляции. Большинство источников такого типа шума устраняются при математическом моделировании или путем создания фильтров.

3. Нестабильность смещения нуля (Bias Instability).

Нестабильность нуля вызвана шумами в электронных компонентах съема и обработки информации инерциальных датчиков. Этот тип шума еще называют фликкер-шумом (розовый НЧ шум) со спектральной плотностью $1/f$. Такой тип шума проявляется практически у всех компонентов электронной техники, оказывая значительное влияние на низких частотах. Однако с увеличением частоты его интенсивность падает.

На сегодняшний день нет полной теории, которая давала бы ясное и подробное описание процессов розового шума.

4. Случайный уход ускорения (Rate Random Walk).

Такой тип шумов представляет собой случайный уход скорости изменения величин датчиков. Например, у акселерометра — случайный уход ускорения. На больших промежутках времени (несколько часов) наблюдается медленное монотонное отклонение значений измеряемой величины. Эта ошибка характеризуется очень большим временем корреляции. Чтобы оценить эту ошибку, нужно снять с датчиков значительное количество данных. Однако на больших промежутках времени данные с датчика подвержены влияниям условий среды, что может повлиять на точность оценки данной ошибки.

5. Шум непрерывного ухода ускорения (Rate Ramp).

Такой тип ошибки представляет собой детерминированное отклонение показаний датчика на значительных промежутках времени. Фактически, такой

тип шумов связан с погрешностью масштабного коэффициента датчиков (в частности акселерометра).

6. Синусоидальный шум.

Синусоидальный шум — шум, порождаемый вибрациями в компонентах датчика. Принцип работы любых MEMS-датчиков основан на измерении вибрации/вращений и линейных ускорений компонентов устройства. Этим обусловлено зашумление выходного сигнала датчика синусоидальной компонентой, непосредственно связанной с резонансной частотой его компонентов.

7. Шум корреляции (марковский шум).

Такой тип шумов может встречаться в любых электронных схемах, где присутствуют компоненты с RC- и LC-цепочками. Для его описания используют корреляционную функцию вида:

$$K(\tau) = D \cdot e^{-\mu|\tau|}, \quad (3)$$

где D — дисперсия шума; μ — коэффициент затухания.

Этот вид шума может иметь как малое, так и большое время корреляции.

Метод вариации Аллана

Для оценки и идентификации различных составляющих шума используется метод вариации Аллана, основанный на вычислении двухвыборочной дисперсии [4] (дисперсии соседних пар данных):

$$\sigma_A^2(\tau) = \frac{1}{2(N-1)} \sum_{k=1}^{N-1} (A_{k+1}(\tau) - A_k(\tau))^2, \quad (4)$$

где $A_k(\tau)$ — усредненное значение сигнала ускорения k -го номера дискрета при разбиении временной области на N частей; $\tau = n \cdot \tau_0$ — интервал времени осреднения данных; n — кратность интервала осреднения; τ_0 — время дискретизации АЦП (1/2000 с для ADS1281).

В численных расчетах обычно используют модифицированную формулу вариации Аллана:

$$\sigma^2(n \cdot \tau_0) = \frac{1}{2 \cdot (L - 2 \cdot n) \cdot (n \cdot \tau_0)^2} \sum_{j=1}^{L-2n} (V_{j+2n} - 2 \cdot V_{j+n} + V_j)^2, \quad (5)$$

где $n = 1, 2, 3 \dots n_{\max}$, причем $n_{\max} \leq (L-1)/2$; L — общее число отсчетов; j — количество отсчетов, используемое при интегрировании линейного ускорения.

$V_k(\tau)$ и $V_{k+1}(\tau)$ — усредненные сигналы (скорости) с акселерометра, определяемые как:

$$V_k(\tau) = \frac{1}{\tau} \cdot \int_{t_k}^{t_k+\tau} A(t) \cdot dt, \quad V_{k+1}(\tau) = \frac{1}{\tau} \cdot \int_{t_{k+1}}^{t_{k+1}+\tau} A(t) \cdot dt. \quad (6)$$

$A(t)$ — сигнал с выхода акселерометра.

Дисперсия Аллана связана со спектральной плотностью мощности шумов следующей формулой:

$$\sigma_A^2 = 4 \int_0^{\infty} P(f) \frac{\sin^4(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2} df. \quad (7)$$

Исходя из известных для инерциальных измерителей основных типов шумовых составляющих [4,5], можно записать выражение, аппроксимирующее вариацию Аллана $\sigma_A^2(\tau)$ полиномом $p_A^2(\tau)$ в следующем виде:

$$\sigma_A^2(\tau) \approx p_A^2(\tau) = R^2 \frac{\tau^2}{2} + K^2 \frac{\tau}{3} + B^2 \frac{2}{\pi} \ln 2 + N^2 \frac{1}{\tau} + Q^2 \frac{3}{\tau^2}. \quad (8)$$

Выражение (8) включает в себя 5 основных источников шума. Здесь значения коэффициентов R, K, B, N, Q полинома (8) характеризуют интенсивность отдельных шумовых составляющих выходного сигнала измерителя: шум непрерывного ухода, случайного изменения ускорения, нестабильность смещения нуля, случайное блуждание скорости и шум квантования соответственно.

Иногда к полиномиальной аппроксимации (8) добавляются еще два слагаемых, связанных с синусоидальным шумом и шумом корреляции. В данном случае эти составляющие шума априорно можно не включать в выражение (8) из-за использования эффективного sinc-фильтра в дельта-сигма АЦП ADS1281.

Методика оценки интенсивности шумов

Определение численных значений коэффициентов, входящих в уравнение (8), осуществляется по методу наименьших квадратов (МНК), который обеспечивает максимальное совпадение аппроксимирующей функции $p_A^2(\tau)$ с экспериментальной $\sigma_A^2(\tau)$.

За основу берется аппроксимация (8).

Обозначим:

$$\sigma_A^2(t) = C_1 \tau^2 + C_2 \tau + C_3 + C_4 \tau^{-1} + C_5 \tau^{-2},$$

где $C_1 = \frac{R^2}{2}; C_2 = \frac{K^2}{3}; C_3 = \frac{2 \ln 2}{\pi} B^2; C_4 = N^2; C_5 = 3Q^2$.

Составляется матричное уравнение:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \\ Q_5 \end{pmatrix} \quad (9)$$

Используется минимум функционала:

$$F^2(C_1, C_2, C_3, C_4, C_5) \rightarrow \min; \text{ или } \frac{\partial F^2}{\partial x_i} = 0; \quad i = 1..5.$$

Матрица коэффициентов и вектор-столбец определяется аналитически:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^N t_i^4 & \sum_{i=1}^N t_i^3 & \sum_{i=1}^N t_i^2 & \sum_{i=1}^N t_i & N \\ \sum_{i=1}^N t_i^3 & \sum_{i=1}^N t_i^2 & \sum_{i=1}^N t_i & N & \sum_{i=1}^N t_i^{-1} \\ \sum_{i=1}^N t_i^2 & \sum_{i=1}^N t_i & N & \sum_{i=1}^N t_i^{-1} & \sum_{i=1}^N t_i^{-2} \\ \sum_{i=1}^N t_i & N & \sum_{i=1}^N t_i^{-1} & \sum_{i=1}^N t_i^{-2} & \sum_{i=1}^N t_i^{-3} \\ N & \sum_{i=1}^N t_i^{-1} & \sum_{i=1}^N t_i^{-2} & \sum_{i=1}^N t_i^{-3} & \sum_{i=1}^N t_i^{-4} \end{pmatrix}; \quad (10)$$

Вектор-столбец

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^{17} \sigma_{A_i}^2 t_i^2 \\ \sum_{i=1}^{17} \sigma_{A_i}^2 t_i \\ \sum_{i=1}^{17} \sigma_{A_i}^2 \\ \sum_{i=1}^{17} \sigma_{A_i}^2 t_i^{-1} \\ \sum_{i=1}^{17} \sigma_{A_i}^2 t_i^{-2} \end{pmatrix} \quad (11)$$

Здесь t_i — время дискретизации АЦП.

В данной работе проводился следующий эксперимент. ИНМ устанавливался на металлический брусок с демпферами, который не подвергался воз-

действию вибраций и ударов. В статических условиях снимали данные ускорений в течение 1,5 часов.

Полученные в результате эксперимента графики зависимостей СКО Аллана от времени усреднения τ для каждой из трех осей акселерометра MMA7331 приведены на рисунке.

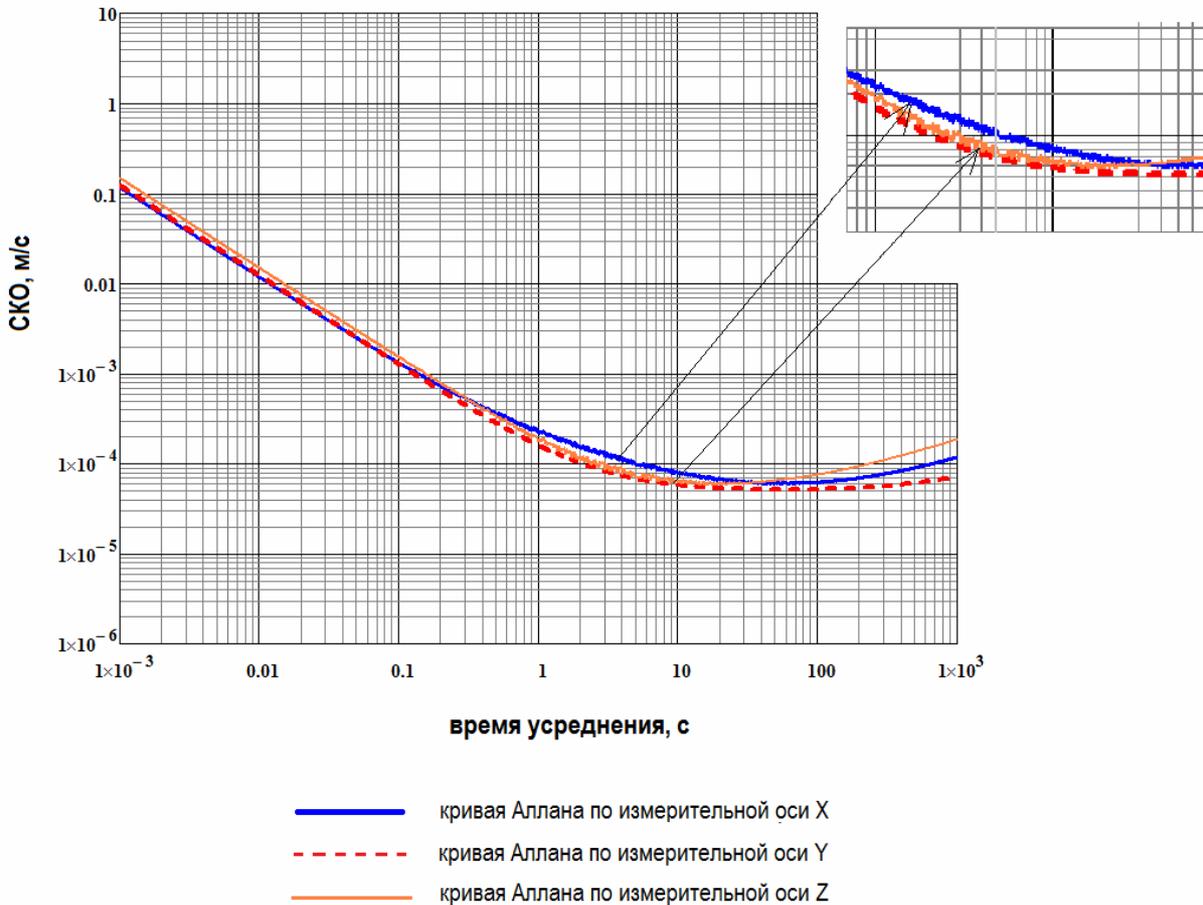
Результаты численной оценки величин коэффициентов R, K, B, N, Q , характеризующих соответствующие им интенсивности шумов приведены в таблице.

В таблице определены значения коэффициентов R, K, B, N, Q . Сравнение их с паспортными характеристиками для данного акселерометра показало следующее:

1) значение коэффициента Q для каждой оси составляет порядка 10^{-4} , что существенно превышает цену единицы младшего разряда акселерометра, установленную разработчиком ИНМ с высокоразряд-

Значение величин коэффициентов интенсивности шумов

| Измерительные оси | Коэффициенты интенсивности шумов | | | | |
|-------------------|---|---|---|---------------------------------|------------------------------|
| | $ R , \times 10^{-8}$ м/с ³ | $ K , \times 10^{-5}$ м/с ² /√с | $ B , \times 10^{-4}$ м/с ² | $ N , \times 10^{-4}$ м/с/√с | $ Q , \times 10^{-4}$ м/с |
| Ось X | 4,2 | 3,6 | 0,55 | 1,05 | 2,25 |
| Ось Y | 3,7 | 2,3 | 0,39 | 0,94 | 1,82 |
| Ось Z | 5,9 | 3,3 | 0,48 | 1,03 | 2,12 |



Зависимость СКО Аллана $\sigma_A(\tau)$ от времени усреднения τ

ным АЦП на уровне $\sim 5,5 \cdot 10^{-8}$ м/с и свидетельствует о повышенной зашумленности измерителя;

2) оценка коэффициента N для каждой оси также составляет порядка 10^{-4} , что показывает высокую интенсивность указанного типа шума для акселерометрического канала;

3) оценка коэффициента B составляет порядка $(0,4-0,5) \cdot 10^{-4}$ м/с². Данную оценку можно считать стабильной, т. к. отклонение от запуска к запуску акселерометра (СКО) не превышает значения $2,1 \cdot 10^{-4}$ м/с²;

4) коэффициенты K и R имеют порядок 10^{-6} и 10^{-8} соответственно, что свидетельствует о низкой интенсивности таких типов шумов.

Отличие экспериментальных данных для каждой из трех измерительных осей акселерометра свидетельствует о преобладании в каналах измерения разных типов шума. Кроме того из рисунка видно, что кривые Аллана, полученные по осям X и Z имеют дополнительные высокочастотные шумы. Идентификация природы этого источника шумов требует отдельного исследования.

Вывод

Проведена оценка спектрального состава и интенсивности различных составляющих шума акселерометра MMA7331LT методом вариации Аллана. Выявлено отличие кривых Аллана для разных осей чувствительности акселерометра, что связано как с доминированием различных компонент анализируемых источников шума, так и с наличием дополнительных источников шума для каждой оси.

Обнаружены отдельные виды шума, которые требуют детального исследования для получения более точной стохастической модели.

1. Кривошеев В.И. Современные методы цифровой обработки сигналов (цифровой спектральный анализ). Учебно-методические материалы по программе повышения квалификации «Современные системы мобильной цифровой связи, проблемы помехозащищенности и защиты информации». Н.Новгород: ННГУ, 2006. 117 с.

2. Павлов Д.В., Лукин К.Г., Петров М.Н. Разработка математической модели MEMS-акселерометра // Вестник НовГУ. 2015. №8 (91). С.22-25.
3. Павлов Д.В., Петров М.Н., Лукин К.Г. Метод температурной калибровки блока микромеханических акселерометров бесплатформенной инерциальной навигационной системы // Метрология. 2015. №2. С.25-35.
4. IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros. IEEE Std 952-1997 (R2008).
5. Zhang X., Li Y., Mumford P., Rizos C. Allan Variance Analysis on Error Characters of MEMS Inertial Sensors for an FPGA-Based GPS/INS System // Proc. of the International Symposium on GPS/GNSS, Tokyo, Japan, 11-14 November 2008. P.127-133.
6. Stockwell W. Bias Stability Measurement: Allan Variance. Crossbow Technology, Inc. Visited February 26, 2004. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.21.0.2092&rep=rep1&type=pdf>

References

1. Krivosheev V.I. Sovremennye metody tsifrovoy obrabotki signalov (tsifrovoy spektral'nyi analiz) [Modern methods of digital signal processing (digital spectral analysis)]. Nizhny Novgorod, UNN Publ., 2006. 117 p.
2. Pavlov D.V., Lukin K.G., Petrov M.N. Razrabotka matematicheskoi modeli MEMS-akselerometra [Development of mathematical model of the MEMS accelerometer]. Vestnik NovGU. Ser. Tekhnicheskie nauki – Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences, 2015, no. 8(91), pp. 22-25.
3. Pavlov D.V., Petrov M.N., Lukin K.G. Metod temperaturnoi kalibrovki bloka mikromekhanicheskikh akselerometrov besplatfornennoi inertsiyal'noi navigatsionnoi sistemy [Method of temperature calibration of the block of micro-mechanical accelerometers being a part of the independent inertial measuring module]. Metrologia – Measurement Techniques, 2015, no. 2, pp. 25-35.
4. IEEE Std 952-1997. IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros. IEEE Std 952-1997 (R2008). IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros.
5. Zhang X., Li Y., Mumford P., Rizos C. Allan variance analysis on error characters of MEMS inertial sensors for an FPGA-based GPS/INS system. Proc. Int. Symp. on GPS/GNSS. Tokyo, 2008, pp. 127-133.
6. Stockwell W. Bias stability measurement: Allan variance. Crossbow Technology, Inc. Visited February 26, 2004. (<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.21.0.2092&rep=rep1&type=pdf>)