

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	Перв. примен.	Лигера	Листов
					ТСКЯ.468389.007		22

Код ОКПД 2  
26.51.20.210

**МОДУЛЬ ИНЕРЦИАЛЬНЫЙ НАВИГАЦИОННЫЙ  
МИНИАТЮРНЫЙ  
Руководство по эксплуатации  
ТСКЯ.468389.007РЭ**

## Содержание

1	Основные сведения и технические данные .....	4
1.1	Основные сведения об изделии .....	4
1.2	Основные технические характеристики изделия .....	5
2	Указания по применению и эксплуатации .....	7
2.1	Назначение изделия .....	7
2.2	Интерфейсы изделия.....	7
2.3	Установка изделия .....	7
2.4	Подготовка к работе .....	8
2.5	Включение изделия и начало работы .....	10
3	Примеры отказов и их анализ .....	13
3.1	Обобщенные признаки отказов .....	13
3.2	Детализированные признаки отказов .....	15
4	Маркировка.....	19
5	Комплектность .....	19
6	Транспортирование и хранение .....	20
7	Гарантии изготовителя .....	20
	Приложение А Перечень принятых сокращений.....	21

Настоящее РЭ распространяется на модуль инерциальный навигационный миниатюрный, ТСКЯ.468389.007 и его исполнения (изделие). Документ содержит описание назначения и основные характеристики изделия, описание его работы и рекомендации по применению.

РЭ предназначено для изучения принципа работы, технических характеристик, правил эксплуатации изделия и содержит сведения, необходимые для его правильной эксплуатации и поддержания его работоспособности.

Лица, допущенные к работе с изделием, должны знать его основные технические характеристики, ограничения по применению, признаки нормального функционирования.

Изделие предназначено для эксплуатации в качестве встроенного элемента электронных изделий.

Изделие устанавливается в системы управления и навигации летательных аппаратов малой и средней маневренности, а также других средств наземного и водного транспорта.

Перечень принятых сокращений приведен в приложении А.

# 1 Основные сведения и технические данные

## 1.1 Основные сведения об изделии

1.1.1 Изделие представляет собой инерциальную навигационную систему, построенную на основе микроэлектромеханических инерциальных датчиков: ДУС, акселерометров, магнетометров и датчика давления. Изделие может работать как в режиме курсоверткали, так и в режиме бесплатформенной инерциальной навигационной системы.

1.1.2 Областью применения изделия являются следующие отрасли промышленности:

- авиация (беспилотные летательные аппараты, платформы стабилизации и управления, интегрированная навигация);
- автопром (системы безопасности автотранспорта, робототехника);
- радиолокация (стабилизация антенн РЛС, телевизионных антенн и кинокамер;
- морской транспорт и гидролокация.

## 1.1.3 Изделие предназначено для:

- измерения угловых скоростей и проекций кажущегося линейного ускорения в связанных осях изделия, измеряемых датчиками линейных ускорений и угловых скоростей;
- автономного (инерциального) определения и выдачи, составляющих вектора скорости и координат объекта на оси навигационной системы координат, параметров ориентации связанной системы координат объекта (кватернионов);
- счисления координат и параметров ориентации;
- приема корректирующих навигационных параметров и параметров ориентации;
- вычисление углов курса, крена и тангажа в автономном режиме;
- измерение давления внутри корпуса изделия, связанного с окружающим пространством;

– измерение магнитного поля Земли в трех связанных осях (x, y, z) с дальнейшим расчетом значения курса.

## 1.2 Основные технические характеристики изделия

1.2.1 Основные технические характеристики изделия представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Основные технические характеристики изделия

Наименование параметра, единица измерения	Значение
Диапазон питающих напряжений, В:	От 3,05 до 3,35
Потребляемая мощность, Вт, не более	1,6
Состав датчиков: - микроэлектромеханический акселерометр - микроэлектромеханический датчик угловой скорости (ДУС) - трёхосевой магнетометр - датчик давления	6 12 1 1
Диапазон рабочих температур, °С	От минус 50 до плюс 70
Габаритные размеры, мм, не более	45,0 × 55,0 × 16,5

1.2.2 Перечень исполнений изделия и их основные отличительные особенности приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Исполнения изделия и их особенности

Обозначение КД исполнения	Особенность		
	Конструкция	Диапазон измеряемых угловых скоростей, °/с	Диапазон измеряемых кажущихся линейных ускорений, м/с <sup>2</sup>
ТСКЯ.468389.007	12 ДУС	± 450	± 100
ТСКЯ.468389.007-01	3 ДУС	± 450	± 100

1.2.3 Изделие неремонтопригодно в условиях эксплуатации.

1.2.4 Внешний вид и габаритные размеры изделия приведены на рисунке 1.1.

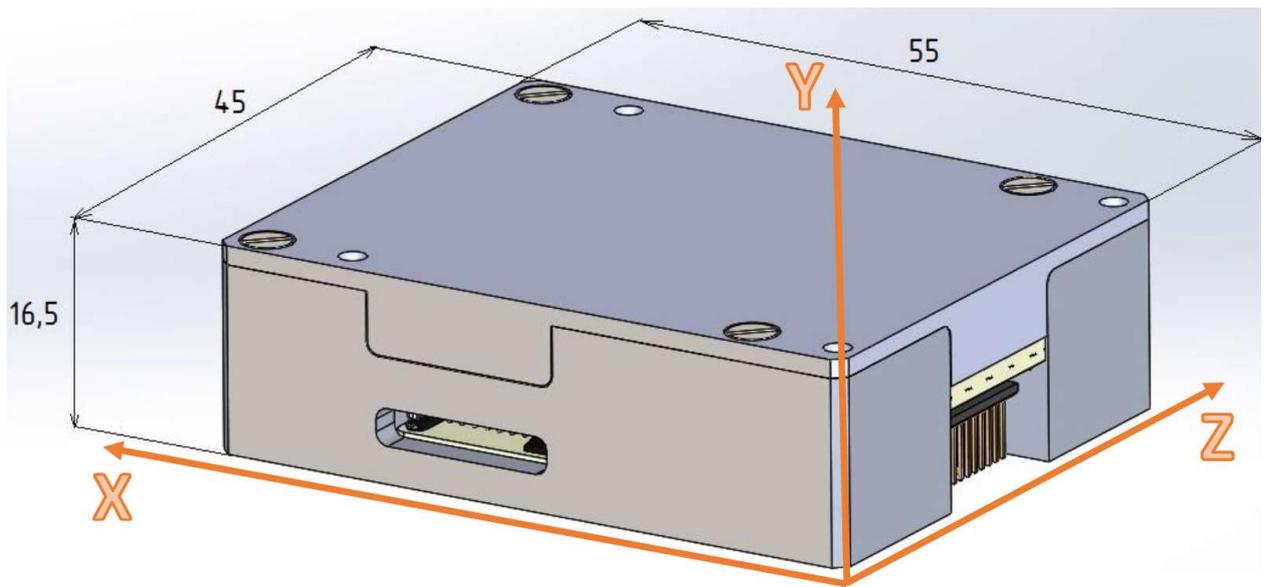


Рисунок 1.1 – Внешний вид и габаритные размеры изделия

## 2 Указания по применению и эксплуатации

### 2.1 Назначение изделия

2.1.1 Изделие является конструктивно законченным, самостоятельным и имеет класс защиты IP20 по ГОСТ 14254-2015.

### 2.2 Интерфейсы изделия

2.2.1 Интерфейс SPI предназначен для связи с потребителем.

2.2.2 Интерфейс UART предназначен для связи с модулями приемников спутникового радионавигационного сигнала по протоколу NMEA (например,  $\mu$ Blox NEO-8P).

2.2.3 Цифровые линии ввода-вывода.

### 2.3 Установка изделия

2.3.1 Изделие должно быть установлено на печатную плату с помощью комплекта монтажных частей, входящего в комплект поставки.

2.3.2 При установке изделия в аппаратуре пользователя необходимо предусмотреть максимальное снятие воздействия окружающей вибрации на изделие:

- установка амортизирующих втулок на винты в пространстве между изделием и печатной платой;
- максимальный вырез в конструкции печатной платы в месте установки изделия (пример выреза приведен на рисунке 2.1);
- выполнение печатной платы достаточной толщины и жесткости.

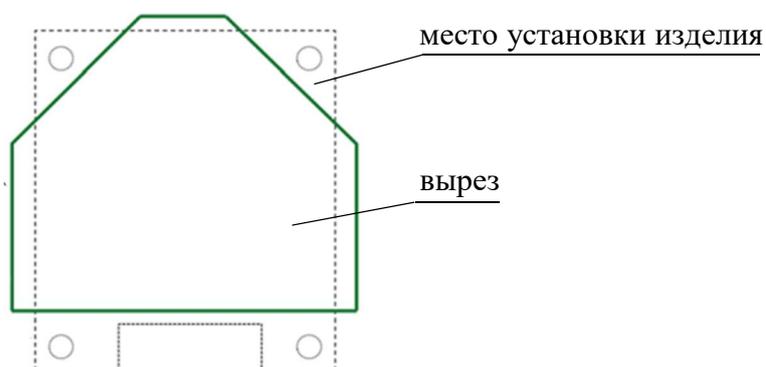


Рисунок 2.1 – Пример выреза в конструкции печатной платы

2.3.3 Степень и количество предпринимаемых мер по снижению воздействия вибрации зависит от области применения изделия.

При размещении изделия в аппаратуре пользователя должна быть предусмотрена максимальная удаленность от объектов, искажающих магнитное поле Земли, а также источников электромагнитных полей (железо и его сплавы, а также другие ферромагнетики; проводники с большим током). В случае недостаточной удаленности нахождения изделия от подобного рода объектов (определяется экспертно, по данным встроенного трехосного магнитометра) должна быть проведена пользовательская докалибровка магнитного компаса. Подробное описание алгоритма калибровки магнитного компаса можно найти в программном обеспечении Matlab (начиная с версии R2022b), также документация есть на сайте по ссылке <https://www.mathworks.com/help/fusion/ug/magnetometer-calibration.html>.

Однако, в большинстве случаев достаточно определения величин компенсации ненулей магнетометра по всем трем осям (так называемые hard-iron искажения) и дальнейшей их записью в регистры: HARD\_IRON\_X (Страница 2, адрес 0x28), HARD\_IRON\_Y (Страница 2, адрес 0x2A) и HARD\_IRON\_Z (Страница 2, адрес 0x2C). Сами эти значения определяются по результату анализа параметров raw\_magn\_X, raw\_magn\_Y и raw\_magn\_Z калибровочной телеметрической записи, во время которой оси X, Y и Z занимают положения перпендикулярно вверх и вниз относительно горизонта. В телеметрии находятся максимальные и минимальные значения raw\_magn\_X, raw\_magn\_Y и raw\_magn\_Z, разница между ними и будет являться значением ненуля магнетометра по каждой из трех осей.

## 2.4 Подготовка к работе

### 2.4.1 Подключение изделия

2.4.1.1 Установку и демонтаж изделия производить при отключенном питании.

2.4.1.2 Эксплуатационные режимы изделия должны соответствовать значениям, указанным в ТУ.

2.4.1.3 Время готовности изделия к работе после включения питания - не более 2 с. В режиме технической готовности все внутренние источники питания должны перейти в штатный режим, процессор должен запустить исполнение ПМО, все датчики должны перейти в рабочий режим. Время не включает в себя процесс самодиагностики.

2.4.1.4 Время готовности изделия от момента подачи питания до перехода в режим навигации должно быть не более 4 с.

2.4.1.5 После подачи питания изделие должно находиться в неподвижном положении как минимум на протяжении 15 с, в противном случае оценка дрейфа в канале рыскания либо не будет выработана вообще (если время неподвижности составит менее 2,5 с), либо окажется существенно неточной. Оптимальное время нахождения в неподвижном состоянии составляет от 60 до 100 с.

2.4.1.6 Время непрерывного нахождения изделия во включенном состоянии должно быть не более 12 ч с последующим перерывом не менее 4 с.

2.4.1.7 Подключение изделия производится через разъем MW-12-03-G-D-110-200 Samtec. Схема подключения приведена на рисунке 2.2.

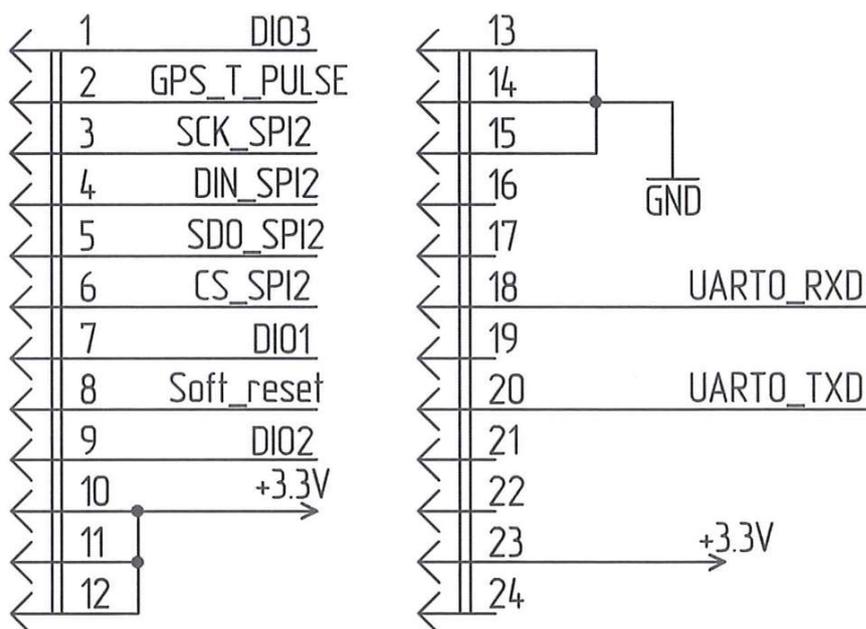


Рисунок 2.2 – Схема подключения изделия

## 2.5 Включение изделия и начало работы

2.5.1 Перед началом работы необходимо проверить работоспособность изделия.

В изделие следует установить карту памяти microSD, отформатированную в FAT32, любой емкости.

Подключите плату с установленным изделием к источнику питания и ПК (ОС не ниже Windows 7).

2.5.2 Подайте питающее напряжение на изделие.

После подачи питания последовательно выполняется:

- инициализация аппаратных составных частей;
- инициализация потоков исполнения, отвечающих за различные аспекты работы модуля (запись телеметрии, первичной обработки данных с датчиков, основного цикла расчетов и др.);
- запуск информационного обмена по SPI.

2.5.3 Плату с изделием выдержать в покое 30 с, чтобы были автоматически оценены дрейфы углов по курсу, тангажу и крену.

2.5.4 В рабочем интерфейсе (SPI) проконтролируйте состояние регистров.

Проверку выдачи контрольной информации о состоянии изделия можно производить с различной глубиной в зависимости от потребностей пользователя.

На первом уровне находится интегральная исправность. В разряде «1» регистра SYS\_E\_FLAG (Страница 0, адрес 0x08) признак «Отказ датчика». Признак «Отказ датчика» активизируется (переходит в состояние «1») в случае, если в системе обнаружен отказ, по любой из возможных причин, хотя бы одного из акселерометров, ДУС, магнитометра, термометров или бародатчика.

2.5.5 На следующем уровне в следующих регистрах:

- ACCL\_FAIL\_SUMM (Страница 0, адрес 0x40) в телеметрии это raw\_lailureFlags\_accl содержит информация о том какой конкретно (из четырех) акселерометр в какой оси неисправен;

- GYRO\_FAIL\_SUMM (Страница 0, адрес 0x42) в телеметрии это raw\_lailureFlags\_gyro содержит информация о том какой конкретно (из четырех) ДУС в какой оси неисправен;

- MISC\_FAIL\_SUMM (Страница 0, адрес 0x44) в телеметрии это raw\_lailureFlags\_misc содержит информация о том какой из каналов магнетометра или термометров неисправен, а также об отказе бародатчика;

- OTHER\_FAIL\_SUMM (Страница 0, адрес 0x46) в телеметрии это raw\_lailureFlags\_other содержит информация об ошибке чтения заводского номера.

2.5.6 При отсутствии неисправностей слова: raw\_failureFlags\_gyro, raw\_failureFlags\_accl, raw\_failureFlags\_misc и raw\_failureFlags\_other должны равняться = 0.

Если неисправности не обнаружены изделие готово к работе.

2.5.7 О конкретной причине отказа какого-то датчика можно узнать, рассмотрев следующие регистры взаимодействия по SPI:

- регистры с названиями вида ACCL\_FAIL\_sxx, где с — имя оси, xx — номера датчиков в этой оси, хранят слова признаков отказа соответствующих акселерометров;

- регистры с названиями вида GYRO\_FAIL\_sxx, где с — имя оси, xx — номера датчиков в этой оси, хранят слова признаков отказа соответствующих ДУС;

- регистр MAGN\_FAIL\_XY хранит слова признаков отказа магнитометров по осям X и Y, MAGN\_Z\_BARO\_FAIL — слова признаков отказа магнитометра по оси Z и бародатчика, TEMP\_FAIL\_12 — слова признаков отказа «аналоговых» термометров №1 и №2, TEMP\_FAIL\_3DIG — слова признаков отказа «аналогового» термометра №3 и «цифрового» термометра.

Содержание этих регистров можно увидеть в следующих переменных телеметрии, записываемой на карту памяти microSD: failuresWord\_accls\_X, failuresWord\_accls\_Y, failuresWord\_accls\_Z, failuresWord\_analogT, failuresWord\_gyros\_X, failuresWord\_gyros\_Y, failuresWord\_gyros\_Z, failuresWord\_magn и failuresWord\_others.

Учет отказов датчиков в логике работы изделия, любой одиночный отказ любого из акселерометров, ДУС и магнитомеров следует считать предотказной ситуацией. Изделие не предпринимает никаких специальных действий в случае обнаружения того или иного отказа — в частности, не прекращает использование данных бародатчика и магнитомеров для оценки, соответственно, высоты и угла рыскания. Анализ отказной ситуации и принятие решения о переходе на иную конфигурацию работы изделия остается на усмотрение пользователя.

### 3 Примеры отказов и их анализ

#### 3.1 Обобщенные признаки отказов

3.1.1 Регистры ACCL\_FAIL\_SUMM (таблица 3.1), GYRO\_FAIL\_SUMM (таблица 3.2), MISC\_FAIL\_SUMM (таблица 3.3) и OTHER\_FAIL\_SUMM (таблица 3.4) хранят обобщенные признаки отказов датчиков и элементов изделия: только наличие или отсутствие факта обнаружения отказа, без уточнения причин.

Значение «0» некоторого бита означает исправность соответствующего датчика (отсутствие отказа подсистемы), значение «1» — неисправность датчика (наличие отказа).

Таблица 3.1 – ACCL\_FAIL\_SUMM (Страница 0, адрес 0x40)

Биты	Описание
[15:12]	Резерв
11	Отказ акселерометра №4 по оси Z
10	Отказ акселерометра №3 по оси Z
9	Отказ акселерометра №2 по оси Z
8	Отказ акселерометра №1 по оси Z
7	Отказ акселерометра №4 по оси Y
6	Отказ акселерометра №3 по оси Y
5	Отказ акселерометра №2 по оси Y
4	Отказ акселерометра №1 по оси Y
3	Отказ акселерометра №4 по оси X
2	Отказ акселерометра №3 по оси X
1	Отказ акселерометра №2 по оси X
0	Отказ акселерометра №1 по оси X

Таблица 3.2 – GYRO\_FAIL\_SUMM (Страница 0, адрес 0x42)

Биты	Описание
[15:12]	Резерв
11	Отказ ДУС №4 по оси Z
10	Отказ ДУС №3 по оси Z
9	Отказ ДУС №2 по оси Z
8	Отказ ДУС №1 по оси Z
7	Отказ ДУС №4 по оси Y
6	Отказ ДУС №3 по оси Y
5	Отказ ДУС №2 по оси Y
4	Отказ ДУС №1 по оси Y
3	Отказ ДУС №4 по оси X
2	Отказ ДУС №3 по оси X
1	Отказ ДУС №2 по оси X
0	Отказ ДУС №1 по оси X

Таблица 3.3 – MISC\_FAIL\_SUMM (Страница 0, адрес 0x44)

Биты	Описание
[15:8]	Резерв
7	Отказ магнитометра по оси Z
6	Отказ магнитометра по оси Y
5	Отказ магнитометра по оси X
4	Отказ бародатчика
3	Отказ «цифрового» термометра
2	Отказ «аналогового» термометра №3
1	Отказ «аналогового» термометра №2
0	Отказ «аналогового» термометра №1

Таблица 3.4 – OTHER\_FAIL\_SUMM (Страница 0, адрес 0x46)

Биты	Описание
[15:1]	Резерв
0	Ошибка чтения заводского номера модуля

### 3.2 Детализированные признаки отказов

3.2.1 Регистры с названиями вида ACCL\_FAIL\_sxx, где с – имя оси, xx – номера датчиков в этой оси, хранят слова признаков отказа соответствующих акселерометров.

Регистры с названиями вида GYRO\_FAIL\_sxx, где с – имя оси, xx – номера датчиков в этой оси, хранят слова признаков отказа соответствующих ДУС.

Регистр MAGN\_FAIL\_XY хранит слова признаков отказа магнитометров по осям X и Y, MAGN\_Z\_BARO\_FAIL – слова признаков отказа магнитометра по оси Z и бародатчика, TEMP\_FAIL\_12 – слова признаков отказа «аналоговых» термометров №1 и №2, TEMP\_FAIL\_3DIG – слова признаков отказа «аналогового» термометра №3 и «цифрового» термометра.

Расшифровка значений битов слов признаков приведена в таблицах 3.5 – 3.20.

Таблица 3.5 – ACCL\_FAIL\_X12 (Страница 0, адрес 0x32)

Биты	Описание
[15:8]	Слово признаков отказа акселерометра №2 по оси X
[7:0]	Слово признаков отказа акселерометра №1 по оси X

Таблица 3.6 – ACCL\_FAIL\_X34 (Страница 0, адрес 0x34)

Биты	Описание
[15:8]	Слово признаков отказа акселерометра №4 по оси X
[7:0]	Слово признаков отказа акселерометра №3 по оси X

Таблица 3.7 – ACCL\_FAIL\_Y12 (Страница 0, адрес 0x36)

Биты	Описание
[15:8]	Слово признаков отказа акселерометра №2 по оси Y
[7:0]	Слово признаков отказа акселерометра №1 по оси Y

Таблица 3.8 – ACCL\_FAIL\_Y34 (Страница 0, адрес 0x38)

Биты	Описание
[15:8]	Слово признаков отказа акселерометра №4 по оси Y
[7:0]	Слово признаков отказа акселерометра №3 по оси Y

Таблица 3.9 – ACCL\_FAIL\_Z12 (Страница 0, адрес 0x3A)

Биты	Описание
[15:8]	Слово признаков отказа акселерометра №2 по оси Z
[7:0]	Слово признаков отказа акселерометра №1 по оси Z

Таблица 3.10 – ACCL\_FAIL\_Z34 (Страница 0, адрес 0x3C)

Биты	Описание
[15:8]	Слово признаков отказа акселерометра №4 по оси Z
[7:0]	Слово признаков отказа акселерометра №3 по оси Z

Таблица 3.11 – GYRO\_FAIL\_X12 (Страница 0, адрес 0x48)

Биты	Описание
[15:8]	Слово признаков отказа ДУС №2 по оси X
[7:0]	Слово признаков отказа ДУС №1 по оси X

Таблица 3.12 – GYRO\_FAIL\_X34 (Страница 0, адрес 0x4A)

Биты	Описание
[15:8]	Слово признаков отказа ДУС №4 по оси X
[7:0]	Слово признаков отказа ДУС №3 по оси X

Таблица 3.13 – GYRO\_FAIL\_Y12 (Страница 0, адрес 0x4C)

Биты	Описание
[15:8]	Слово признаков отказа ДУС №2 по оси Y
[7:0]	Слово признаков отказа ДУС №1 по оси Y

Таблица 3.14 – GYRO\_FAIL\_Y34 (Страница 0, адрес 0x4E)

Биты	Описание
[15:8]	Слово признаков отказа ДУС №4 по оси Y
[7:0]	Слово признаков отказа ДУС №3 по оси Y

Таблица 3.15 – GYRO\_FAIL\_Z12 (Страница 0, адрес 0x50)

Биты	Описание
[15:8]	Слово признаков отказа ДУС №2 по оси Z
[7:0]	Слово признаков отказа ДУС №1 по оси Z

Таблица 3.16 – GYRO\_FAIL\_Z34 (Страница 0, адрес 0x52)

Биты	Описание
[15:8]	Слово признаков отказа ДУС №4 по оси Z
[7:0]	Слово признаков отказа ДУС №3 по оси Z

Таблица 3.17 – MAGN\_FAIL\_XY (Страница 0, адрес 0x54)

Биты	Описание
[15:8]	Слово признаков отказа магнитометра по оси Y
[7:0]	Слово признаков отказа магнитометра по оси X

Таблица 3.18 – MAGN\_Z\_BARO\_FAIL (Страница 0, адрес 0x56)

Биты	Описание
[15:8]	Слово признаков отказа бародатчика
[7:0]	Слово признаков отказа магнитометра по оси Z

Таблица 3.19 – TEMP\_FAIL\_12 (Страница 0, адрес 0x58)

Биты	Описание
[15:8]	Слово признаков отказа «аналогового» термометра №2
[7:0]	Слово признаков отказа «аналогового» термометра №1

Таблица 3.20 – TEMP\_FAIL\_3DIG (Страница 0, адрес 0x5A)

Биты	Описание
[15:8]	Слово признаков отказа «цифрового» термометра
[7:0]	Слово признаков отказа «аналогового» термометра №3

Слово признаков отказа имеет длину 8 бит. Каждый из этих бит хранит признак наличия («1») или отсутствия («0») того или иного специфического отказа. Расшифровка значений бит слова признаков отказа праведена в таблице 3.21.

Таблица 3.21 – Структура слова признаков отказа датчика

Биты	Описание
[7:4]	Резерв
3	«Отказ по критерию отклонения от медианы»: отклонение показаний данного датчика от медианного значения в группе датчиков превысило в ту или иную сторону заданный порог отклонения
2	«Отказ по критерию «заморозки» показаний»: показания датчика сохранялись неизменными в течение времени большего, чем предельно допустимое
1	«Отказ по итогам встроенного самоконтроля»: обнаружен отказ датчика по итогам встроенного самоконтроля после подачи питания или перезапуска модуля
0	«Повреждены или недоступны данные заводской калибровки»: данные заводской калибровки не удалось считать или их контрольная сумма неверна

## 4 Маркировка

4.1 Маркировка изделия содержит:

- наименование или обозначение изделия;
- товарный знак или наименование предприятия-изготовителя;
- заводской номер или шифр, его заменяющий;
- направление трех измерительных осей X, Y и Z.

## 5 Комплектность

5.1 Комплект поставки изделия должен соответствовать таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Комплект поставки

Наименование	Обозначение	Кол.
Модуль инерциальный навигационный миниатюрный	ТСКЯ.468389.007-XX *	1
Комплект монтажных частей	ТСКЯ.466921.007	1
Карта памяти microSD		1
Модуль инерциальный навигационный миниатюрный. Этикетка	ТСКЯ.468389.007ЭТ	1
Модуль инерциальный навигационный миниатюрный. Руководство по эксплуатации **	ТСКЯ.468389.007РЭ	1
* XX - номер обозначения исполнения изделия		
** Находится в электронном виде на сайте предприятия-изготовителя <a href="http://milandr.ru">http://milandr.ru</a>		

## **6 Транспортирование и хранение**

6.1 Транспортирование и хранение изделия осуществляется в индивидуальной упаковке, рассчитанной на транспортировку всеми видами автомобильного, железнодорожного и авиационного транспорта.

6.2 Изделие должно храниться в упакованном виде в отапливаемых и вентилируемых помещениях при температуре от 5 °С до 40 °С и относительной влажности воздуха не выше 80 % при 25 °С при отсутствии в этих помещениях конденсации влаги, паров химически активных веществ.

6.3 После транспортирования изделий в условиях отрицательных температур их распаковка должна производиться после выдержки в течение не менее 12 ч при температуре (плюс  $20 \pm 5$ ) °С.

## **7 Гарантии изготовителя**

7.1 Предприятие – изготовитель (поставщик) гарантирует качество и соответствие изделия всем характеристикам при соблюдении потребителем правил эксплуатации и хранения, установленных в настоящем РЭ.

7.2 Гарантийный срок хранения 1 год со дня приемки.

7.3 Гарантийный срок эксплуатации изделия 1 год с даты ввода в эксплуатацию в пределах гарантийного срока хранения.

7.4 Гарантийные обязательства не распространяются на изделие, если его монтаж, эксплуатация, транспортирование и хранение велись потребителем с нарушением требований технической (эксплуатационной) документации, и (или) имеющее механические или термические повреждения.

## Приложение А

(обязательное)

### Перечень принятых сокращений

ДУС	- датчик угловой скорости
ОС	- операционная система
ПК	- персональный компьютер
ПМО	- программно-математическое обеспечение
РЛС	- радиолокационная станция
РЭ	- руководство по эксплуатации
СПО	- специальное программное обеспечение
ТУ	- технические условия

