САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
SAMARA UNIVERSITY

Институт авиационной и ракетно-космической техники
Межвузовская кафедра космических исследований

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

Методика калибровки магнитометрических измерительных систем наноспутника SamSat-ION

по направлению подготовки 24.04.01 Ракетные комплексы и космонавтика

(уровень магистратуры)

направление (профиль) «Перспективные космические технологии и эксперименты в космосе»

Студент группы 1233-240401D
Соболев Д.Д.
Руководитель: д.т.н., профессор Белоконов И.В.

Самара
27.06.2022г.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Цель: разработать методику калибровки магнитометрических измерительных средств наноспутника SamSat-ION.

Объект исследования: модель ошибок магнитометрических измерительных средств наноспутника SamSat-ION.

Предмет исследования: процесс калибровки магнитометрических измерительных средств.

Задачи работы:

1) Исследовать влияние магнитных катушек на измерения выносного магнитометра;
2) Разработать и верифицировать алгоритм согласования измерений магнитометров, расположенных на бортовом компьютере и на выносной штанге;
3) Разработать программу и методику наземных испытаний магнитометрических измерительных средств наноспутника SamSat-ION для проведения температурной калибровки в статичных положениях и отработать на инженерных моделях бортового компьютера и платы выносного магнитометра;
4) Исследовать возможность самокалибровки магнитометров MMC5883 во время орбитального движения наноспутника;
5) Разработать схему формирования магнитометрических измерений для системы ориентации и стабилизации наноспутника SamSat-ION.

Основные характеристики миссии SamSat-ION:

- тип орбиты: Солнечно-синхронная;
- наклонение: 97,5°;
- высота: 550 км;
- способ выведения: попутным запуском, отделение из ТПК.

Научные и технологические задачи SamSat-ION:

- изучение верхней ионосферы Земли;
- изучение особенностей динамики движения НС;
- верификация алгоритмов ориентации и стабилизации;
- отработка технологии раскрытия трансформируемых конструкций на борту НС;
- отработка технологии высокоточной пространственно-временной привязки научных измерений;
- верификация алгоритмов предварительной обработки научной информации на борту НС.

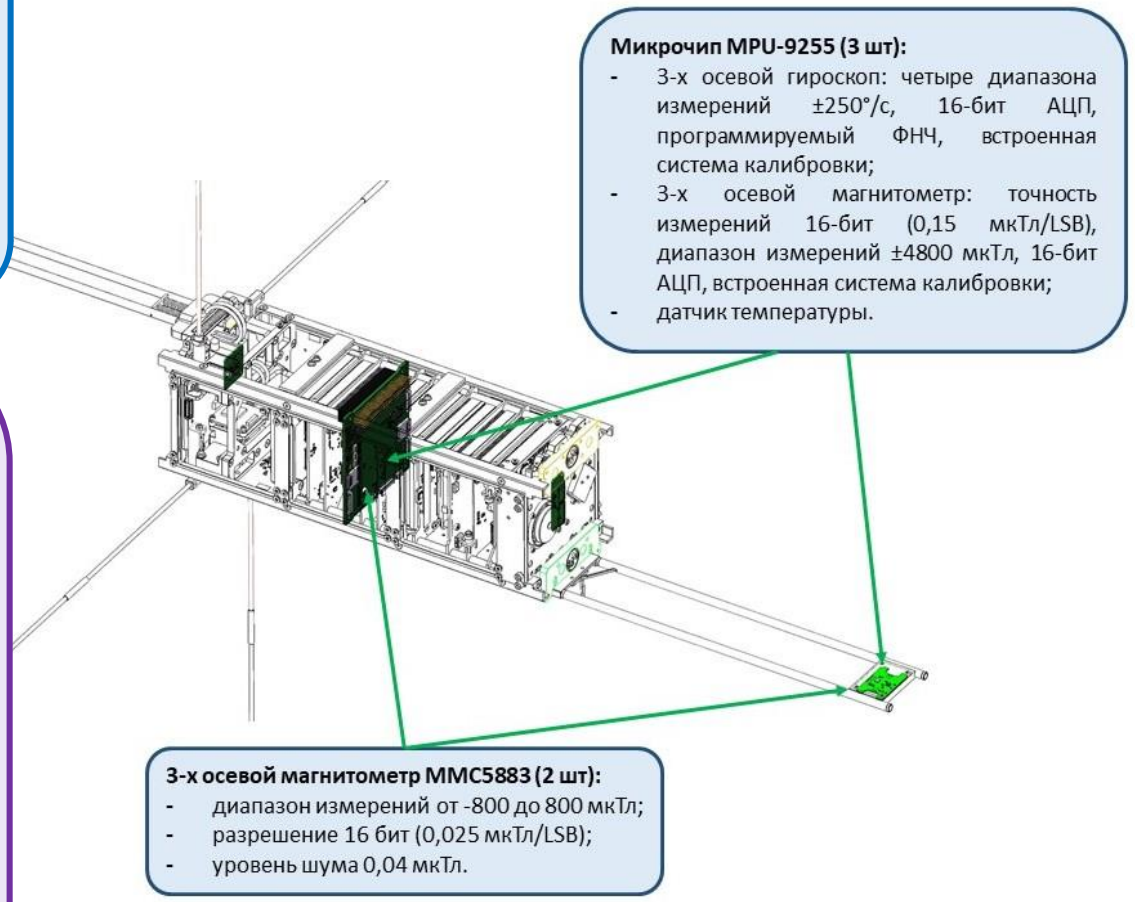


Рис.1 – Состав магнитометрической измерительной системы НС SamSat-ION

РАСПОЛОЖЕНИЕ МАГНИТОМЕТРОВ НА ПЛАТАХ

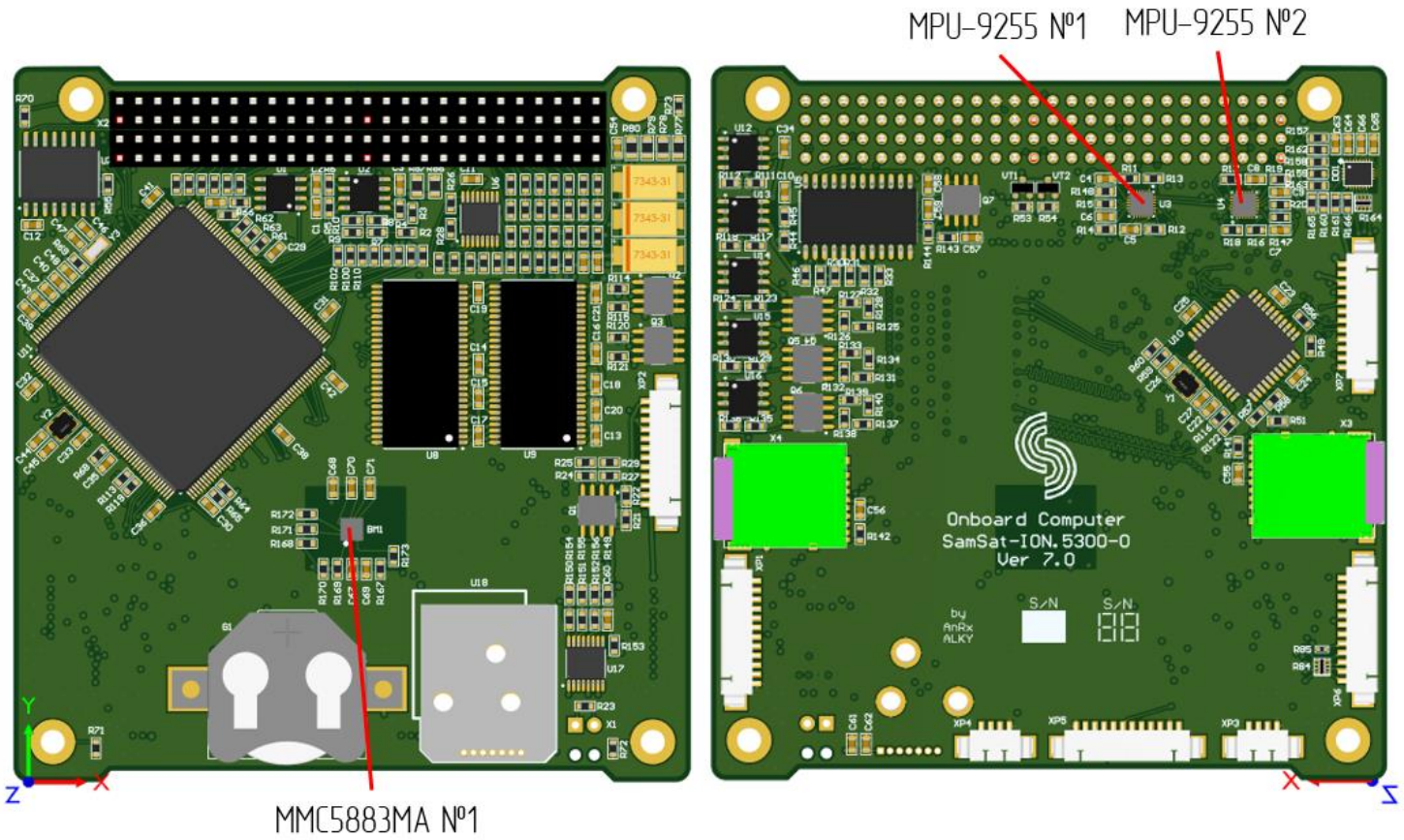


Рис.2 – Бортовой компьютер

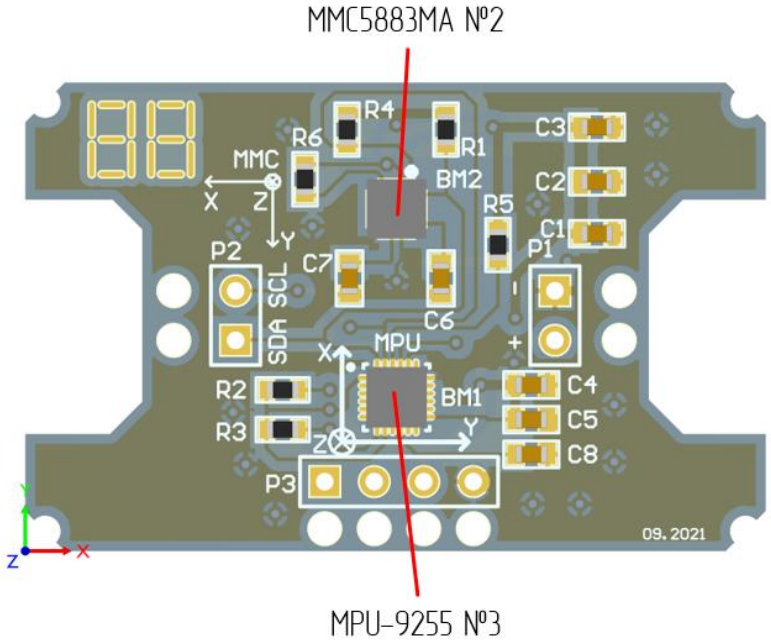


Рис.3 – Плата выносного магнитометра

АКТУАЛЬНОСТЬ

Название работы	Авторы	Краткое описание
Методика калибровки магнитометра на этапе наземной диагностики систем космического аппарата	Акимов И.О., Илюхин С.Н., Ивлев Н.А., Колосов Г.Е.	• изложены эмпирические методики температурной калибровки и учета основных погрешностей магнитометров; • сформирована методика температурной калибровки; • на основе разработанных методик выполнена калибровка магнитометра и приведены соответствующие результаты.
Проверка согласованности данных измерений магнитометров, установленных на борту ИСЗ	Панкратов В.А., Сазонов В.В.	• описана методика проверки геометрической согласованности измерений двух магнитометров; • приведены примеры применения методики при обработке данных, полученных аппаратурой «Мираж» на спутнике Фотон М-2.
In-Flight Magnetometer Calibration with Temperature Compensation for PHOENIX CubeSat	Ming-Yang Hong	• предложена модель магнитометра, зависящая от температуры, и принят метод оптимизации роя частиц при оценке параметров калибровки; • предлагаемая модель и метод проверены и протестированы с использованием полетных данных от PHOENIX
Fast Thermal Calibration of Low-Grade Inertial Sensors and Inertial Measurement Units	Xiaoji Niu, You Li, Hongping Zhang, Qingjiang Wang, Yalong Ban	• предложена методика температурной калибровки гироскопов и акселерометров с восьмиступенчатой схемой установки; • реальные калибровочные испытания показали, что предложенный метод подходит для низкокачественных датчиков, для лабораторной и заводской калибровки.

ВЛИЯНИЕ КАТУШЕК НА ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТОМЕТРОВ

Точка 1 – на расстоянии 5 см от магнитометра
Точка 3 – на расстоянии 15 см от магнитометра
Точка 6 – на расстоянии 30 см от магнитометра (длина выносной штанги)

Средние абсолютные и относительные погрешности для точки 6 при максимальном токе 0,1 А:
$a = 167{,}87$ нТл, $\varepsilon = 0{,}33\%$ – без солнечной панели;
$a = 307{,}57$ нТл, $\varepsilon = 0{,}61\%$ – с солнечной панелью;

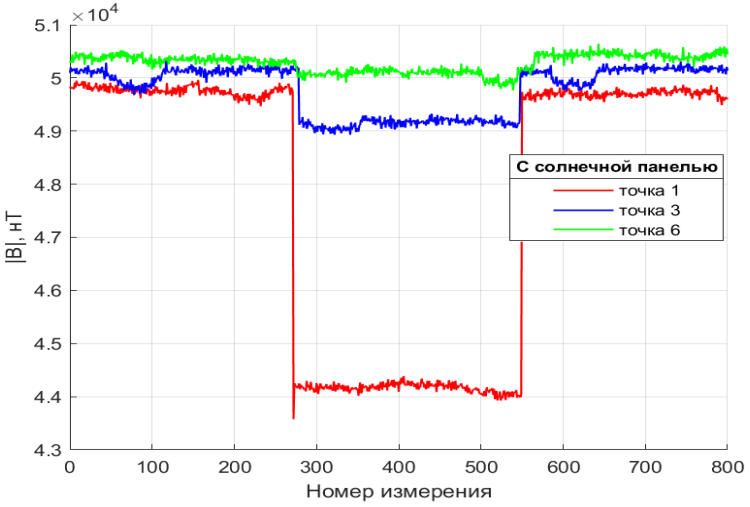


Рис.5 – Модуль измерений магнитометра с установленной солнечной панелью на плату катушки в точках №1,3 и 6

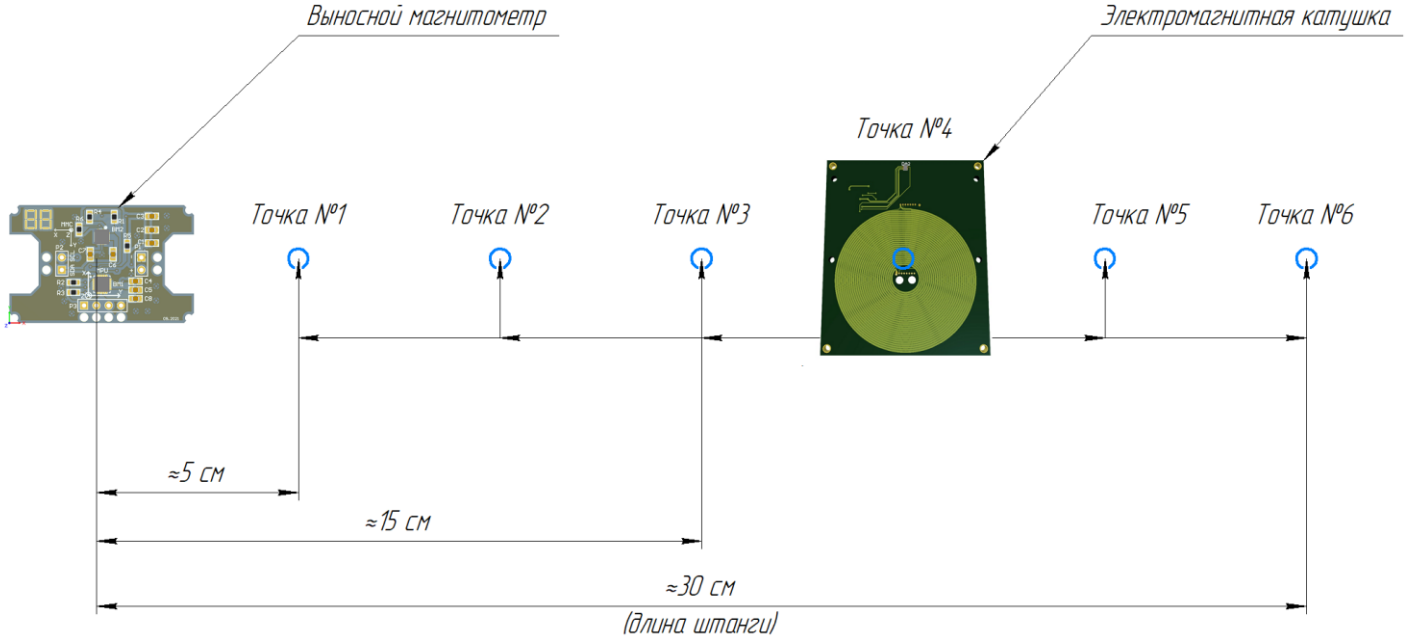


Рис.4 – Схема расположения катушки при измерении магнитометром

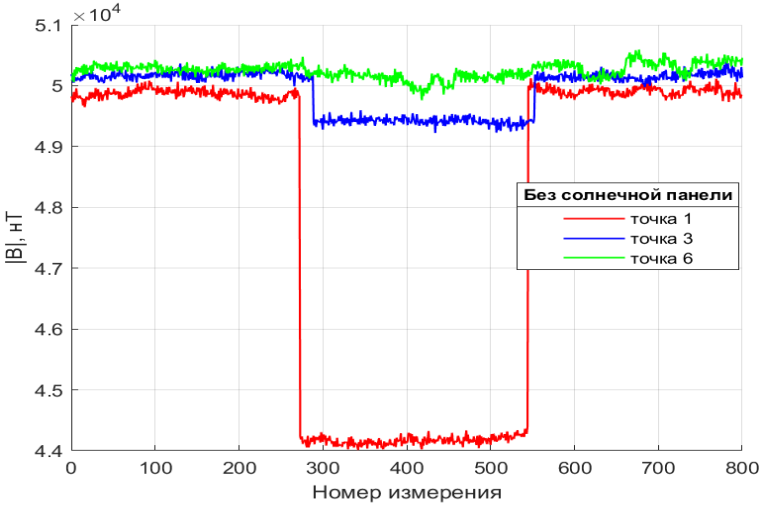


Рис.6 – Модуль измерений магнитометра без установленной солнечной панели на плату катушки в точках №1,3 и 6

ГЕОМЕТРИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ МАГНИТОМЕТРОВ

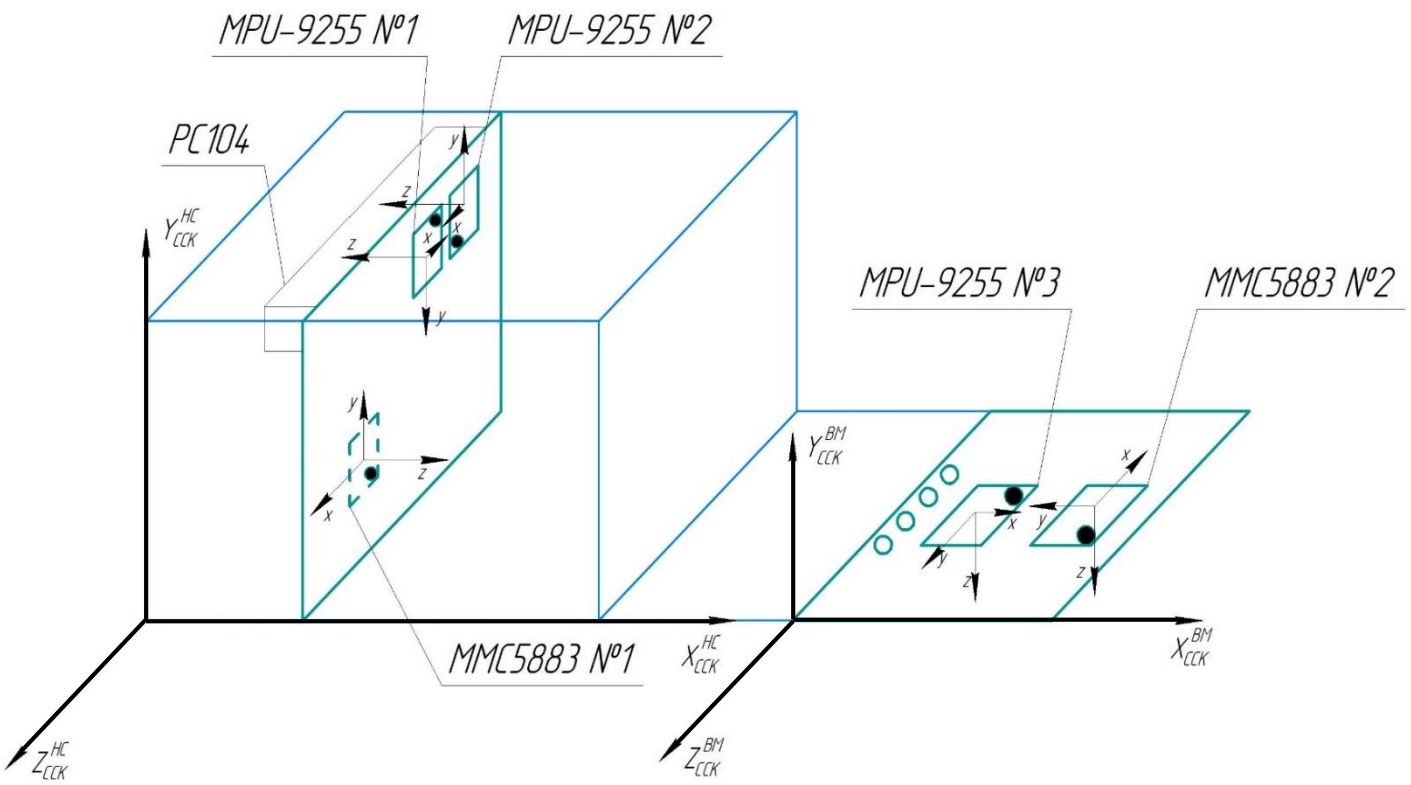


Рис.7 – Схема расположения датчиков в составе наноспутника и их системы координат

Связь между осями измерений и связанными системами координат наноспутника и выносной штанги

(1)

MMC5883 №1	MPU–9255 №1	MPU–9255 №2
$\begin{cases} X_{MMC1}^{\text{ССК НС}} = Z_{MMC1} \\ Y_{MMC1}^{\text{ССК НС}} = Y_{MMC1} \\ Z_{MMC1}^{\text{ССК НС}} = X_{MMC1} \end{cases}$	$\begin{cases} X_{MPU1}^{\text{ССК НС}} = -Z_{MPU1} \\ Y_{MPU1}^{\text{ССК НС}} = -Y_{MPU1} \\ Z_{MPU1}^{\text{ССК НС}} = -X_{MPU1} \end{cases}$	$\begin{cases} X_{MPU2}^{\text{ССК НС}} = -Z_{MPU2} \\ Y_{MPU2}^{\text{ССК НС}} = Y_{MPU2} \\ Z_{MPU2}^{\text{ССК НС}} = X_{MPU2} \end{cases}$

MMC5883 №2	MPU–9255 №3
$\begin{cases} X_{MMC2}^{\text{ССК ВМ}} = -Y_{MMC2} \\ Y_{MMC2}^{\text{ССК ВМ}} = -Z_{MMC2} \\ Z_{MMC2}^{\text{ССК ВМ}} = -X_{MMC2} \end{cases}$	$\begin{cases} X_{MPU3}^{\text{ССК ВМ}} = -Y_{MPU3} \\ Y_{MPU3}^{\text{ССК ВМ}} = -Z_{MPU3} \\ Z_{MPU3}^{\text{ССК ВМ}} = X_{MPU3} \end{cases}$

СОГЛАСОВАНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТОМЕТРОВ

(2) $$B_{MMC1}^{(n)} \approx H \cdot B_{MMC2}^{(n)},^{*} \qquad n = \overline{1, N}$$

(3) $$\Phi = \sum_{n=1}^{N} \left(B_{MMC1}^{(n)} - H \cdot B_{MMC2}^{(n)} \right)^2 \to \min_{H}$$

где $B_{MMC1}^{(n)}$ – вектор-столбец откалиброванных проекций вектора магнитной индукции, измеренные магнитометром MMC5883 №1 на бортовом компьютере и переведенные в ССК НС по (1);

$B_{MMC2}^{(n)}$ – вектор-столбец откалиброванных проекций вектора магнитной индукции, измеренные магнитометром MMC5883 №2 на плате выносного магнитометра и переведенные в ССК ВМ по (1);

$H = [h_{ij}]_{i,j=1,2,3}$ –ортогональная матрица перехода от ССК ВМ к ССК НС;

N – количество измерений.

Рассматриваются магнитометры MMC5883 №1 на бортовом компьютере и MMC5883 №2 на плате выносного магнетометра

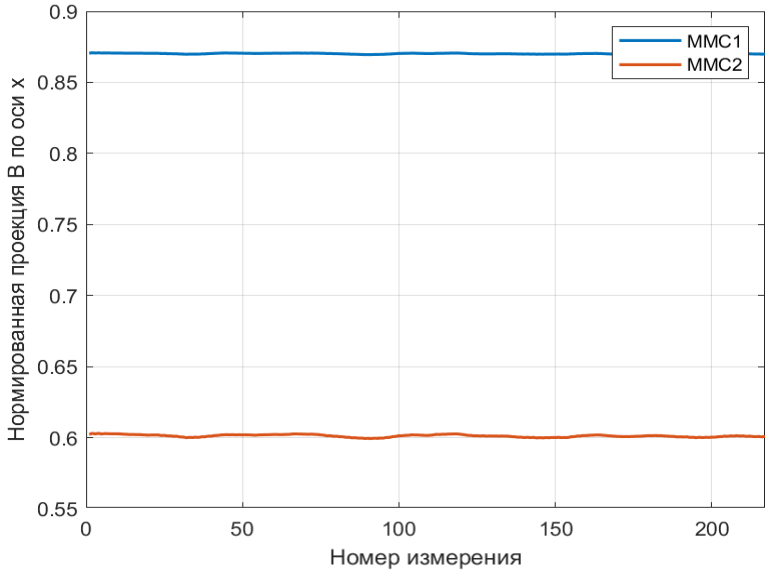


Рис.8 – Проекции измерений по оси x до применения алгоритма согласованности

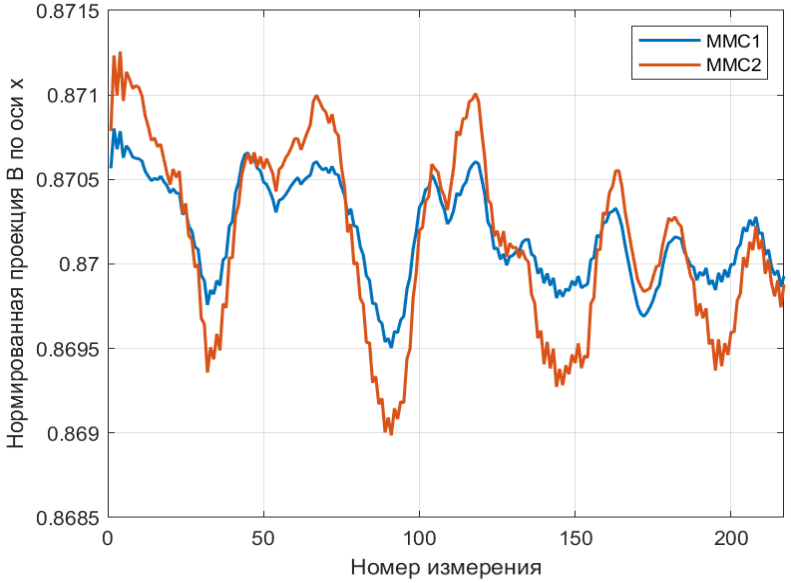


Рис.9 – Проекции измерений по оси x после применения алгоритма согласованности

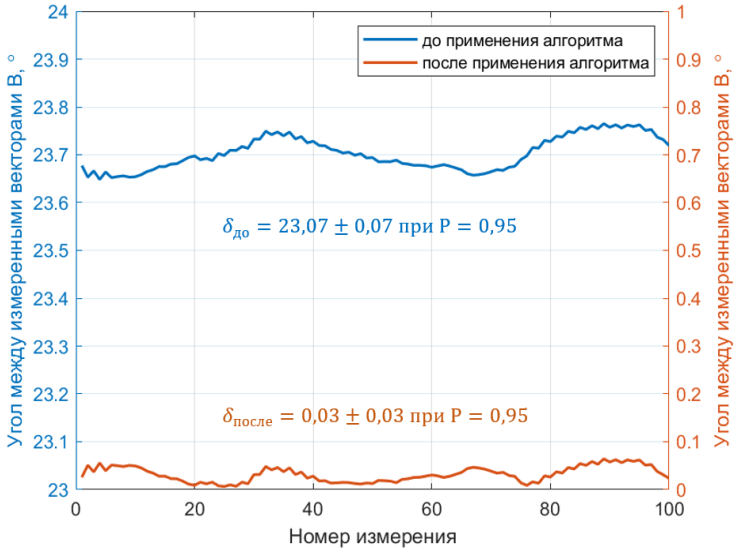


Рис.10 – Угол между векторами, измеренными двумя датчиками, до и после применения алгоритма

*Панкратов В.А., Сазонов В.В. Проверка согласованности данных измерений магнитометров, установленных на борту ИСЗ // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2010. № 43. 16 с.

САМОКАЛИБРОВКА МАГНИТОМЕТРА MMC5883 ПРИ ОРБИТАЛЬНОМ ДВИЖЕНИИ НАНОСПУТНИКА

Set/Reset → Измерение → Чтение данных

1 мс; t_{TM}

$$t_{TM}^{min} = \begin{cases} 10\ \text{мс} \\ 5\ \text{мс} \\ 2{,}5\ \text{мс} \\ 1{,}6\ \text{мс} \end{cases} \Rightarrow t_{\text{задержки}}$$

$$SET\ (\varphi = 0): Output1 = B_{ref} + offsets_{ref} \quad (4)$$

$$RESET\ (\varphi = \omega t_{\text{задержки}}): Output2 = -B' + offsets = -B_{ref}\cos\varphi + offsets_{ref}$$

$$offsets_{error} = \frac{Output1 + Output2}{2}$$

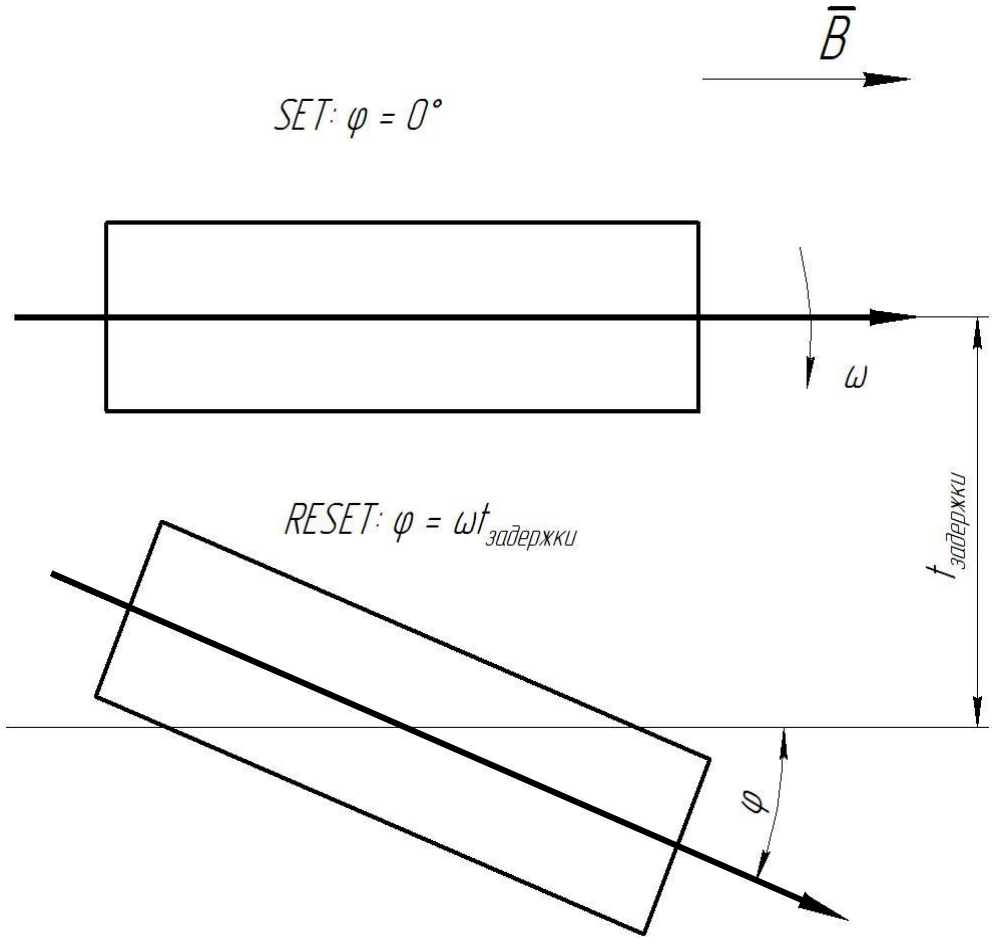


Рис.11 – Иллюстрация плоского углового вращения НС

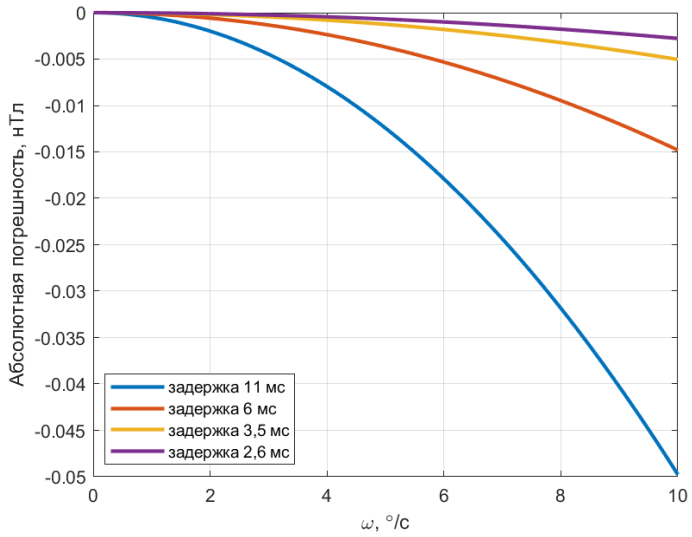


Рис.12 – Абсолютная погрешность определения смещения нуля средствами датчика

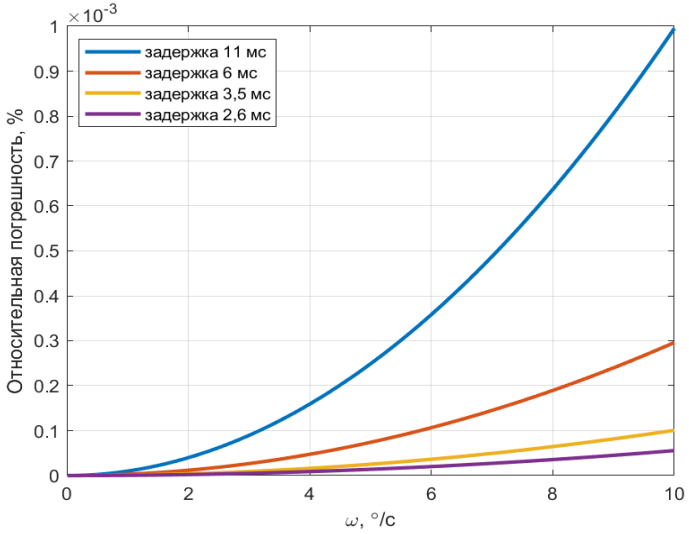


Рис.13 – Относительная погрешность определения смещения нуля средствами датчика

Связь измерений датчика $\tilde{B}$ и откалиброванных значений измеряемой величины B_{calib} выражается следующим матричным уравнением при постоянной температуре:

$$B_{calib} = M \cdot (\tilde{B} - b). \quad (5)$$

Функционал для минимизации, имеющий смысл суммы квадратов алгебраических расстояний от точек измерений магнитометра до эллипсоида

$$\Phi = \|D^T v\|^2 = (D^T v)^T (D^T v) \to \min_v \quad (6)$$

Калибровочные коэффициенты находят из параметров эллипсоида

$$b_o = -A^{-1}n, \qquad M = \frac{|\tilde{B}'|}{\sqrt{n^T M^{-1} n - d}} A^{\frac{1}{2}}, \qquad A = \begin{bmatrix} a & h & g \\ h & b & f \\ g & f & c \end{bmatrix}, \qquad n = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}$$

где $M = [m_{ij}]_{i,j=1,2,3}$ – матрица комплексной ошибки 3×3, учитывающая совместное влияние ошибок масштабирования, неортогональности и возмущения, вносимого магнитомягкими материалами;

$b = [b_i]_{i=x,y,z}$– комплексный вектор смещения нуля, учитывающий смещение от магнитотвердых материалов и инструментальное смещение нуля;

$v = [a, b, c, f, g, h, p, q, r, d]^T_{10\times1}$ – вектор оцениваемых параметров эллипсоида, входящих в уравнение поверхности;

$D = [X_1, X_2, \dots, X_n]_{10\times n}$ – матрица, составленная из векторов проекций измерений определённым образом;

$X_i = [x_i^2, y_i^2, z_i^2, 2y_iz_i, 2x_iz_i, 2x_iy_i, 2x_i, 2y_i, 2z_i, 1]^T_{10\times1}$ – вектор, составленный из проекций каждой точки измерения.

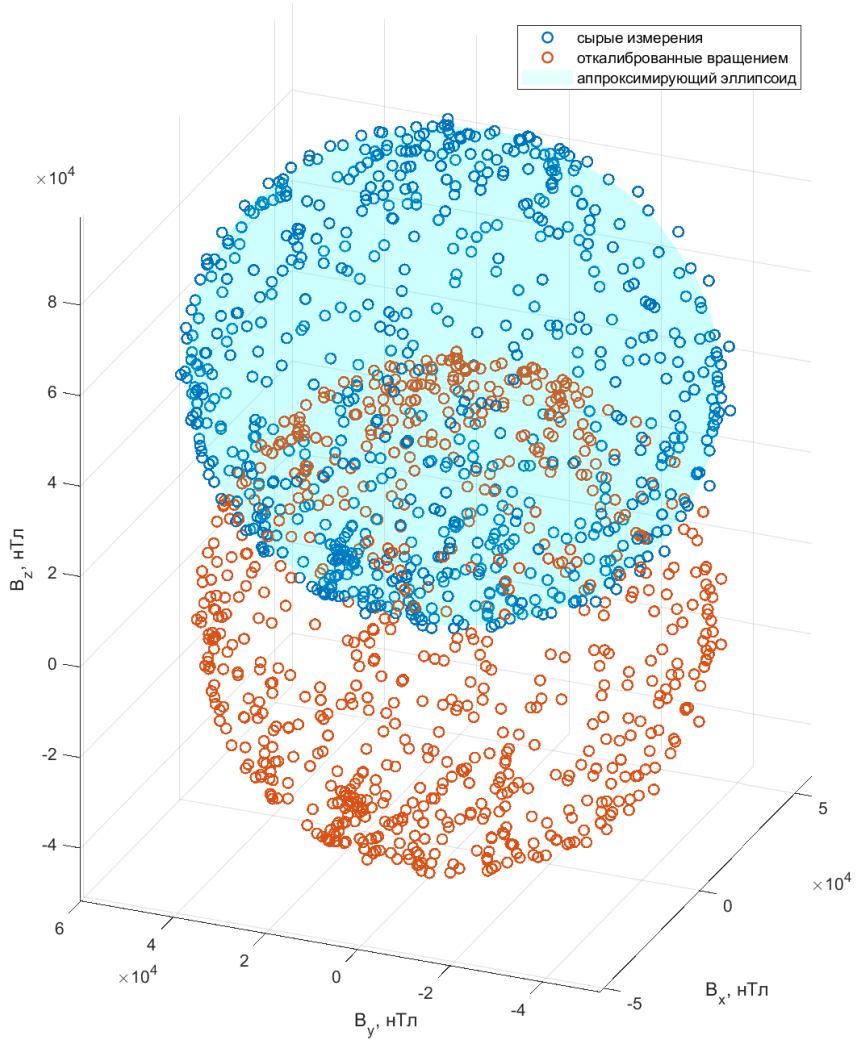


Рис.14 – Пример калибровки вращением для датчика MMC5883

КАЛИБРОВКА МАГНИТОМЕТРОВ В ДВЕНАДЦАТИ ПОЗИЦИЯХ

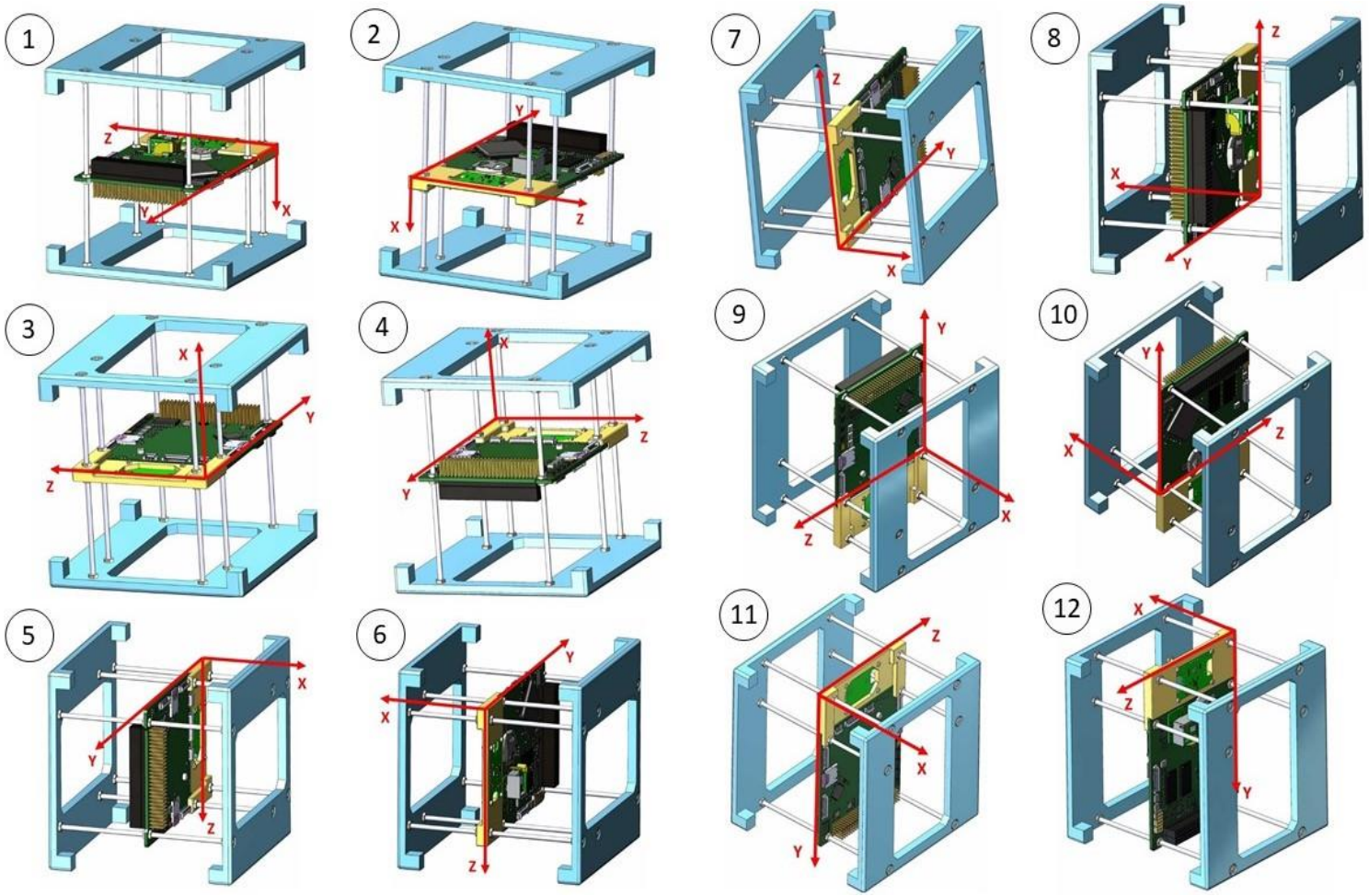


Рис.15 – Пример двенадцати положений объекта испытаний

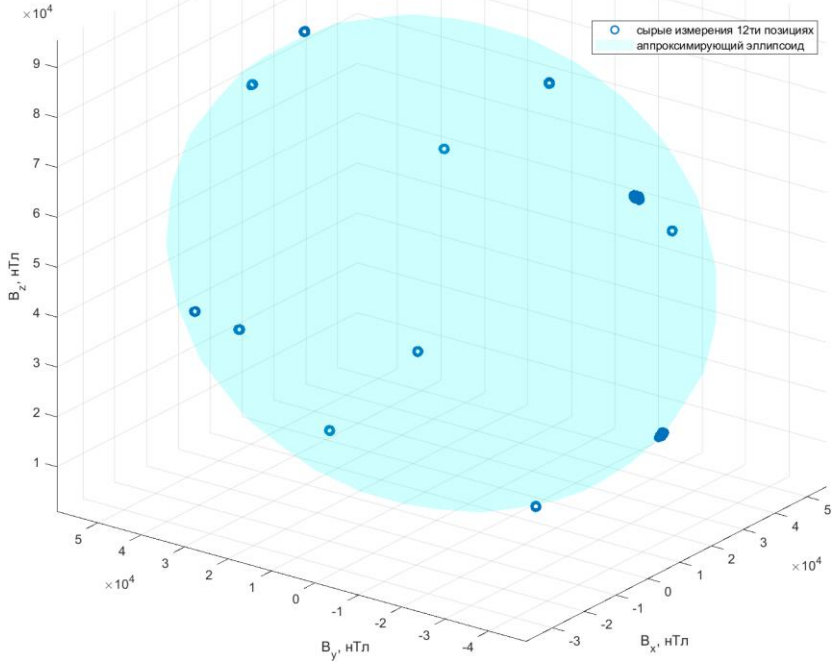


Рис.16 – Пример калибровки в двенадцати положениях для датчика MMC5883

СХЕМА МЕТОДИКИ КАЛИБРОВКИ В ДВЕНАДЦАТИ ПОЗИЦИЯХ

Рис.17 – Схема калибровки магнитометра в двенадцати позициях

Найденные по двум способам калибровочные коэффициенты для датчика MMC5883 №2:

- вращением

$$b_{rot} = \begin{bmatrix} 8830{,}98 \\ 4388{,}71 \\ 4819{,}41 \end{bmatrix}; M_{rot} = \begin{bmatrix} 1{,}0314 & -0{,}0123 & -0{,}0017 \\ -0{,}0123 & 0{,}9349 & -0{,}0041 \\ -0{,}0017 & -0{,}0041 & 1{,}0300 \end{bmatrix}$$

- в двенадцати положениях

$$b_{pos} = \begin{bmatrix} 8936{,}33 \\ 5323{,}08 \\ 4822{,}18 \end{bmatrix}; M_{pos} = \begin{bmatrix} 1{,}0613 & -0{,}0103 & 0{,}0662 \\ -0{,}0103 & 0{,}9273 & -0{,}0010 \\ 0{,}0662 & -0{,}0010 & 1{,}0565 \end{bmatrix}$$

Математическое ожидание и СКО модуля измерений до и после калибровки двумя способами:

	Для модуля сырых измерений	Для модуля измерений, откалиброванных вращением	Для модуля измерений, откалиброванных в 12 положениях
Математическое ожидание, нТл	63845,06	51539,62	52292,39
СКО, нТл	25809,33	571,19	1985,77

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ НАЗЕМНЫХ ИСПЫТАНИЙ

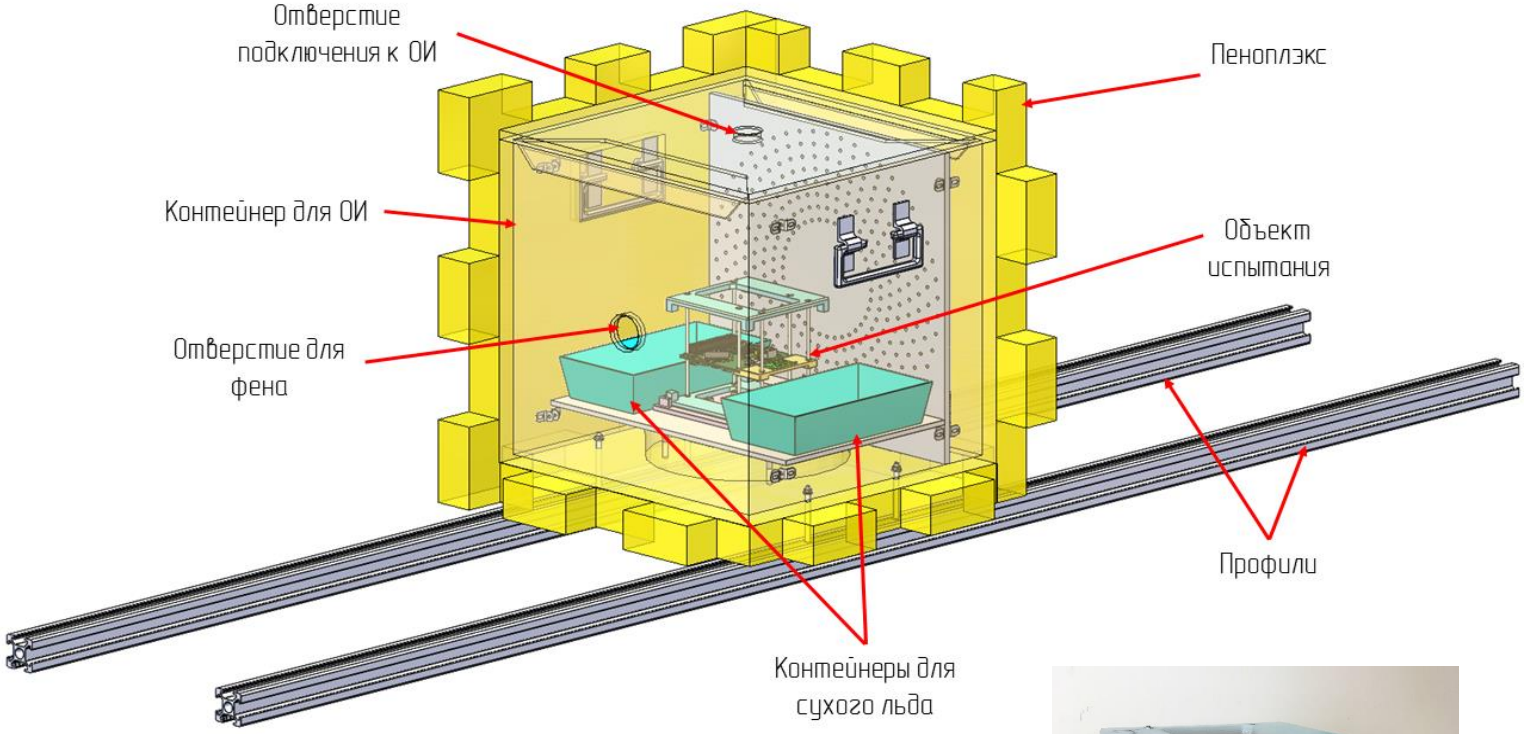
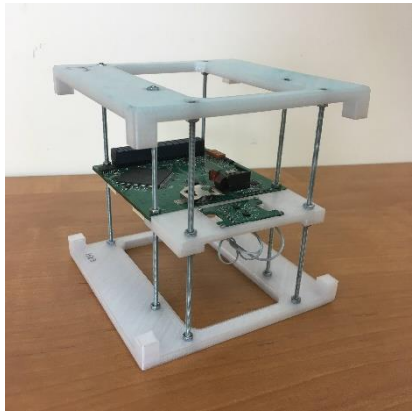


Рис.18 – Экспериментальная установка



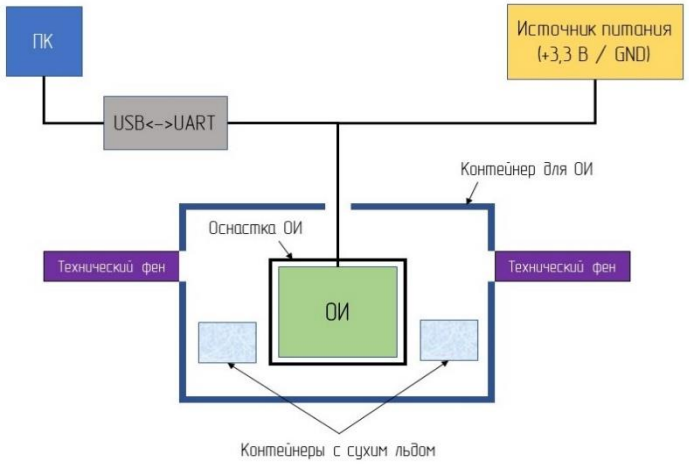


Рис.19 – Схема подключения элементов экспериментальной установки (ПК – персональный компьютер, ОИ – объект испытания, USB/UART – преобразователь для подключения ПК и бортового компьютера)

ТЕМПЕРАТУРНАЯ КАЛИБРОВКА МАГНИТОМЕТРОВ

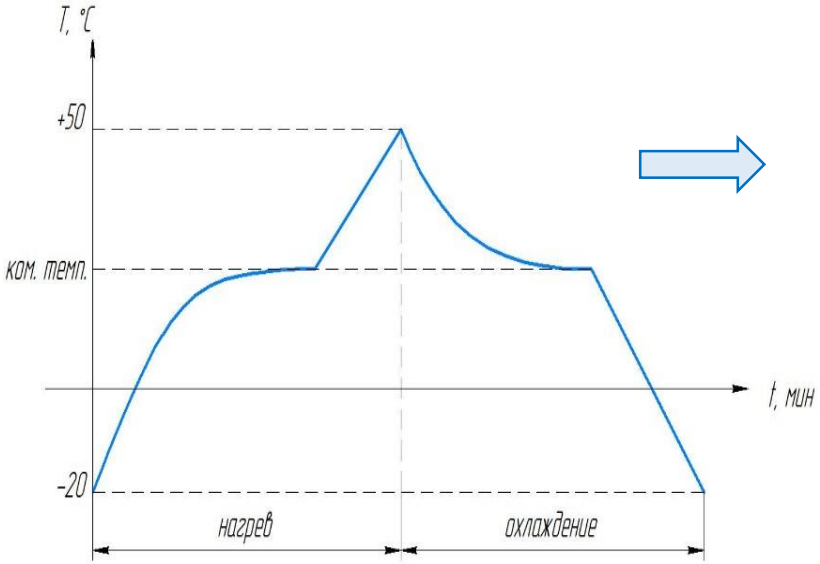


Рис.20 – Теоретический профиль изменения температуры при наземных испытаниях

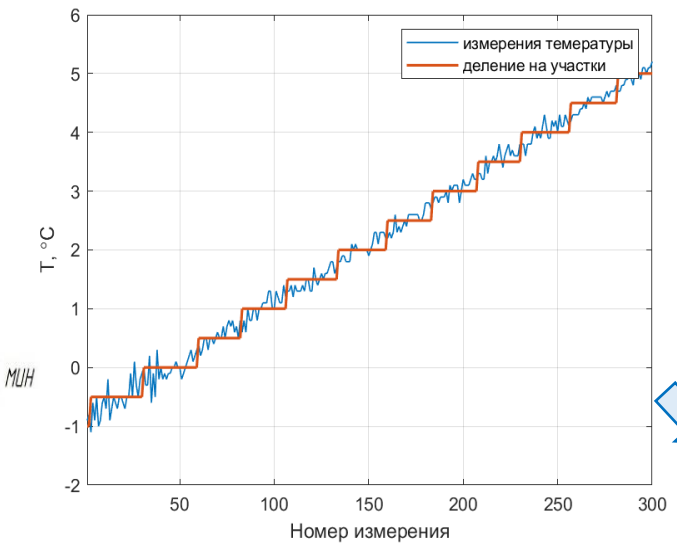


Рис.21 – Пример деления профиля изменения температуры на постоянные участки

Двенадцатипозиционная калибровка при постоянной температуре

$$B_{calib} = M \cdot \left(\tilde{B} - b\right)$$

$$\Phi = \|D^T v\|^2 = (D^T v)^T (D^T v) \to \min_v$$

Калибровочные коэффициенты на каждом участке: b_i и m_{ij}

Коэффициенты полинома A_0, A_1, A_2, A_3

Температурные зависимости калибровочных коэффициентов: $b_i(T)$ и $m_{ij}(T)$

Для определения температурной зависимости калибровочных коэффициентов используется аппроксимация полиномом 3-го порядка:

(7) $$W(T) = A_0 + A_1 T + A_2 T^2 + A_3 T^3$$

где $W(T)$ – значение ошибок датчика;

T – температура датчика;

A_0, A_1, A_2 и A_3 – параметры полинома.

СХЕМА МЕТОДИКИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ КАЛИБРОВКИ

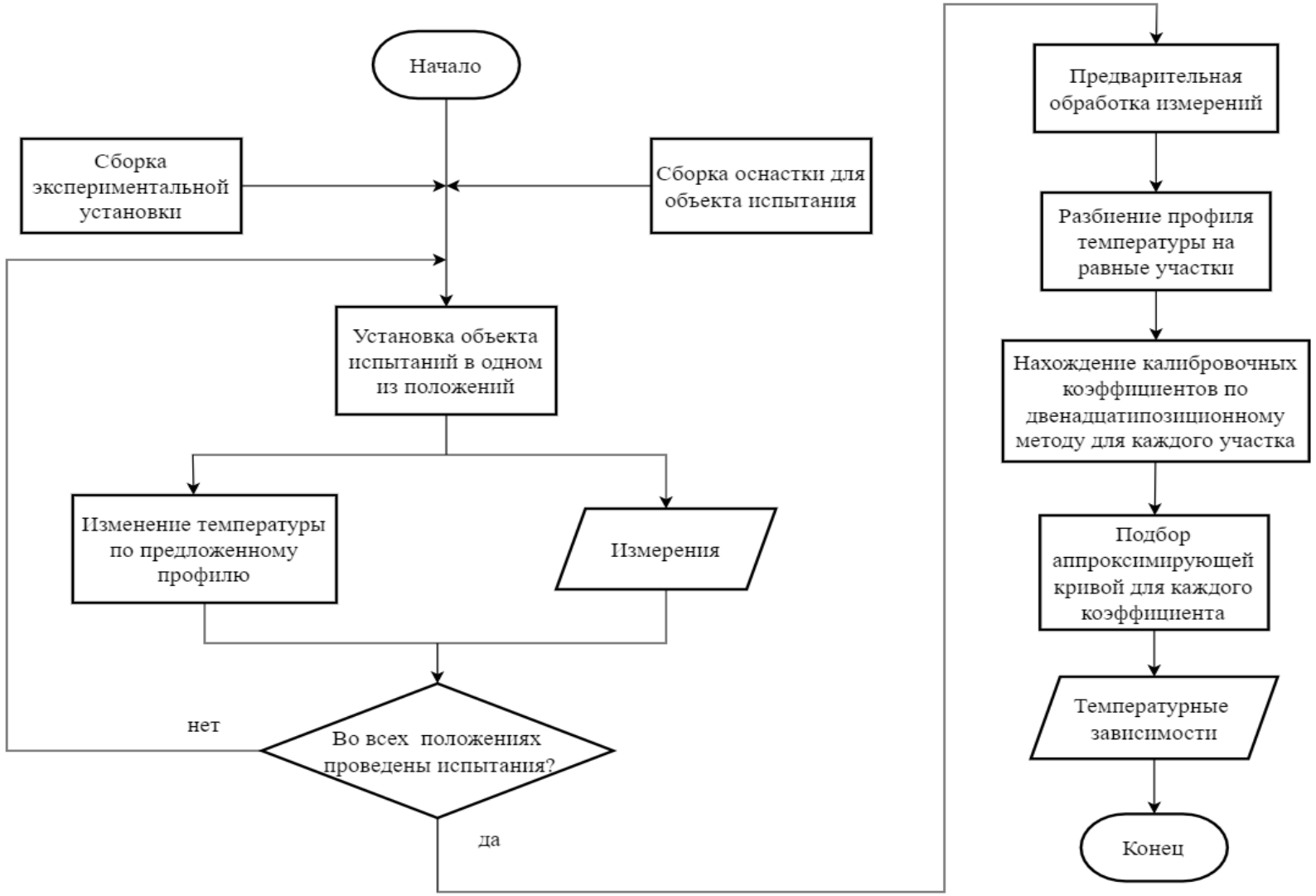


Рис.22 – Схема температурной калибровки

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕМПЕРАТУРНОЙ КАЛИБРОВКИ МАГНИТОМЕТРА MMC5883 №1

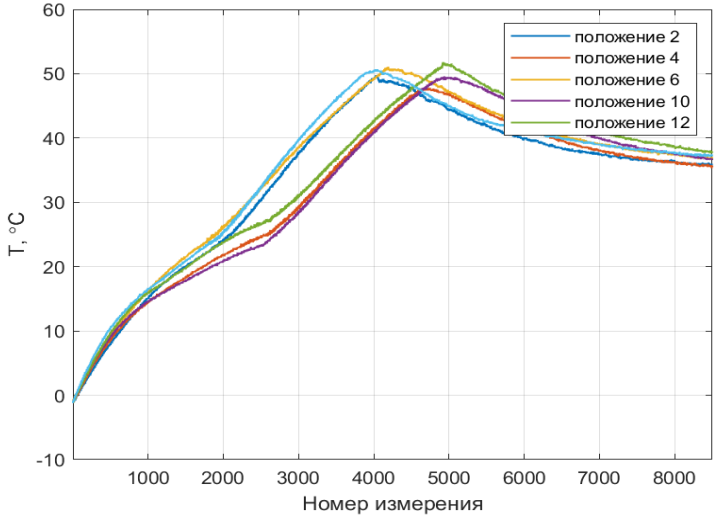


Рис.23 – Пример изменения температуры датчиков во время испытаний в некоторых положениях

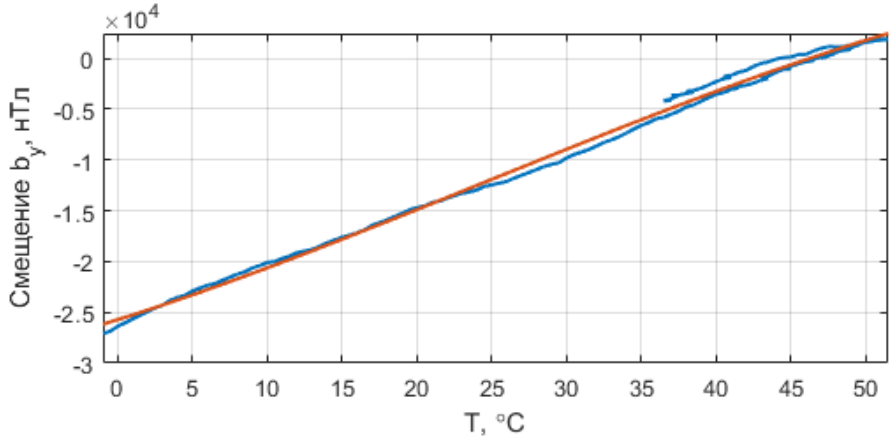


Рис.24 – Температурные зависимости смещений нуля датчика MMC5883 №1

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕМПЕРАТУРНОЙ КАЛИБРОВКИ МАГНИТОМЕТРА MMC5883 №1

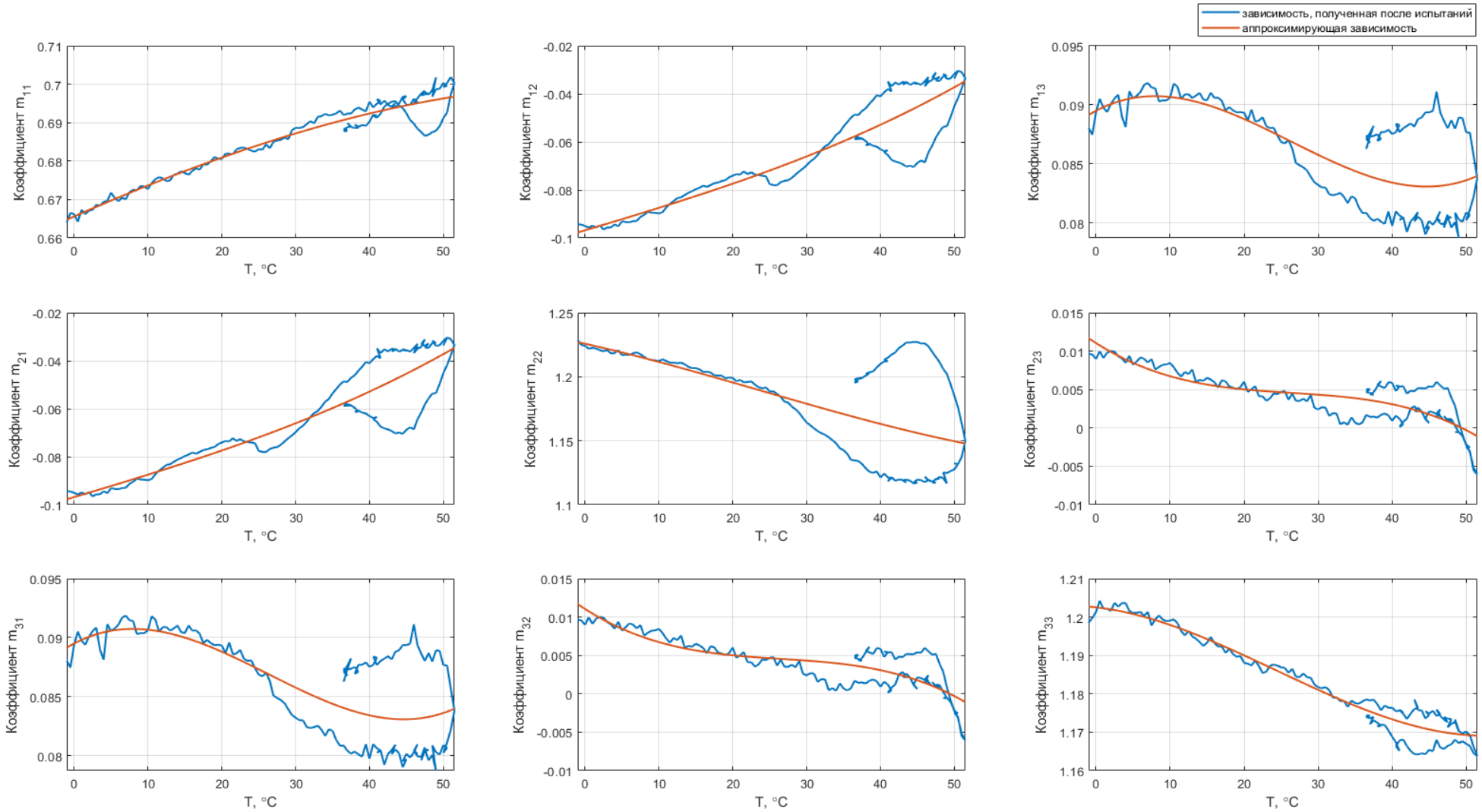


Рис.25 – Температурные зависимости коэффициентов комплексной матрицы ошибок датчика MMC5883 №1

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕМПЕРАТУРНОЙ КАЛИБРОВКИ МАГНИТОМЕТРА MMC5883 №1

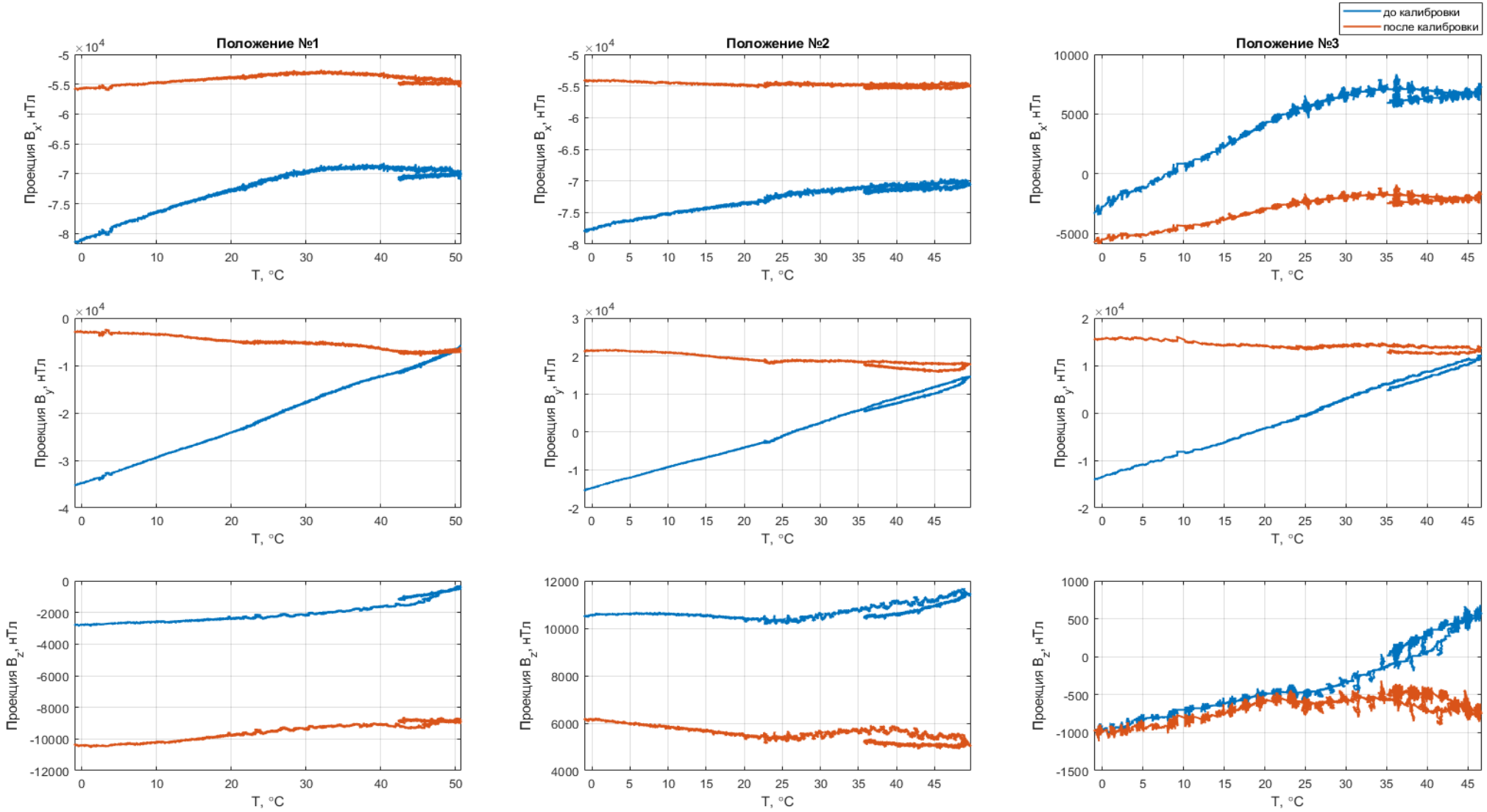


Рис.26 – Температурная калибровка измерений магнитометра MMC5883 №1 в положениях 1-3

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕМПЕРАТУРНОЙ КАЛИБРОВКИ МАГНИТОМЕТРОВ

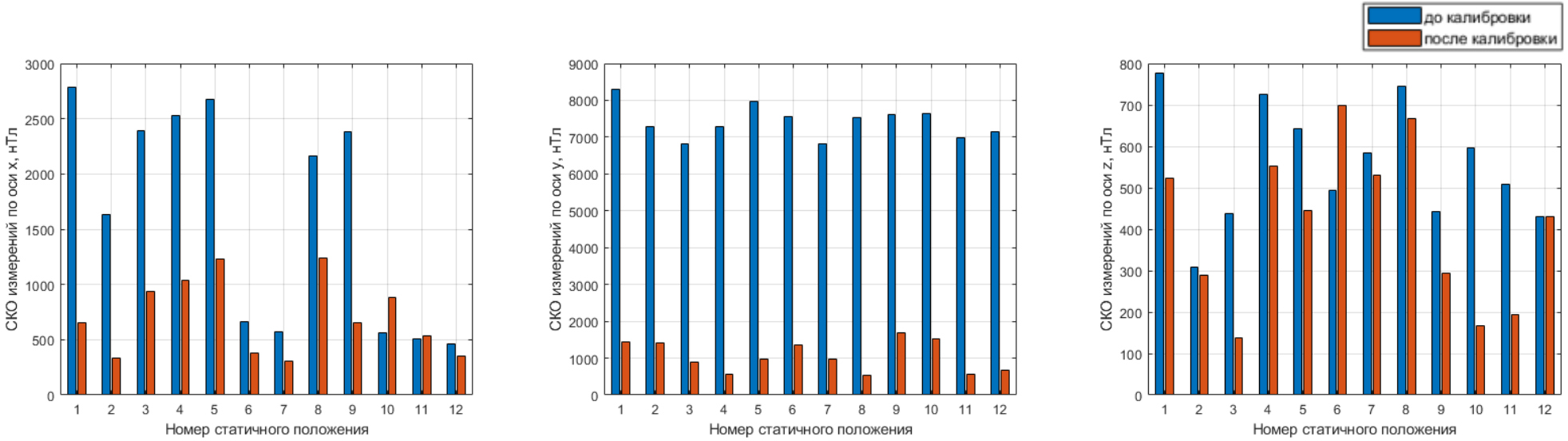


Рис.27 – Столбчатые диаграммы СКО измерений датчика MMC5883 №1

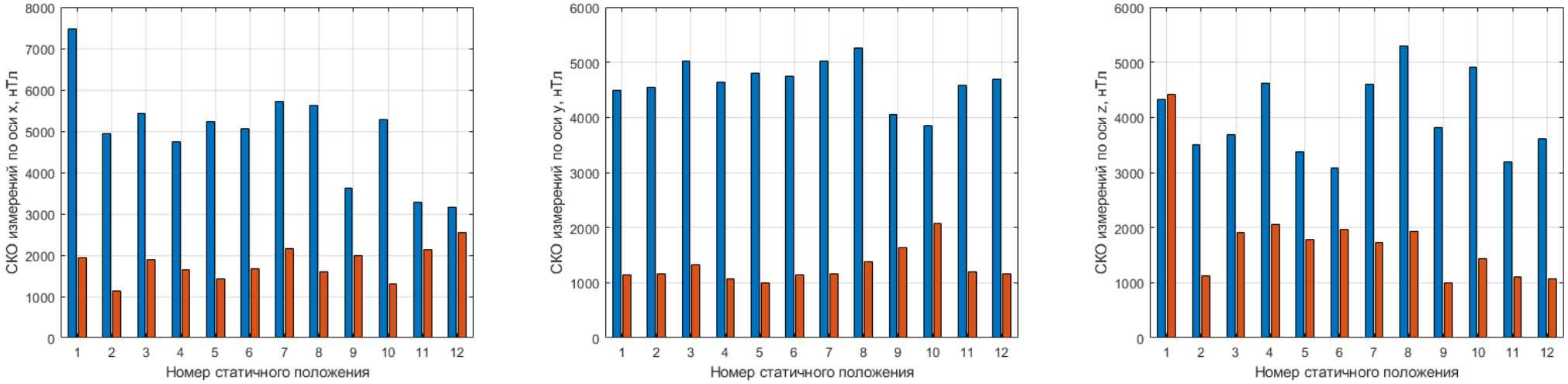


Рис.28 – Столбчатые диаграммы СКО измерений датчика MPU-9255 №1

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕМПЕРАТУРНОЙ КАЛИБРОВКИ МАГНИТОМЕТРОВ

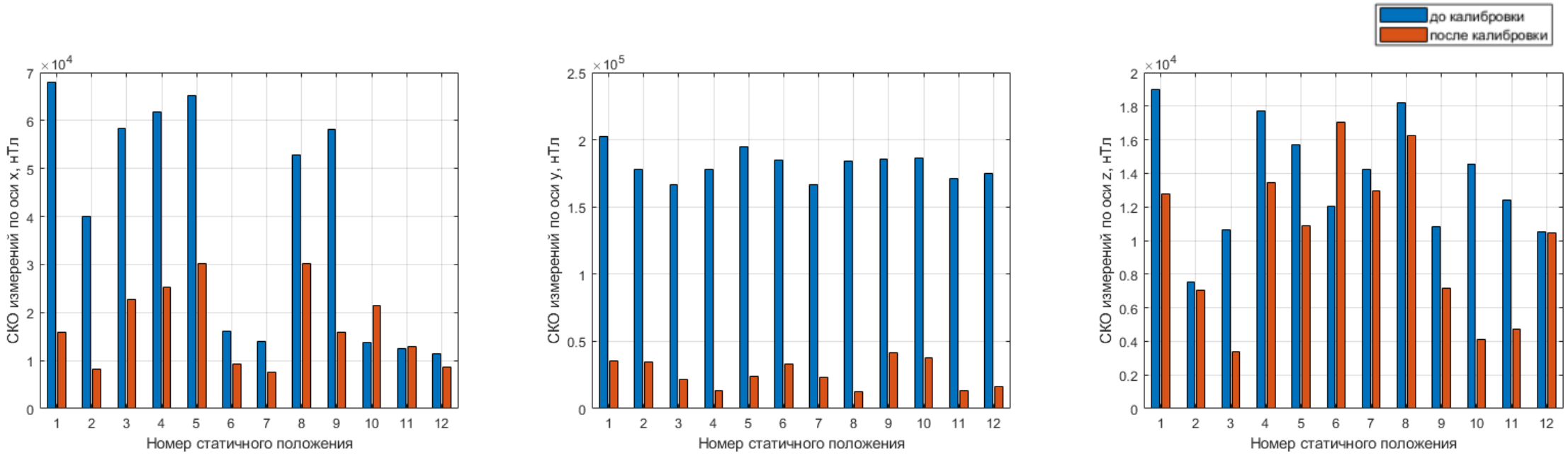


Рис.29 – Столбчатые диаграммы СКО измерений датчика MMC5883 №2

СХЕМА ФОРМИРОВАНИЯ МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

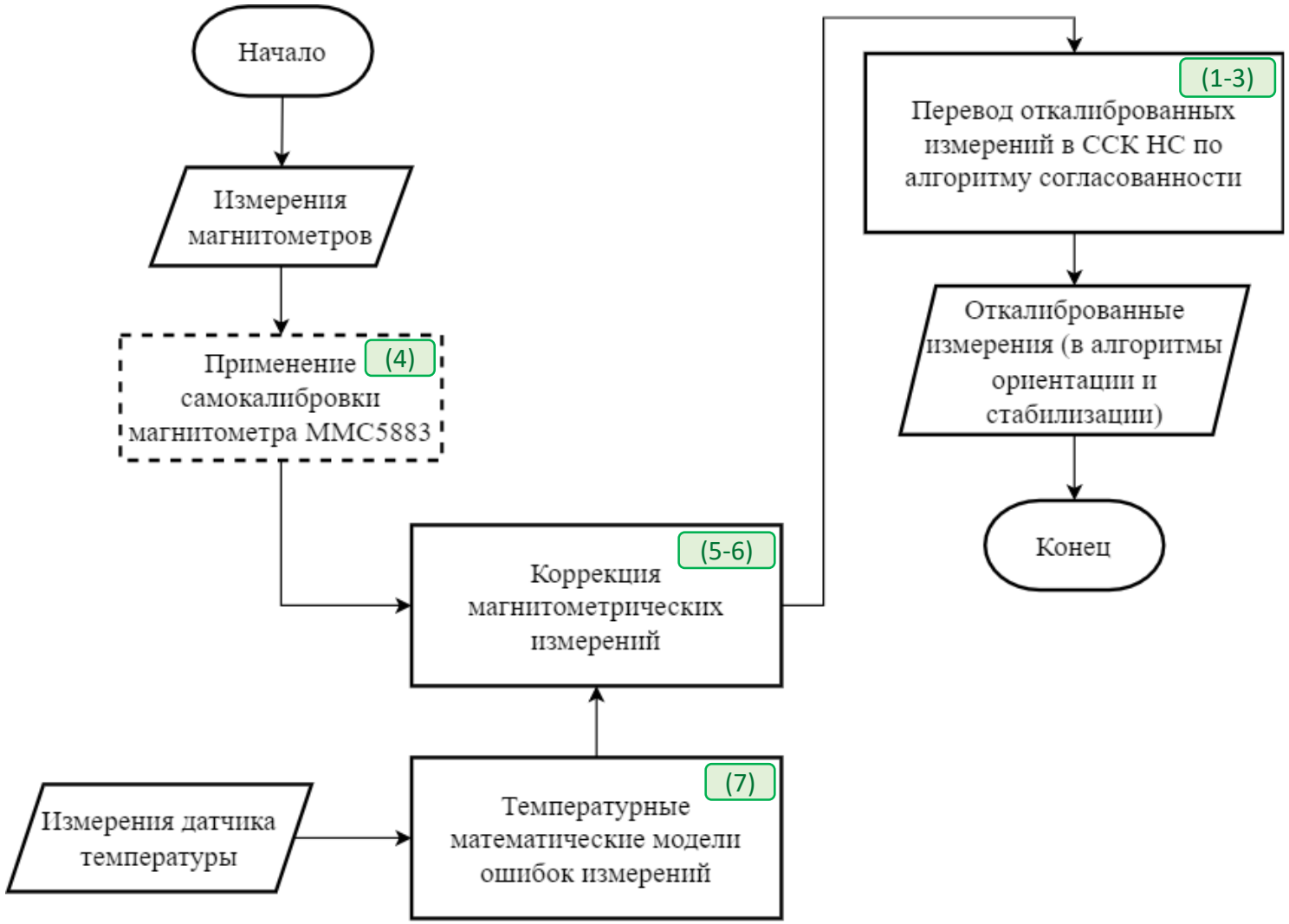


Рис.30 – Схема формирования магнитометрических измерений для системы ориентации и стабилизации наноспутника SamSat-ION

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы:

- Предложен и верифицирован алгоритм согласования измерений магнитометров наноспутника SamSat-ION, который учитывает отклонение системы координат платы выносного магнитометра от системы координат бортового компьютера, обусловленное положением штанги после раскрытия. Показано, что разница между нормированными проекциями измерений после применения алгоритма составляет не более 0,5%, а угловое рассогласование между полученными векторами не превышает 0,07 градуса.
- Разработана программа-методика наземных испытаний измерительных средств наноспутника SamSat-ION для проведения температурной калибровки в статичных положениях. Для этих целей были разработаны оснастка для крепления бортового компьютера и платы выносного магнитометра и экспериментальная установка для проведения процесса термоциклирования.
- Проведены испытания инженерных моделей бортового компьютера и платы выносного магнитометра по разработанной программе-методике, определены температурные зависимости калибровочных коэффициентов, с помощью которых проведена калибровка измерений магнитометров в двенадцати статичных положениях.
- В ходе проведения эксперимента по влиянию магнитных катушек на плату выносного магнитометра, установлено, что на расстоянии выносной штанги, длиной 30 см, магнитное поле катушек вызывает отклонение модуля индукции магнитного поля не более 3%.
- Показано, что в процессе самокалибровки магнитометров MMC5883 во время углового движения наноспутника SamSat-ION, влияние угловой скорости и требуемого времени задержки самокалибровки на точность определения сдвига нуля менее 0,001%.
- Разработана схема формирования магнитометрических измерений для системы ориентации и стабилизации наноспутника SamSat-ION, включающая в себя результаты наземных испытаний по температурной калибровке датчиков, алгоритм согласования измерений магнитометров, использование самокалибровки магнитометра MMC5883.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Название доклада	Конференция
Структура бортового программного обеспечения наноспутника SamSat-ION	XXX Международная научно-техническая конференция «Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации»
Методика калибровки магнитометрических измерительных средств наноспутника SamSat-ION	LXXII Молодёжная научная конференция, посвящённая 80-летию КуАИ-СГАУ-Самарского университета, 115-летию со дня рождения академика С. П. Королёва
Методика калибровки магнитометрических измерительных средств наноспутника SamSat-ION	XXV Всероссийский семинар по управлению движением и навигацией летательных аппаратов

САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
SAMARA UNIVERSITY

БЛАГОДАРЮ
ЗА ВНИМАНИЕ

dim02sobolev15@gmail.com