

## Температурная калибровка бесплатформенной инерциальной навигационной системы, построенной на базе микромеханических чувствительных элементов

# 01, январь 2011

автор: Пазычев Д. Б.

### Введение

Под задачей калибровки инерциальной навигационной системы понимают задачу определения неизменных в процессе эксплуатации системы параметров модели ошибок датчиков первичной информации, входящих в ее состав. Точность проведенной процедуры калибровки будет во многом определять дальнейшие точностные характеристики навигационной системы в процессе ее эксплуатации на борту подвижного объекта, что свидетельствует о важности корректного выбора самой модели ошибок чувствительных элементов и методики ее определения.

Эксплуатация инерциальной навигационной системы на борту подвижного носителя сопряжена с ее использованием в различные климатические периоды времени, в процессе которых навигационная система должна демонстрировать стабильные выходные показания, не зависящие от внешней температуры. На основании этого требования эксплуатации, следует признать высокую роль температурной калибровки навигационной системы, в процессе которой определяются параметры модели ошибок датчиков первичной информации навигационной системы, зависящие от температуры, среди остальных ее этапов калибровки.

Температурная калибровка навигационной системы может быть исключена из этапов калибровки в случае наличия системой стабилизации температуры датчиков первичной информации, поддерживающей заданную температуру каждого из датчика. Однако

данный способ борьбы с температурными погрешностями датчиков в процессе их эксплуатации весьма трудоемок, требует существенных конструктивных изменений навигационной системы, что отражается на времени ее проектирования, энергопотреблении, размерах и, в конечном счете, на ее цене.

В данной статье будут рассмотрена модель погрешностей датчиков первичной информации бесплатформенной инерциальной навигационной системы, зависящая от температуры, а также представлен пример ее определения для микромеханических датчиков линейного ускорения и датчиков угловой скорости фирмы Analog Devices.

### Модель ошибок датчиков первичной информации

В общем виде, функциональная зависимость выходного сигнала микромеханических датчиков первичной информации может быть представлена следующим образом:

$$\omega_S^B = f_\omega(\vec{\omega}^B, \vec{a}^B, T_{SG}) + w(t), \quad a_S^B = f_a(\vec{a}^B, T_{SA}) + w(t), \quad (1)$$

где  $\omega_S^B$ ,  $a_S^B$  — показания датчика угловой скорости и датчика линейного ускорения соответственно;

$\vec{\omega}^B$  — абсолютная угловая скорость системы координат связанной с подвижным носителем;

$\vec{a}^B$  — абсолютное ускорение системы координат связанной с подвижным носителем;

$T_{SG}$ ,  $T_{SA}$  — температуры датчиков

$w(t)$  — белый шум с нулевым математическим ожиданием.

На основании принципа независимости сигналов, действующих на датчик первичной информации, формулу (1) можно представить в следующем виде:

$$\omega_S^B = f_\omega(\vec{\omega}^B, \vec{a}^B) + f_\omega(T_{SG}) + w(t), \quad a_S^B = f_a(\vec{a}^B) + f_a(T_{SA}) + w(t),$$

где  $f_\omega(T_{SG})$  и  $f_a(T_{SA})$  - показания датчика угловой скорости и датчика линейного ускорения соответственно, зависящие от температур самих датчиков;

$f_\omega(\vec{\omega}^B, \vec{a}^B)$  и  $f_a(\vec{a}^B)$  - показания датчика угловой скорости и датчика линейного ускорения соответственно, зависящие от абсолютной угловой скорости и абсолютного линейного ускорения носителя.

Как было указано ранее, в данной статье будет рассматривать методика именно температурной калибровки навигационной системы, основной задачей которой следует признать определение функций  $f_\omega(T_{SG})$  и  $f_a(T_{SA})$ , учет которых позволит минимизировать влияние температуры на показания датчиков первичной информации навигационной системы в процессе ее разогрева и последующей работы.

В общем виде, на основании разложения в ряд Маклорена, указанные выше функциональные зависимости могут быть представлены следующим образом:

$$\begin{aligned} f_\omega(T_{SG}) &= f_\omega(0) + \frac{\partial f_\omega(0)}{\partial T_{SG}} \cdot T_{SG} + \dots + \frac{\partial f_\omega^{(n)}(0)}{\partial T_{SG}^{(n)}} \cdot T_{SG}^n \\ f_a(T_{SA}) &= f_a(0) + \frac{\partial f_a(0)}{\partial T_{SA}} \cdot T_{SA} + \dots + \frac{\partial f_a^{(k)}(0)}{\partial T_{SA}^{(k)}} \cdot T_{SA}^k \end{aligned} \quad (2)$$

где  $n$  и  $k$  - степени аппроксимирующих кривых для датчиков угловой скорости и датчиков линейного ускорения соответственно.

Принимая коэффициенты  $\frac{\partial f_\omega^{(i)}(0)}{\partial T_{SG}^{(i)}}$  и  $\frac{\partial f_a^{(j)}(0)}{\partial T_{SA}^{(j)}}$  в формуле (2) постоянными, где

$i = 1..n$ , а  $j = 1..k$ , функциональные зависимости могут быть представлены полиномами высоких порядков:

$$\begin{aligned} f_\omega(T_{SG}) &= K_{\omega,n} \cdot T_{SG}^n + K_{\omega,n-1} \cdot T_{SG}^{n-1} + \dots + K_{\omega,0}, \\ f_a(T_{SA}) &= K_{a,k} \cdot T_{SA}^k + K_{a,k-1} \cdot T_{SA}^{k-1} + \dots + K_{a,0} \end{aligned} \quad (3)$$

Тогда, на основании принятой модели погрешности датчиков первичной информации навигационной системы от температуры, под задачей температурной калибровки будем понимать определение следующих коэффициентов:

$$K_{\omega} = \{K_{\omega,n}, K_{\omega,n-1} \dots K_{\omega,1}, K_{\omega,0}\}, K_a = \{K_{a,k}, K_{a,k-1} \dots K_{a,1}, K_{a,0}\}.$$

Данные коэффициенты должны быть определены для каждого датчика угловой скорости и каждого датчика линейного ускорения.

### **Адаптированный метод наименьших квадратов**

Пусть  $Z_i$  и  $T_i$  - выходной сигнал и температура  $i$ -го датчика навигационной системы. Тогда, без уменьшения общности и на основании принятой модели погрешностей датчиков (3), можно признать верным:

$$Z_i = K_{i,n} \cdot T_i^n + K_{i,n-1} \cdot T_i^{n-1} + \dots + K_{i,0}, i = \omega_X, \omega_Y, \omega_Z, a_X, a_Y, a_Z,$$

где  $K_{i,n}, K_{i,n-1}, \dots, K_{i,0}$  - коэффициенты, подлежащие определению.

Тогда, для каждого  $j$ -го измерения ошибка аппроксимации выходного сигнала  $i$ -го датчика навигационной системы может быть записана следующим образом:

$$\delta_{i,j} = (Z_{i,j} - K_{i,n} \cdot T_{i,j}^n - K_{i,n-1} \cdot T_{i,j}^{n-1} - \dots - K_{i,0}),$$

$$i = \omega_X, \omega_Y, \omega_Z, a_X, a_Y, a_Z, j = 1..m$$

где  $m$  - количество измерений пары сигналов  $Z_i$  и  $T_i$ .

На основании метода наименьших квадратов, среднеквадратичная ошибка отклонений измеренных данных от аппроксимирующей кривой должна быть минимальна.

Данное условие можно представить в виде следующих функционалов:

$$S_i = \sum_{j=1}^m (\delta_{i,j}^2 \cdot \Delta T_{i,j}) \rightarrow \min, i = \omega_X, \omega_Y, \omega_Z, a_X, a_Y, a_Z, \quad (4)$$

где  $\Delta T_{i,j} = T_{i,j} - T_{i,j-1}$  - изменение температуры  $i$ -го датчика навигационной системы по отношению к предыдущему такту, выступающее в качестве адаптирующего данный метод весового коэффициента. Подобное условие приводит к тому, что данные, поступающие с малым изменением температуры, начинают оказывать меньшее влияние на рассчитываемые аппроксимирующие коэффициенты, что приводит к аппроксимации кривой в целом в области меняющихся температур. Данное обстоятельство исключает погрешности аппроксимации в случае выхода температурной характеристики в область установившихся значений и позволяет ввести ступенчатое изменение внешней температуры всей навигационной системы в процессе проведения процедуры калибровки.

Решение записанных ранее функционалов (4) можно представить в следующем виде:

$$\frac{\partial S_i}{\partial K_{i,p}} = 0, i = \omega_X, \omega_Y, \omega_Z, a_X, a_Y, a_Z, p = 0..n,$$

Раскрывая описанные выше зависимости, получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial S_i}{\partial K_{i,n}} = -2 \cdot \sum_{j=1}^m [(Z_{i,j} - K_{i,n} \cdot T_{i,j}^n - K_{i,n-1} \cdot T_{i,j}^{n-1} - \dots - K_{i,0}) \cdot T_{i,j}^n \cdot \Delta T_{i,j}] \\ \frac{\partial S_i}{\partial K_{i,n-1}} = -2 \cdot \sum_{j=1}^m [(Z_{i,j} - K_{i,n} \cdot T_{i,j}^n - K_{i,n-1} \cdot T_{i,j}^{n-1} - \dots - K_{i,0}) \cdot T_{i,j}^{n-1} \cdot \Delta T_{i,j}] \\ \vdots \\ \frac{\partial S_i}{\partial K_{i,1}} = -2 \cdot \sum_{j=1}^m [(Z_{i,j} - K_{i,n} \cdot T_{i,j}^n - K_{i,n-1} \cdot T_{i,j}^{n-1} - \dots - K_{i,0}) \cdot T_{i,j} \cdot \Delta T_{i,j}] \\ \frac{\partial S_i}{\partial K_{i,0}} = -2 \cdot \sum_{j=1}^m [(Z_{i,j} - K_{i,n} \cdot T_{i,j}^n - K_{i,n-1} \cdot T_{i,j}^{n-1} - \dots - K_{i,0}) \cdot \Delta T_{i,j}] = 0 \\ i = \omega_X, \omega_Y, \omega_Z, a_X, a_Y, a_Z \end{array} \right.$$

Тогда, на основании описанного выше уравнения, можно признать верным следующее:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \sum_{j=1}^m (Z_{i,j} \cdot T_{i,j}^n \cdot \Delta T_{i,j}) = \\
 \quad \sum_{j=1}^m (K_{i,n} \cdot T_{i,j}^{2n} \cdot \Delta T_{i,j} + K_{i,n-1} \cdot T_{i,j}^{2n-1} \cdot \Delta T_{i,j} + \dots + K_{i,0} \cdot T_{i,j}^n \cdot \Delta T_{i,j}) \\
 \sum_{j=1}^m (Z_{i,j} \cdot T_{i,j}^{n-1} \cdot \Delta T_{i,j}) = \\
 \quad \sum_{j=1}^m (K_{i,n} \cdot T_{i,j}^{2n-1} \cdot \Delta T_{i,j} + K_{i,n-1} \cdot T_{i,j}^{2n-2} \cdot \Delta T_{i,j} + \dots + K_{i,0} \cdot T_{i,j}^{n-1} \cdot \Delta T_{i,j}) \\
 \quad \vdots \\
 \sum_{j=1}^m (Z_{i,j} \cdot T_{i,j} \cdot \Delta T_{i,j}) = \\
 \quad \sum_{j=1}^m (K_{i,n} \cdot T_{i,j}^{n+1} \cdot \Delta T_{i,j} + K_{i,n-1} \cdot T_{i,j}^n \cdot \Delta T_{i,j} + \dots + K_{i,0} \cdot T_{i,j} \cdot \Delta T_{i,j}) \\
 \sum_{j=1}^m (Z_{i,j} \cdot \Delta T_{i,j}) = \\
 \quad \sum_{j=1}^m (K_{i,n} \cdot T_{i,j}^n \cdot \Delta T_{i,j} + K_{i,n-1} \cdot T_{i,j}^{n-1} \cdot \Delta T_{i,j} + \dots + K_{i,0} \cdot \Delta T_{i,j}) \\
 i = \omega_X, \omega_Y, \omega_Z, a_X, a_Y, a_Z
 \end{array} \right.$$

Однако данные уравнения требуют сохранения произведений выходных сигналов датчиков, что может привести к переполнению памяти вычислителя навигационной системы. Разделяя обе части уравнения на  $m$  и заменяя выражения подобным образом

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^m X_j}{m}, \text{ получим:}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{Z_i \cdot T_i^n \cdot \Delta T_i} = K_{i,n} \cdot \overline{T_i^{2n} \cdot \Delta T_i} + K_{i,n-1} \cdot \overline{T_i^{2n-1} \cdot \Delta T_i} + \dots + K_{i,0} \cdot \overline{T_i^n \cdot \Delta T_i} \\ \overline{Z_i \cdot T_i^{n-1} \cdot \Delta T_i} = K_{i,n} \cdot \overline{T_i^{2n-1} \cdot \Delta T_i} + K_{i,n-1} \cdot \overline{T_i^{2n-2} \cdot \Delta T_i} + \dots + K_{i,0} \cdot \overline{T_i^{n-1}} \\ \dots \\ \overline{Z_i \cdot T_i \cdot \Delta T_i} = K_{i,n} \cdot \overline{T_i^{n+1} \cdot \Delta T_i} + K_{i,n-1} \cdot \overline{T_i^n \cdot \Delta T_i} + \dots + K_{i,0} \cdot \overline{T_i \cdot \Delta T_i} \\ \overline{Z_i \cdot \Delta T_i} = K_{i,n} \cdot \overline{T_i^n \cdot \Delta T_i} + K_{i,n-1} \cdot \overline{T_i^{n-1} \cdot \Delta T_i} + \dots + K_{i,0} \cdot \overline{\Delta T_i} \\ i = \omega_X, \omega_Y, \omega_Z, a_X, a_Y, a_Z \end{array} \right.$$

Таким образом, неизвестные аппроксимирующие коэффициенты могут быть найдены решением матричного уравнения следующего вида:

$$K_i = B_i^{-1} \cdot A_i, \quad i = \omega_X, \omega_Y, \omega_Z, a_X, a_Y, a_Z \quad (5)$$

где

$$B_i = \begin{bmatrix} \overline{T_i^{2n} \cdot \Delta T_i} & \overline{T_i^{2n-1} \cdot \Delta T_i} & \dots & \overline{T_i^{n-1} \cdot \Delta T_i} & \overline{T_i^n \cdot \Delta T_i} \\ \overline{T_i^{2n-1} \cdot \Delta T_i} & \overline{T_i^{2n-2} \cdot \Delta T_i} & \dots & \overline{T_i^{n-2} \cdot \Delta T_i} & \overline{T_i^{n-1} \cdot \Delta T_i} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \overline{T_i^{n+1} \cdot \Delta T_i} & \overline{T_i^n \cdot \Delta T_i} & \dots & \overline{T_i^2 \cdot \Delta T_i} & \overline{T_i \cdot \Delta T_i} \\ \overline{T_i^n \cdot \Delta T_i} & \overline{T_i^{n-1} \cdot \Delta T_i} & \dots & \overline{T_i \cdot \Delta T_i} & \overline{\Delta T_i} \end{bmatrix}, \quad K_i = \begin{bmatrix} K_{i,n} \\ K_{i,n-1} \\ \dots \\ K_{i,1} \\ K_{i,0} \end{bmatrix},$$

$$A_i = \begin{bmatrix} \overline{Z_i \cdot T_i^n \cdot \Delta T_i} \\ \overline{Z_i \cdot T_i^{n-1} \cdot \Delta T_i} \\ \dots \\ \overline{Z_i \cdot T_i \cdot \Delta T_i} \\ \overline{Z_i \cdot \Delta T_i} \end{bmatrix}.$$

### Методика проведения испытаний

Испытания описанного выше способа определения температурных погрешностей датчиков первичной информации проводились в процессе калибровки навигационной

системы «КомпаНав-2», построенной на базе низкоточных и недорогих микромеханических датчиках угловой скорости ADXRS300 и микромеханических датчиков линейного ускорения ADXL210 фирмы Analog Devices.

Указанная навигационная система (рис 1.) обладает малыми размерами, малым электропотреблением и может быть размещена на борту летательного аппарата с возможностью питания от его штатной электропроводки (таблица 1). Обладая столь малыми размерами, навигационная система «КомпаНав-2» предоставляет пользователю полное навигационное решение, включающее углы ориентации носителя, его линейные скорости и координаты (таблица 2).



Рис 1. Внешний вид навигационной системы «КомпаНав-2»

Таблица 1

#### Эксплуатационные характеристики навигационной системы «КомпаНав-2»

Параметр	Значение
Частота выдачи данных	50 Гц
Диапазон рабочих температур	-40...+60°C
Напряжение питания	=12...30 В
Потребляемая мощность	1,5 Вт
Размеры	125x80x57 мм
Вес	< 0,6 кг

**Точностные характеристики навигационной системы «КомпаНав-2»**

Параметр	Режим работы системы	
	Интегрированный с СНС	Автономный в течении 5 минут
Погрешность углов крена и тангажа, $1\sigma$	0,3 °	0,4 °
Погрешность углов курсв, $1\sigma$	0,5 °	0,7 °
Погрешность путевой скорости, $1\sigma$	0,2 м/с	5 м/с
Погрешность вертикальной скорости, $1\sigma$	0,25 м/с	0,3 м/с
Погрешность координат, $1\sigma$	6 м	300 м

Во время проведения процедуры калибровки навигационная система была расположена в специализированной температурной камере, способной поддерживать заданную температуру. Навигационная система не подвергалась никаким механическим воздействиям и перемещениям с целью использования принципа независимости внешних сигналов, действующих на датчики первичной информации.

В процессе температурной калибровки происходило плавное увеличение внутренней температуры камеры от  $-40\text{ °C}$  до  $+60\text{ °C}$ , в процессе которого сигналы с датчиков первичной информации и датчиков температур сохранялись на персональный компьютер, подключенный к навигационной системе.

**Результаты испытаний**

Сохраненные в процессе проведения испытаний данные были обработаны в соответствии с описанной выше методикой. В качестве аппроксимирующей кривой для всех датчиков первичной информации была выбрана кривая третьего порядка. Ниже

представлены графики сохраненных в процессе испытаний данных, а также графики рассчитанных кривых аппроксимации.

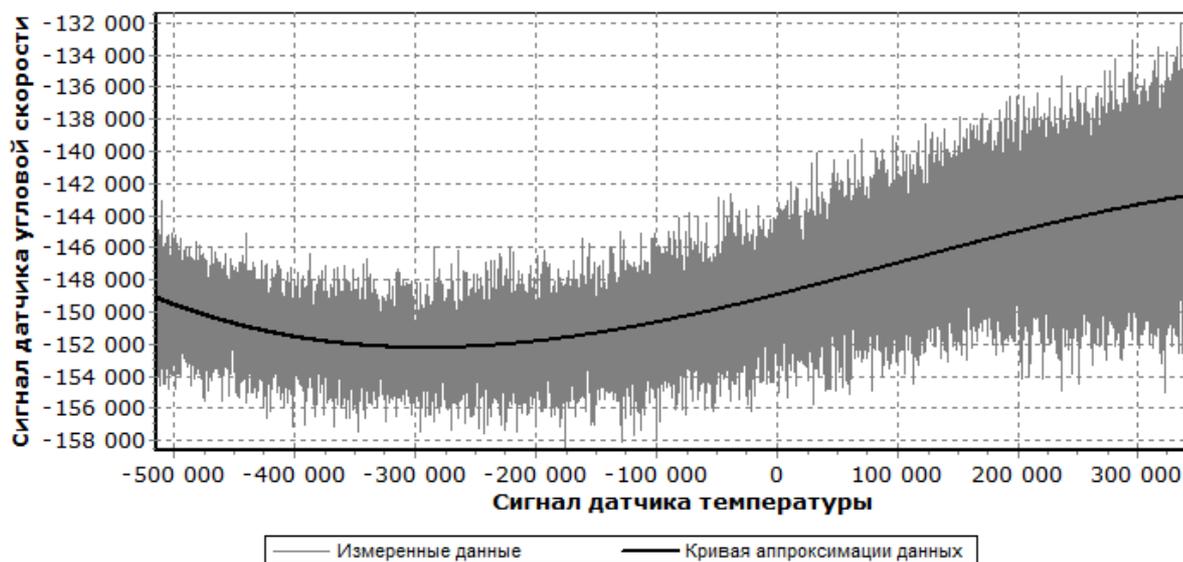


Рис 2. Аппроксимация третьим порядком температурной зависимости сигнала микромеханического датчика угловой скорости ADXRS300 фирмы Analog Devices при его разогреве от  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

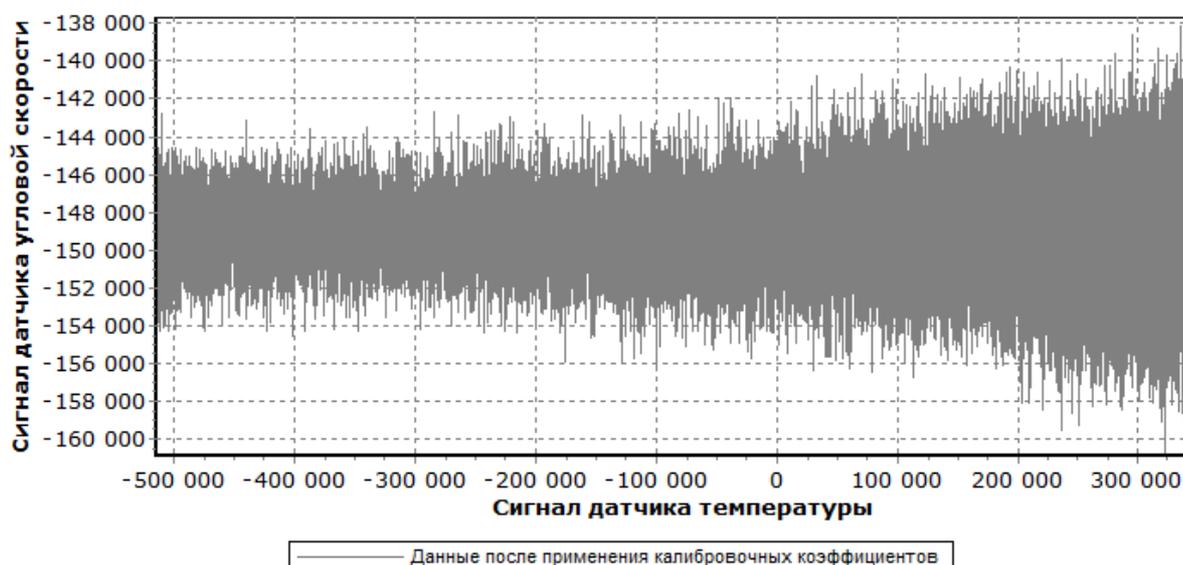


Рис 3. Результат устранения температурной зависимости сигнала микромеханического датчика угловой скорости ADXRS300 фирмы Analog Devices при его разогреве от  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Рис 4. Аппроксимация третьим порядком температурной зависимости сигнала микромеханического датчика линейного ускорения ADXL210 фирмы Analog Devices при его разогреве от  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

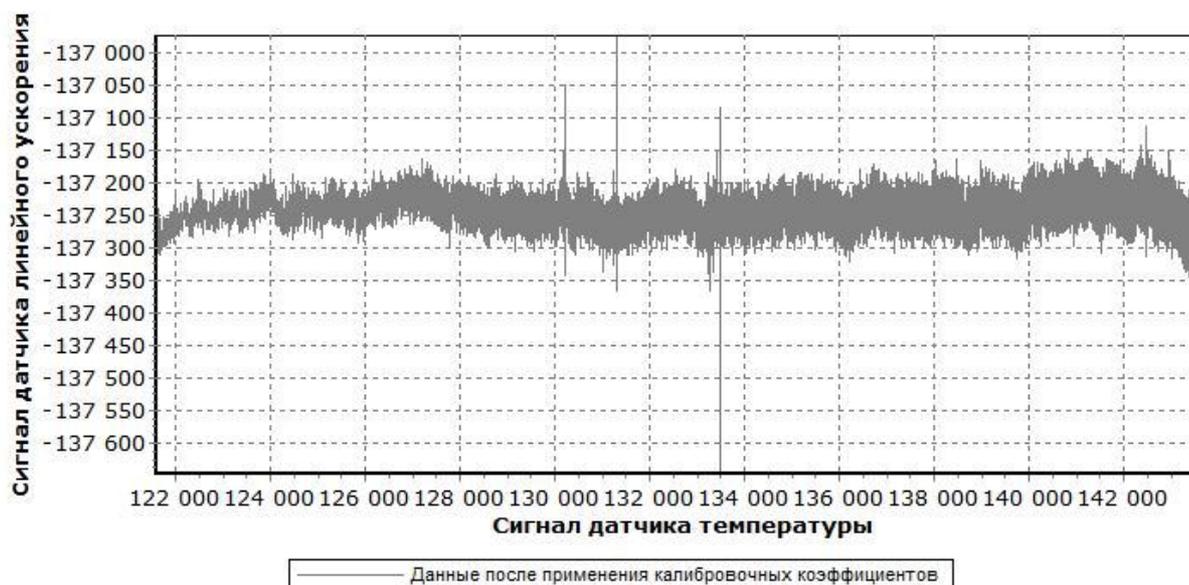


Рис 5. Результат устранения температурной зависимости сигнала микромеханического датчика линейного ускорения ADXL210 фирмы Analog Devices при его разогреве от  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

## **Заключение**

Предложенный выше метод температурной калибровки хорошо зарекомендовал себя в процессе натурных испытаний навигационной системы «КомпаНав-2». Рассчитанные коэффициенты аппроксимирующих кривых третьего порядка позволили повысить стабильность выходных показаний навигационной системы в заявленном температурном диапазоне ее эксплуатации и увеличить точность системы в целом.

Описанный в статье способ температурной калибровки прост, нагляден, гибок, не требует сохранения в память навигационной системы большого числа калибровочных коэффициентов, однако требует в процессе своего использования специализированного оборудования.

Однако данный способ весьма затруднителен в случае описания периодических функций или функций, имеющих большое число излома. Для подобного числа кривых возможно предложить иные способы определения калибровочных коэффициентов датчиков первичной информации, основанные на разбиении неизвестной кривой на отдельные участки и аппроксимации каждого из участков в отдельности.

## **Список используемой литературы:**

1. Техническое описание навигационной системы «Компанав-2» // Интегрированные навигационные системы – ТеКнол. URL <http://teknol.ru/pdf/CN2-TO.pdf> (дата обращения 19.01.2011)
3. Численные методы анализа /Б. П. Демидович [и др.] М.: Наука, 1967. 368 с.
4. Шор Я. Б., Статистические методы анализа и контроля качества и надежности. М.:Госэнергоиздат, 1962. с. 552.

5. ADXL210 Dual-Axis Accelerometer Data Sheet // Analog Devices | Mixed-signal and Digital Signal Processing ICs. URL [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets\\_obsolete/OBSOLETE%20WATERMARK/ADXL210.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets_obsolete/OBSOLETE%20WATERMARK/ADXL210.pdf) (дата обращения 19.01.2011)
6. ADXRS300 Single Chip Yaw Rate Gyro with Signal Conditioning // Analog Devices | Mixed-signal and Digital Signal Processing ICs. URL <http://www.analog.com/en/sensors/inertial-sensors/adxrs300/products/product.html> (дата обращения 19.01.2011)
7. *Salychev O. S.* Applied Inertial Navigation: Problems and Solutions. М.: BMSTU Press, 2004. – 304 p.