

РУКОВОДСТВО ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ

Векторные оверхаузеровские магнитометры POS-3,4



ЛАБОРАТОРИЯ КВАНТОВОЙ МАГНИТОМЕТРИИ
УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ФГАОУ ВО

Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
Лаборатория квантовой магнитометрии

УТВЕРЖДАЮ:



Директор по научной работе УрФУ

В.В. Кружаев

2020 г.

ВЕКТОРНЫЕ ОВЕРХАУЗЕРОВСКИЕ МАГНИТОМЕТРЫ POS-3,4
(ПОС-3,4)

РУКОВОДСТВО ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ
РЭ POS-3,4

Зав. лабораторией квантовой магнитометрии

В.А. Сапунов

г. Екатеринбург

2020

Настоящее руководство по эксплуатации предназначено для изучения и правильной эксплуатации векторных процессорных оверхаузеровских магнитометров POS-3 и POS-4 обслуживающим персоналом с квалификационной группой не ниже техника при использовании магнитометров POS-3,4 по назначению, выполнении работ по техническому обслуживанию, постановке на хранение, для соблюдения правил транспортирования и утилизации.

Магнитометры представляют собой электромагнитные системы, создающие подмагничивающие поля в различных направлениях, с размещенным в них оверхаузеровским модульным магнитометром POS-1, зарегистрированным в Государственном реестре средств измерения под номером № 79451-20 и допущенным к применению в Российской Федерации. Магнитометры POS-1 выпускаются по техническим условиям ТУ 26.51.12-002-02069208-2020.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ОПИСАНИЕ И РАБОТА МАГНИТОМЕТРОВ POS-3 И POS-4	4
1.1. Назначение	4
1.2. Технические требования.....	6
1.3. Сведения об управлении магнитометром и выводе данных	10
1.4. Состав магнитометра	12
1.5. Устройство и принцип работы магнитометра	13
1.6. Средства измерения, инструмент и принадлежности.....	23
1.7. Маркировка	24
1.8. Упаковывание	24
2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПО НАЗНАЧЕНИЮ	25
2.1. Эксплуатационные ограничения.....	25
2.2. Подготовка магнитометра к работе.....	25
2.3. Порядок работы.....	30
3. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ	34
3.1. Общие указания.....	34
3.2. Порядок технического обслуживания.....	34
3.3. Контроль параметров магнитометра.....	35
3.4. Техническое освидетельствование	39
4. ХРАНЕНИЕ	39
5. ТРАНСПОРТИРОВАНИЕ	39
6. УТИЛИЗАЦИЯ	39
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. РАЗЪЕМЫ ПОДМАГНИЧИВАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ И ЭЛЕКТРОННОГО БЛОКА	40
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ОБМЕН ДАННЫМИ С МАГНИТОМЕТРОМ	41
Основные команды управления магнитометрами POS	42
Дополнительные команды управления POS-3 и POS-4.....	51
Дополнительные команды управления POS-4	57
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. САМОКОЛИБРОВКА МАГНИТОМЕТРОВ POS-3,4	65

1. ОПИСАНИЕ И РАБОТА МАГНИТОМЕТРОВ POS-3 И POS-4

1.1. Назначение

Векторные процессорные оверхаузеровские магнитометры POS-3 и POS-4 являются бесклавиатурными, управляемыми по порту, прецизионными измерительными приборами циклического типа, основанными на принципе динамической поляризации ядер (эффект Оверхаузера). Магнитометры предназначены для измерения модуля и компонент вектора индукции магнитного поля Земли в диапазоне 20000 – 100000 нТл. Магнитометр POS-3 обеспечивает измерение модуля T внешнего поля, а также измерение модуля поля при подаче коммутируемого тока (создание подмагничивающего поля) в вертикально расположенный соленоид. Полученных данных достаточно для расчета (см. далее) значения вертикальной компоненты внешнего поля Z . Помимо модуля и вертикальной компоненты, POS-4 дополнительно обеспечивает измерение горизонтальной компоненты H вдоль оси системы дополнительных колец, подачей в них коммутируемого тока. Таким образом, POS-4 обладает возможностью определения полного вектора поля. Комплект магнитометра с персональным компьютером или специализированным регистратором позволяет непосредственно вычислять компоненты магнитного поля и сохранять все данные на жесткий диск в текстовом и/или двоичном форматах.

Структурно магнитометры состоят из трех основных блоков, а именно: оверхаузеровского датчика (первичного преобразователя, измеряющего модуль индукции магнитного поля), магнитной системы (создающей подмагничивающие поля в направлении измеряемых компонент поля) и электронного блока управления датчиком и магнитной системой, имеющего интерфейс RS-232 для связи с внешними устройствами.

Основой магнитометров служит процессорный датчик POS-1 с ядерно-прецессионным оверхаузеровским первичным преобразователем на стабильном рабочем веществе (время жизни порядка 5 – 10 лет). По сравнению с

протонными преобразователями данный тип преобразователя обладает меньшим энергопотреблением, большей чувствительностью и градиентоустойчивостью.

Использование в составе магнитометров электронного блока и последовательного порта позволяет:

- обрабатывать и пересчитывать частоту свободной ядерной прецессии непосредственно в величину модуля измеряемого поля;
- адаптировать обработку сигнала ядерной прецессии в зависимости от условий измерения;
- контролировать качество и условия измерения;
- проводить автоматическую внутреннюю настройку датчика, а также «ручную» настройку с внешнего блока управления;
- управлять датчиком и токами в магнитной системе по порту с внешнего блока управления, в качестве которого может выступать специализированный регистратор или обыкновенный компьютер;
- выводить результаты измерений и дополнительную информацию в цифровом виде через порт автоматически или по запросу.

Высокие технические и эксплуатационные параметры магнитометров в комплекте с различными внешними блоками управления обеспечивают широкие возможности его применения, например, в качестве:

- вариационной станции;
- обсерваторского магнитометра;
- эталонного магнитометра мер слабого магнитного поля;
- магнитного канала многофункциональных геофизических систем.

Обозначение магнитометра при его заказе и в документации другой продукции в варианте измерителя вертикальной компоненты поля – «векторный оверхаузеровский магнитометр POS-3», в варианте измерителя полного вектора – «векторный оверхаузеровский магнитометр POS-4».

1.2. Технические требования

1.2.1. Метрологические характеристики

Таблица 1

№ п/п	Характеристика (параметр)	Значение
1	Диапазон измерений модуля магнитной индукции, нТл	20000 ÷ 100000
2	Основная систематическая погрешность измерения модуля поля магнитной индукции, не более, нТл	± 1
3	Модуль среднего квадратического отклонения случайной составляющей погрешности измерения модуля поля при длительности его измерения не менее 3-х секунд, не более, нТл	0,03
4	Основная систематическая погрешность измерения вертикальной проекции поля на ось магнитной системы, не более, нТл	10
5	Модуль среднего квадратического отклонения случайной составляющей погрешности измерения вертикальной проекции поля при длительности ее измерения не менее 9-и секунд, не более, нТл	0,5
6	Основная систематическая погрешность измерения горизонтальной проекции поля на ось магнитной системы, не более, нТл (POS-4)	–
7	Модуль среднего квадратического отклонения случайной составляющей погрешности измерения горизонтальной проекции поля при длительности ее измерения не менее 9-и секунд, не более, нТл (POS-4)	0,5

1.2.2. Технические характеристики

Таблица 2

№ п/п	Характеристика (параметр)	Значение
1	Разрядность измерения модуля и компонент вектора магнитной индукции, нТл	0,001
2	Напряжение питания, В	10 ÷ 15
3	Потребляемая мощность, не более, Вт - средняя за цикл измерения POS-3 - средняя за цикл измерения POS-4 - в режиме ожидания	5 6 2
4	Длительность однократного измерения, не более, с - модуля поля - компоненты поля - вектора поля (POS-4)	3 9 15
5	Габариты (без учета разъемов и подставки), не более, мм - POS-3 - POS-4 - блок электроники	360×165×150 360×280×165 160×90×90
6	Масса, не более, кг - POS-3 - POS-4	4 5

Соединение измерительного модуля, включающего в себя подмагничивающую систему и оверхаузеровский датчик, и блока электроники осуществляется гибкими кабелями: кабель питания и связи, кабель управления магнитной системой. Магнитометры имеют различные общие габариты, так как у POS-4 добавлена магнитная система колец для определения горизонтальной компоненты индукции магнитного поля.

При измерениях угол $90^\circ \pm 10^\circ$ является углом оптимальной ориентации оси цилиндра первичного преобразователя относительно направления магнитного поля. Ориентация датчика по отношению к подмагничивающей системе выбирается предприятием-изготовителем с учетом сложения внешнего и подмагничивающих полей. Для магнитометров POS-3,4 оптимальное расположение первичного преобразователя автоматически обеспечивается при ориентации приборов на магнитный «север» по ориентир-буссоли, входящей в комплект (место крепления буссоли показано на рис.3).

Магнитометры допускают возможность однократного и автоматического (периодический запуск через заданный интервал времени) измерения, с выключенным (режим измерения модуля внешнего поля) или включенным (режим измерения компонент внешнего поля) подмагничивающим полем.

Начало автоматического запуска измерения синхронизовано с началом секунды по встроенным часам магнитометра. Время установления рабочего режима не должно превышать 10 секунд. Цикличность автоматического запуска измерений составляет $1/5, 1/4, 1/3, 1/2, 1, 2, 3, 4, \dots$ секунды.

Внимание! Увеличение скорости автоматического запуска (ниже 3 с) приводит к увеличению погрешности измерения.

Возможны следующие режимы работы прибора (более подробно см. пункт 1.5.4):

- Измерение модуля внешнего поля;
- Измерение модуля суммы внешнего и подмагничивающего поля. Измерение проводится с подачей некоммутируемого тока в магнитную систему: POS-3 – поле подмагничивания создается в вертикальном направлении (либо в одну, либо в другую сторону), для POS-4 добавляется возможность подмагничивания в горизонтальном направлении;
- Серия из трех измерений модуля внешнего поля: одно с выключенным током подмагничивания, два с коммутацией тока в вертикальной системе подмагничивания. В последних двух измерениях меняется только направление тока, а величина его остается неизменной. Согласно представленным далее формулам этих данных достаточно, чтобы вычислить вертикальную компоненту поля;
- Для магнитометра POS-4 возможна серия из пяти измерений модуля внешнего поля: одно с выключенным током подмагничивания, два с перекоммутируемым током в вертикальной системе подмагничивания и два с коммутацией тока в горизонтальной системе. Полученные данные позволяют вычислить вертикальную и горизонтальную компоненты поля.

Настройка рабочего поддиапазона магнитометра (приемного контура первичного преобразователя) происходит автоматически по измеренному ранее значению индукции магнитного поля (в том числе с включенным подмагничивающим полем). Для корректной работы устройства перед запуском измерения желательна первичная настройка приборов с внешнего блока управления (задание примерного значения модуля поля и его компонент). В магнитометре для измерения модуля поля предусмотрено 64 перекрывающихся поддиапазона с шириной рабочей зоны от 4000 нТл (на нижней границе 20000 нТл) до 20000 нТл (на верхней границе 100000 нТл).

1.3. Сведения об управлении магнитометром и выводе данных

Магнитометр не имеет клавиатуры и дисплея. Управление и обмен данными с ним осуществляется только по последовательному порту (трехжильный RS-232 порт, скорость передачи – 9600 бод). Разъемы, протокол обмена и система команд описаны в Приложении 1, 2. Выводимые через порт данные включают в себя:

- Результат измерения модуля магнитной индукции поля (суммы внешнего поля и подмагничивающего, если последнее включено);
- Время начала измерения;
- Сведения о наличии и ориентации подмагничивающего поля.

Также выводится информация о качестве и условиях измерения:

- Оценка модуля случайной погрешности измерения при доверительной вероятности 0,68, то есть оценка модуля среднего квадратического отклонения. Вычисляется по накопленным за измерение данным с исключением влияния вариаций внешнего поля, произошедших во время измерения, в предположении, что внешний шум нормальный. Оценка модуля случайной погрешности измерения имеет следующие характеристики:

Таблица 3

№ п/п	Характеристика (параметр)	Значение
1	Диапазон значений оценки случайной погрешности измерения, нТл	0 ÷ 65,535
2	Относительное суммарное отклонение оценки, не более, %	200

- Сообщения о нестандартных условиях измерения:

Таблица 4

№ п/п	Характеристика (параметр)	Значение
1	Низкое напряжение питания	напряжение менее 9,5 В
2	Нет сигнала	начальная амплитуда сигнала менее 0,3 В или время его затухания менее 20 мс
3	Значение модуля поля вне диапазона измерений	значение модуля индукции измеренного поля (в том числе при измерении с подмагничиванием) вне диапазона 20000 ÷ 100000 нТл
4	Низкое отношение сигнал/шум	среднее за время измерения отношение сигнал/шум менее 5
5	Укорочение длительности сигнала	амплитуда сигнала достигает значения 0,3 В менее чем за 400 мс
6	Значение поля вне установленного рабочего поддиапазона магнитометра	частота измеренного поля (в том числе при измерении с подмагничиванием) отличается от частоты настройки более чем на 5%

1.4. Состав магнитометра

Таблица 5

№ п/п	Наименование	Кол-во	Обозначение	Примечание
1	Магнитометр	1	POS-3	Включает первичный преобразователь, помещенный в магнитную систему - соленоид, создающий вертикальное подмагничивающее поле. Система и блок электроники соединены гибкими кабелями.
			POS-4	Система дополнительно оснащена системой колец, создающей горизонтальное подмагничивающее поле.
2	Кабель датчика POS	1	–	
2	Кабель питания и связи	1	–	
3	Кабель управления магнитной системой	1	–	
4	Ориентир-буссоль	1	–	
5	Треггер (подставка)	1	–	
6	Паспорт	1	ПСПОС-3,4	
7	Руководство по эксплуатации	1	РЭПОС-3,4	

1.5. Устройство и принцип работы магнитометра

1.5.1. Основные принципы работы

1.5.1.1. В физической основе измерений магнитометра лежит явление ларморовской прецессии магнитных моментов во внешнем магнитном поле. Высокоточное определение модуля магнитной индукции возможно благодаря наличию фундаментальной связи между величиной поля и периодом свободной прецессии суммарного вектора ядерной намагниченности рабочего вещества вокруг направления вектора измеряемого поля \vec{T} :

$$T \equiv |\mathbf{T}| = (\gamma_p t_p)^{-1}, \quad \mathbf{T} \equiv \vec{T},$$

где $\gamma_p = 0,0425764064$ Гц/нТл – гиромагнитное отношение протона (относительная погрешность определения составляет $1,8 \cdot 10^{-5} \%$) и t_p – период свободной прецессии.

1.5.1.2. Измерение модуля поля магнитометром фактически разбивается на две фазы. В первой фазе происходит формирование протонной намагниченности в процессе поляризации рабочего вещества первичного преобразователя – специализированного органического радикала. Преобразователь использует эффект динамической поляризации ядер (эффект Оверхаузера) рабочего вещества для увеличения наблюдаемого сигнала за счет насыщения электронных спиновых подуровней ВЧ электромагнитным полем. Благодаря взаимодействию электронных и ядерных магнитных моментов появляется возможность значительно повысить величину суммарной протонной намагниченности. По окончании поляризации сформированная ядерная намагниченность начинает прецессировать и наводит в приемных катушках первичного преобразователя переменную ЭДС с частотой (периодом) согласно представленной ранее формуле. Во второй фазе регистрируются переходы сигнала прецессии через нулевой уровень напряжения в одном направлении. По окончании второй фазы проводится статистический анализ накопленных за измерение данных. По результатам анализа определяется наиболее вероятный период сигнала прецессии, который используется для определения модуля индукции.

1.5.1.3. Принцип действия магнитометра предоставляет возможность вычисления компоненты по измерениям модуля поля, с применением коммутируемого (подмагничивающего) поля \mathbf{B} . Дополнительно к измерению модуля внешнего поля T_0 , с помощью магнитной системы создаются добавочные магнитные поля \mathbf{B} и $-\mathbf{B}$, и измеряются модули, соответствующих векторов T_1 и T_2 ($T_{1,2} = T_0 \pm \mathbf{B}$), см. рис.1.

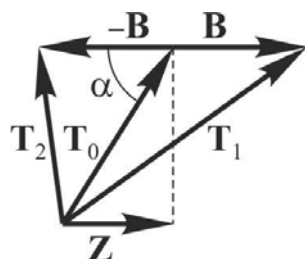


Рис. 1. Схема сложения векторов в методе подмагничивающего поля

Далее по измеренным модулям вычисляется Z проекция вектора поля T_0 на направление поля \mathbf{B} должна определяться по формулам:

$$Z = \frac{T_1^2 - T_2^2}{4B}; \quad B = \sqrt{\frac{(T_1^2 + T_2^2)}{2} - T_0^2}$$

Ток в подмагничивающей системе является высокостабильным, поэтому в режиме непрерывных измерений вычисление абсолютного значения вектора \mathbf{B} рекомендуется проводить путем усреднения значений B , полученных по последним данным.

1.5.1.4. В магнитометре POS-3 подмагничивающий соленоид рассчитан на измерение вертикальной компоненты Z . Измерение компоненты POS-3 должно включать в себя серию трех измерений модуля T_0, T_1, T_2 , используя которые, по формулам, рассчитывается значение компоненты. Так, например, в прилагаемой к магнитометру программе PosManager выводится модуль индукции магнитного поля T_0 и его Z -компонента. Однако в файл данных сохраняются «сырые» данные T_0, T_1, T_2 , требующие последующей обработки.

POS-4, помимо вертикального подмагничивающего соленоида, содержит перпендикулярную систему колец, предназначенную для измерения H – горизонтальной компоненты внешнего поля в направлении оси колец.

Соответственно, измерение вектора магнитометром включает в себя серию из пяти измерений модуля T_0, T_1, T_2, T_3, T_4 (см. рис. 2), с посылкой по порту «сырых» данных. В программе PosManager по этим данным рассчитываются и выводятся обработанные результаты измерения поля T_0 : модуль, Z и H -компонента.

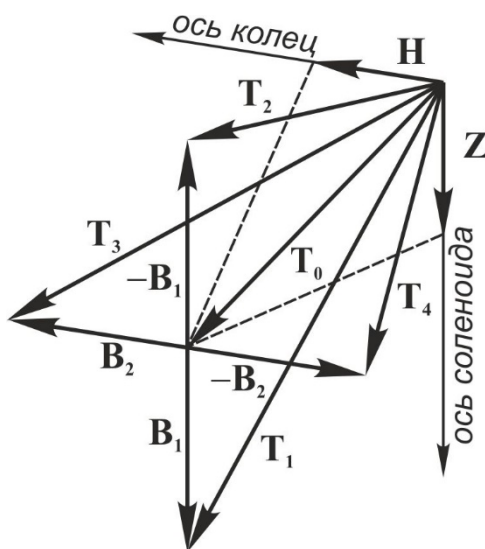


Рис. 2. Схема сложения векторов в магнитометре POS-4

1.5.2. Устройство магнитометра

1.5.2.1. Структурно магнитометр состоит из трех составных частей: подмагничивающая система, размещенный в ней первичный преобразователь (оверхаузеровский датчик) и отдельный от магнитной системы блок электроники (см. рис.4,5).

1.5.2.2. В первичном преобразователе происходит формирование сигнала свободной прецессии ядерной намагниченности рабочего вещества. Конструктивно преобразователь размещен в цилиндрическом корпусе и состоит из приемно-поляризующих НЧ катушек, помещенного в них рабочего вещества и ВЧ контура, необходимого для создания резонансного электромагнитного поля.

1.5.2.3. Магнитная система создает подмагничивающее поле (однородное в области датчика) в направлении измеряемых компонент поля. Вертикальное подмагничивающее поле формируется вертикальным соленоидом Гаррета. Вертикальность установки соленоида обеспечивается системой юстировки,

состоящей из двух взаимно перпендикулярных жидкостных уровней на верхнем торце соленоида и трегера (подставки), на который помещен магнитометр. Для быстрой (грубой) установки вертикали на соленоиде опционально возможна установка круглого пузырькового уровня.

Для обеспечения максимальной чувствительности необходимо сориентировать прибор в оптимальном горизонтальном направлении. Для этого в магнитометре предусмотрено использование ориентир-буссоли, которая при юстировке вкручивается в крепежные отверстия, расположенные в верхней пластине соленоида, для POS-4 – в верхней части плоскости колец, см рис.3 (При измерениях ориентир-буссоль должна быть снята с прибора!).

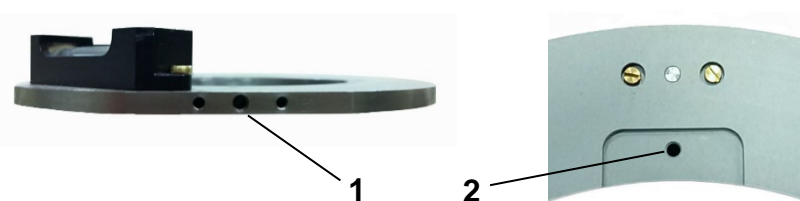


Рис. 3. Крепежные отверстия для ориентир-буссоли: 1 – POS-3, 2 – POS-4



Рис. 4. Подмагничивающая система магнитометра POS-3

Магнитометр POS-4 дополнительно содержит магнитную систему колец, формирующую горизонтальное подмагничивающее поле. Рекомендуемая ориентация данной системы подмагничивания соответствует выбору направления оси колец перпендикулярно магнитному северу.

1.5.2.4. Электронный блок размещается в прямоугольном корпусе, на боковых стенках которого расположены разъемы (Приложение 1): разъем датчика, разъем управления магнитной системой, разъем питания и связи и разъем контроля сигнала (может отсутствовать). Электронный блок и магнитная система (с датчиком) соединяются гибкими кабелями.

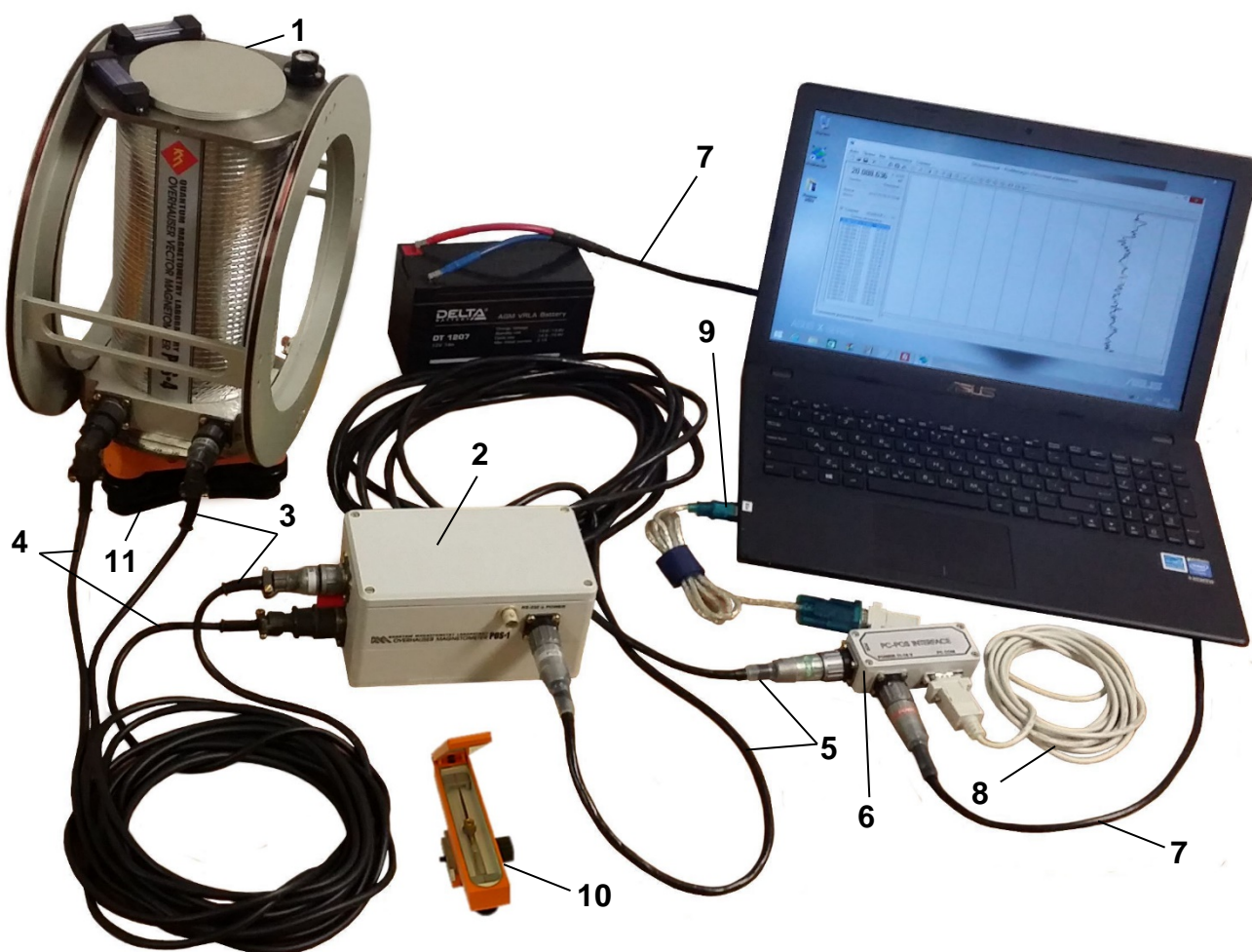


Рис. 5. Сборка магнитометра POS-3(4): 1 – Магнитная система с POS-магнитометром; 2 – блок электроники POS; 3 – кабель OVH-датчика; 4 – кабель управления магнитной системой; 5 – кабель питания и связи; 6 – PC-POS интерфейсный блок; 7 – кабель питания (10-15 В); 8 – модемный кабель RS232; 9 – кабель-переходник RS232-USB; 10 – ориентир-буссоль; 11 – трегер (подставка)

Электроника магнитометра включает в себя четыре платы: контроллер, ВЧ-генератор, плата, содержащая усилитель, коммутатор, автомат настройки, компаратор, а также плата управления магнитной системой. Блок обеспечивает работу первичного преобразователя в отдельности, и совместно с подмагничивающей системой, управляет циклами измерений и автоматом настройки, а также осуществляет преобразование аналогового сигнала прецессии в цифровой код с последующей обработкой данных и вычислением величины индукции геомагнитного поля. Управление и обмен информацией с собственно блоком электроники осуществляется по последовательному порту в стандарте RS-232. Интерфейс связи с магнитометром описан в Приложении 2.

1.5.3. Функциональная схема

1.5.3.1. Взаимосвязи основных функциональных узлов магнитометра приведены на рис. 6.

1.5.3.2. Вся работу магнитометра организует контроллер, выполненный на базе микропроцессора. Основные функции контроллера:

- Обслуживание RS-232 порта, предназначенного для сопряжения с внешними устройствами;
- На основе счета тактовых импульсов опорного генератора формирование временных последовательностей необходимых для создания и оцифровки сигнала свободной прецессии;
- Управление токами в подмагничивающей системе и синхронизация их включения с работой первичного преобразователя (датчика);
- Управление настройкой приемного контура датчика на рабочий диапазон полей (том числе, с учетом дополнительных полей, создаваемых подмагничивающей системой);
- Хранение и обработка промежуточных цифровых данных; обмен информацией с внешним устройством.

1.5.3.3. Первичный преобразователь преобразует индукцию внешнего магнитного поля в переменное напряжение с частотой, строго пропорциональной этой индукции. Он предназначен для формирования,

селектирования, регистрации и предварительного усиления (при настройке первичного преобразователя на частоту измеряемого сигнала) сигнала свободной прецессии протонной намагниченности.

1.5.3.4. Блок коммутации магнитометрического канала служит для переключения первичного преобразователя в режим поляризации или в режим измерения, а также для настройки приемного контура датчика. В его задачи входит: подключение НЧ катушек первичного преобразователя на время поляризации к источнику тока; включение ВЧ генератора на время поляризации; быстрое выключение поляризующего поля и подавление переходного процесса; подключение преобразователя к входу блока усиления; коммутация блока конденсаторов, обеспечивающих настройку резонансного контура на частоту измеряемого поля. Причем в векторном режиме настройка контура осуществляется на частоту, соответствующую суммарному (внешнее плюс подмагничивающее) магнитному полю.

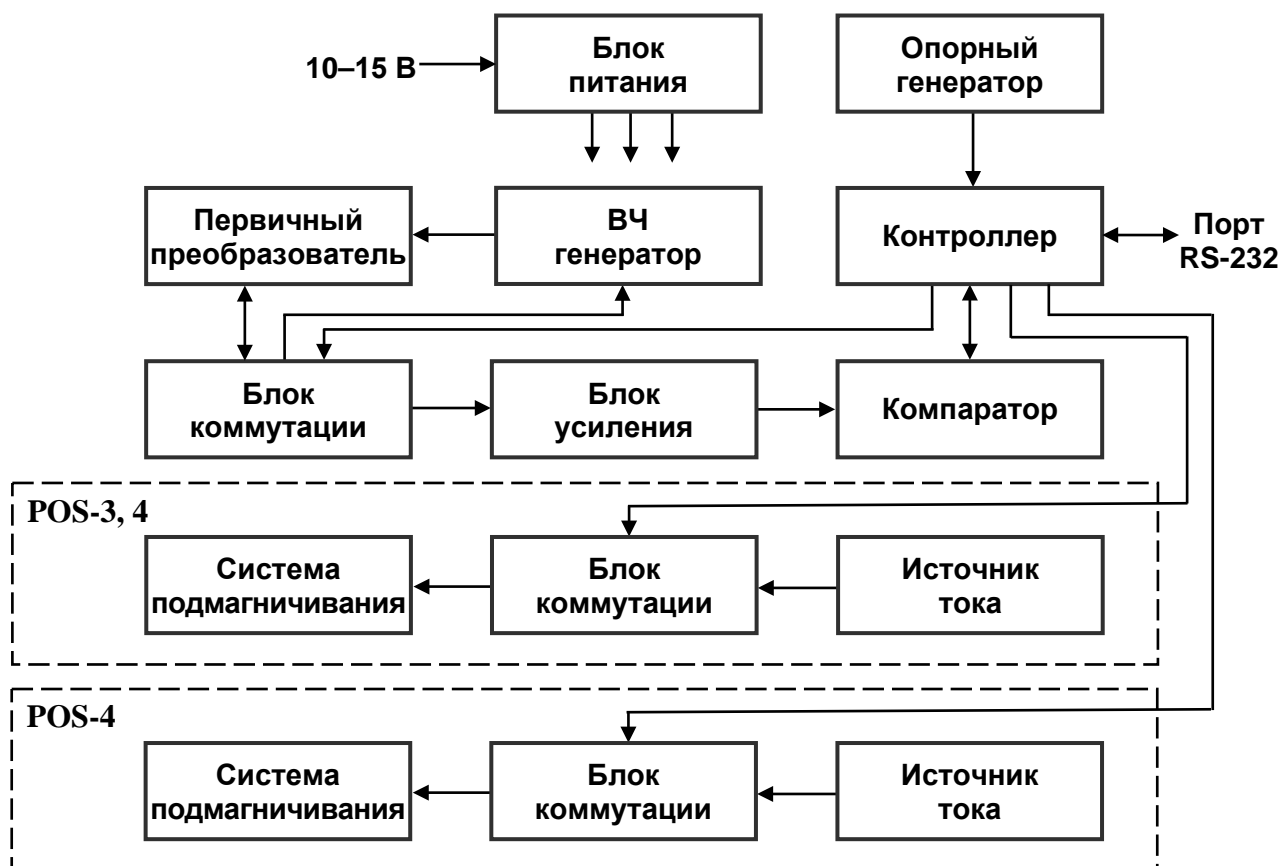


Рис. 6. Функциональная схема POS-3,4

1.5.3.5. Блок усиления обеспечивает фильтрацию и усиление аналогового сигнала свободной прецессии до величины, необходимой для формирования цифрового сигнала.

1.5.3.6. Преобразование частота-код осуществляется совместно компаратором и контроллером на основании сопоставления момента перехода усиленного сигнала через нулевой уровень напряжения и числа тактовых импульсов опорного генератора, накапливаемых контроллером с момента начала измерения.

1.5.3.7. Подмагничивание осуществляется высокостабильным током от специализированного источника тока. Включение, «переплюсовка» и выключение тока через блок коммутации полей, совмещенном с блоком электроники POS-1, синхронизируется контроллером с моментом начала поляризации и концом измерения. Причем, для POS-4 ток горизонтального подмагничивания в магнитной системе колец обеспечивается независимыми коммутатором и источником тока.

1.5.4. Работа магнитометра

1.5.4.1. При включении питания магнитометр, после процедуры самотестирования, по умолчанию устанавливает рабочий поддиапазон со средним полем равным 55000 нТл, в том числе для всех направлений подмагничивающего поля. Далее прибор переводится в режим установления связи по RS-232 порту с внешним устройством. При успешном соединении устанавливается режим ожидания команд с внешнего устройства (Приложение 2). Возможные команды управления включают: команды настройки и опроса магнитометра, команда на запуск однократного измерения, команды запуска и остановки автоматического измерения, а также команды работы в векторном режиме (с коммутацией подмагничивающего поля), либо просто в режиме измерения модуля магнитного поля.

1.5.4.2. Для начала проанализируем работу в варианте модульного магнитометра, то есть процесс измерения модуля внешнего магнитного поля. Возможна работа в двух режимах: однократное измерение или режим

автоматического запуска. Процесс измерения в обоих случаях одинаков. Временные диаграммы представлены на рис. 7. Следует отметить, что в режиме автоматического запуска с цикличностью менее 3 с при формировании сигнала используется режим синхронной поляризации. В этом режиме для исключения потери протонной намагниченности рабочего вещества осуществляется фазовая привязка начала поляризации нового цикла измерения к сигналу предыдущего.

- По команде на измерение начинается счет тактовых импульсов опорного генератора, а также подается питание на НЧ катушки датчика и ВЧ генератор, вызывая процесс поляризации рабочего вещества. В течение временного интервала $t_{пол}$ формируется макроскопическая протонная намагниченность рабочего вещества в направлении оси НЧ катушек датчика.
- По окончании поляризации коммутатор отключает поляризующий ток и подключает НЧ катушки к входу усилителя. На этом этапе предусматривается дополнительное время задержки измерения $t_{зад}$ для завершения во входном тракте переходных процессов, возникающих после отключения подмагничивающего тока.
- По завершению задержки формируется окно длительностью $t_{изм}$, внутри которого происходит регистрация и оцифровка переходов через ноль сигнала свободной прецессии компоненты протонной намагниченности параллельной оси НЧ катушек. При переходе сигнала уровня компарирования в определенном направлении контроллер фиксирует показания счетчика опорных импульсов кварцевого генератора и запоминает это значение во внутреннюю память, суммируя при этом общее количество переходов.
- Оцифрованные данные после окончания $t_{изм}$ обрабатываются контроллером с целью поиска наиболее вероятного периода сигнала прецессии. При этом по разбросу оцифрованных периодов сигнала алгоритм обработки адаптируется под конкретные условия измерения, в частности, под большой градиент измеряемого поля, который вызывает укорочение сигнала.

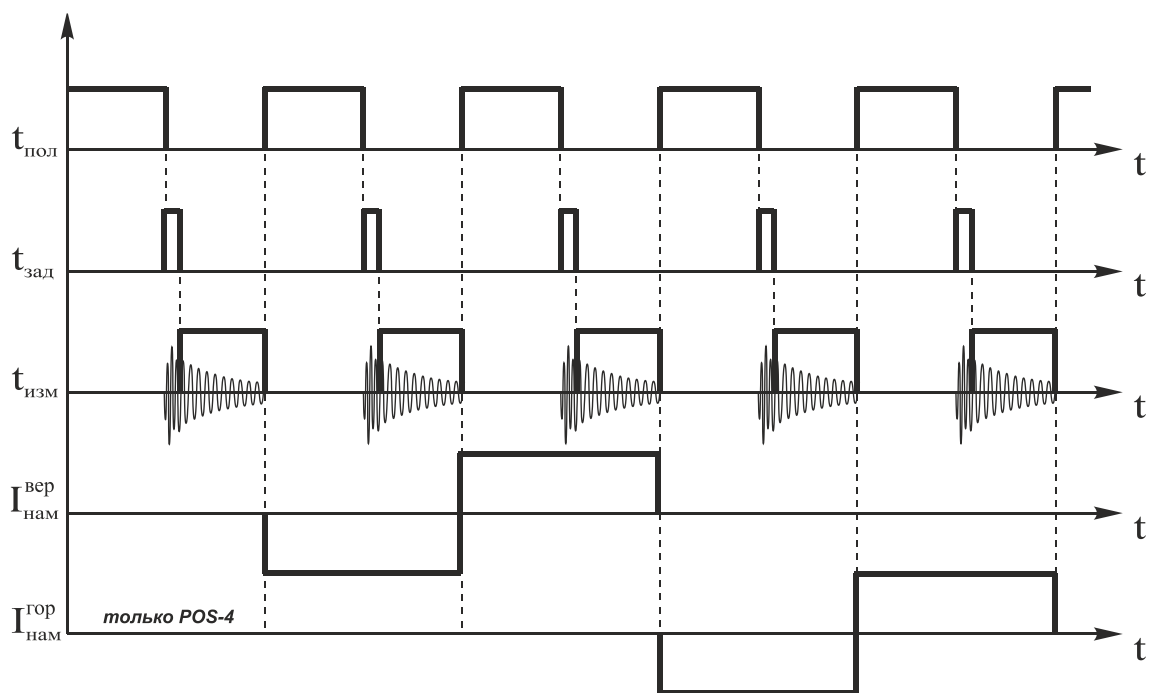


Рис. 7. Временная диаграмма работы магнитометра

1.5.4.3. При определении компонент внешнего поля измеряется модуль суммарного магнитного поля: внешнего и подмагничивающего. Однократный цикл нахождения компоненты поля включает в себя измерение модуля внешнего поля и двух измерений с включением коммутируемого тока $I_{\text{нам}}^{\text{вер}}$ в вертикальной подмагничивающей системе (величина тока при коммутации остается неизменной). В векторном магнитометре POS-4 в режиме определения полного вектора цикл работы включает в себя уже пять модульных измерений: измерение внешнего поля и четыре измерения поля с включением перекоммутируемых токов: $I_{\text{нам}}^{\text{вер}}$ в вертикальной (соленоид) и $I_{\text{нам}}^{\text{гор}}$ горизонтальной (кольца) подмагничивающих системах (см. рис.7).

Включение, выключение и коммутация токов в системе подмагничивания синхронизовано с рассмотренным ранее циклом работы модульного магнитометра, как показано на диаграммах.

1.5.4.4. В автоматическом режиме может быть включено подмагничивающее поле в следующих режимах: постоянный ток подается в одну из подмагничивающих систем, подмагничивающий ток циклически перекоммутируется и выключается в системе вертикальной компоненты,

аналогично в системах вертикальной и горизонтальной компоненты. Режим подачи тока в подмагничивающую систему и цикличность запуска измерения задается командами по порту с внешнего устройства.

1.5.4.5. Цикличность запуска автоматического измерения модуля поля (в том числе с подмагничиванием) может составлять $1/5, 1/4, 1/3, 1/2, 1, 2, 3, 4, \dots$ сек.

1.5.4.5. Вычисленные значения модуля магнитного поля с подмагничиванием и без, в отсутствие сообщения о большом отношении шум/сигнал, используется для автоматической подстройки приемного контура датчика в дальнейших измерениях.

1.5.4.6. При наличии низкого питания измерение магнитометром не производится и по порту выдается сообщение о низком питании.

1.5.4.7. Данные, полученные в измерении (модуль индукции магнитного поля, время начала измерения, информация о качестве, условиях измерения, информация о включенных/выключенных токах подмагничивания и их направлениях) через порт выводятся на внешнее устройство.

1.6. Средства измерения, инструмент и принадлежности

1.6.1. Магнитометр является измерительным устройством, управление и связь с которым осуществляется только по последовательному RS-232 порту. Для функционирования магнитометра необходим внешний блок управления и регистрации с соответствующим портом и поддержкой протокола обмена данными, описанного в Приложении 2. В качестве такого блока могут выступать специализированные устройства, предназначенные для обслуживания магнитометра, либо стандартный персональный компьютер с соответствующим программным обеспечением, которое может разрабатываться как самим потребителем, так и организацией-изготовителем по специальному заказу.

1.6.2. С целью обеспечения заявленной точности и корректности компонентных измерений в процессе работы магнитометры должны быть сориентированы в пространстве как по вертикали, так и по азимуту (см. пункты 1.2.2 и 2.2.4). Поэтому в комплект входит трегер (подставка) для крепления и

пространственной юстировки магнитной системы. Также прилагается ориентир-буссоль для азимутальной ориентации прибора на магнитный север.

1.6.3. По согласованию с организацией-изготовителем магнитометры могут доукомплектовываться дополнительными немагнитными устройствами ориентирования (например, электронными уровнями, зрительными трубами и т. д.), позволяющими проводить более точные угловые настройки.

1.7. Маркировка

Маркировка магнитометра наносится гравированием или шелкографией на боковую поверхность корпуса блока электроники. Она включает обозначение магнитометра «POS-3» (трехкомпонентный вариант «POS-4»), фирменный знак, а также аббревиатуру организации производителя «QMLab URFU» (Лаборатория квантовой магнитометрии Уральского федерального университета – УрФУ), номер прибора.

1.8. Упаковывание

Для хранения и транспортировки магнитометра предусмотрен пластиковый или деревянный ящик.

Эксплуатационная документация помещена в полиэтиленовый чехол.

2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПО НАЗНАЧЕНИЮ

2.1. Эксплуатационные ограничения

Таблица 6

№ п/п	Характеристика	Допустимое значение
1	Температура окружающего воздуха, °С	-10 ÷ +60
2	Относительная влажность воздуха, %	до 90 без конденсации
3	Ударные и вибрационные нагрузки	не допускаются
4	Работа в агрессивных средах	не допускается
5	Градиент модуля индукции магнитного поля, не более, нТл/м	20000
6	Угол ориентации оси цилиндра первичного преобразователя относительно направления магнитного поля, не менее, град	±45

2.2. Подготовка магнитометра к работе

2.2.1. Меры безопасности при подготовке магнитометра

2.2.1.1. Прибор не имеет источников повышенной опасности в условиях эксплуатации и хранения и при отсутствии механических повреждений.

2.2.1.2. Не использовать магнитометр и кабели при наличии механических повреждений.

2.2.1.3. Не допускать прогрева магнитометра выше +70°С.

2.2.1.4. Не производить измерений магнитометром без подключенного первичного преобразователя.

2.2.2. Объем и последовательность внешнего осмотра

2.2.2.1. Порядок проведения внешнего осмотра магнитометра:

- Проверить укомплектованность прибора кабелями и руководством по эксплуатации;
- Проверить отсутствие на магнитометре и кабелях механических повреждений;
- Проверить отсутствие при наклонах магнитометра характерных звуков, указывающих на наличие в корпусах отсоединившихся частей;

- Проверить состояние разъемов;
- При выявлении каких-либо признаков неисправности магнитометра и его недоукомплектованности использование магнитометра запрещается.

2.2.2.2. Внешний осмотр магнитометра проводится оператором перед началом работы, а также после хранения или транспортирования магнитометра.

2.2.3. Правила и порядок осмотра и проверки готовности магнитометра к использованию

2.2.3.1. Если прибор длительное время транспортировался или хранился в неотапливаемом складском помещении в зимнее время к проверке прибора можно приступить только после 8-часовой выдержки в сухом отапливаемом помещении.

2.2.3.2. Выполнить внешний осмотр магнитометра согласно п. 2.2.2.

2.2.3.3. Соединить кабелями магнитную систему и блок электроники (см. рис.5).

2.2.3.4. Подключить электронный блок магнитометра посредством приложенного кабеля питания-связи к порту выключенного внешнего устройства. Внешнее устройство должно поддерживать интерфейс связи, описанный в Приложении 2.

2.2.3.5. Подсоединить клеммы кабеля питания-связи к источнику постоянного тока напряжением $10 \div 15$ В, соблюдая полярность. Следует отметить, что в магнитометре существует защита от подключения питания с неправильной полярностью.

2.2.3.6. Выбрать место, свободное от влияния сильных промышленных помех и градиентов (не более 200 нТл/м). Так как магнитометр является высокоточным измерителем, при компонентных измерениях необходимо также обеспечить его неподвижность и отсутствие температурных градиентов в месте его нахождения. Установить магнитометр, сориентировав оптимальное положение первичного преобразователя (пункт 1.2.2). Включить внешнее устройство. Если внешнее устройство не специализировано для работы с магнитометром, например, персональный компьютер, необходимо запустить

программное обеспечение, предназначенное для обслуживания POS. Связь между внешним устройством и магнитометром должна установиться за время не более чем 10 секунд. Следует учесть, что, если внешнее устройство при начальной установке связи не инициализирует рабочий поддиапазон и часы магнитометра, при подключении питания магнитометр установит рабочий поддиапазон со средним полем 55000 нТл, показания часов при этом будут иметь неопределенное значение.

2.2.3.7. Произвести серию измерений. Проконтролировать наличие сообщений от магнитометра о нестандартных условиях измерения и величины оценки модуля случайной погрешности измерения, рассчитываемой в магнитометре при каждом измерении. В случае сообщений о низком питании необходимо заменить источник питания и повторить процедуру проверки. При повторяющихся сообщениях об ошибке настройки рабочего поддиапазона магнитометра можно попытаться настроить его «вручную», послав с внешнего устройства соответствующую команду со значением предполагаемого модуля поля. При наличии других сообщений необходимо изменить местоположение проверки, либо ориентацию первичного преобразователя.

2.2.3.8. Повторить процедуру тестирования магнитометра, подав ток в систему подмагничивания. Опробовать все возможные варианты включения тока. При отсутствии сообщений о нестандартных условиях измерения и при значениях оценки модуля случайной погрешности ниже 0,1 нТл можно считать, что магнитометр готов к работе.

2.2.3.9. Проверку магнитометра необходимо проводить каждый раз перед началом работы.

2.2.3.10. Назначение и расположение разъемов магнитометра описано в Приложении 1.

2.2.3.11. Для проверки работоспособности магнитометра можно использовать тестовое программное обеспечение для стандартного компьютера, прилагаемое к магнитометру.

2.2.4. Указания об ориентации магнитометра

Первичный преобразователь магнитометра должен быть сориентирован относительно направления измеряемого магнитного поля. Оптимальная ориентация указана в пункте 1.2.2. Отклонение от оптимальной ориентации приводит к уменьшению сигнала первичного преобразователя, то есть к увеличению погрешности прибора.

В случае компонентных измерений необходимо обеспечить вертикальность установки с помощью системой юстировки, состоящей жидкостных уровней, и трегера (подставки), на который помещен магнитометр.

В случае магнитометра POS-4 для горизонтальной системы подмагничивания желательно выбрать ориентацию оси колец в направлении перпендикулярном магнитному северу (например, с помощью ориентир-буссоли), что обеспечивает оптимальное положение первичного преобразователя.

2.2.5. Перечень возможных неисправностей в процессе подготовки и рекомендации по действиям при их возникновении

Таблица 7

Неисправность	Действия по устранению	Кто выполняет
Механическое повреждение	Обратитесь в организацию-изготовитель для выяснения возможности починки или замены неисправных частей.	–
Отсутствие связи по порту магнитометра с внешним устройством	Повторите попытку проверки по п. 2.2.3.	Эксплуатационный персонал
	Проверьте состояние и надежность соединения разъемов, а также полярность подключения источника питания.	
	Проконтролируйте напряжение питания. При напряжении ниже 10,5 В замените источник питания.	
	Прозвоните кабель связи. При обрыве исправить повреждение.	
	Проверить работоспособность порта внешнего устройства. При обнаружении неисправности исправить повреждение или заменить внешнее устройство.	
	Проконтролируйте ток потребления в период начальной инициализации магнитометра (сразу после включения). В норме ток потребления составляет 20 ÷ 40 мА. Если ток отсутствует, обратитесь в организацию-изготовитель.	
Сообщение об отсутствии сигнала	Переориентируйте первичный преобразователь. Возможна неудачная его ориентация относительно направления поля.	Эксплуатационный персонал
	Измеряемое поле не соответствует рабочему поддиапазону магнитометра. Установить предполагаемое значение модуля поля «вручную» с внешнего устройства.	
	Наличие большого градиента. Выберите другое местоположение для проверки.	
	Прозвоните кабель первичного преобразователя (только для датчика с гибким кабелем). В случае обрыва исправить повреждение.	
	Проконтролируйте ток потребления магнитометра в период поляризации (после команды на измерение). В норме ток потребления составляет 200 ÷ 500 мА. Если ток отсутствует, обратитесь в организацию-изготовитель.	
Разброс показаний магнитометра	Переориентируйте первичный преобразователь. Возможна неудачная его ориентация относительно направления поля.	Эксплуатационный персонал
	Наличие большого градиента поля или помех. При компонентных измерениях наличие большого температурного градиента или подвижность прибора. Выберите другое местоположение для проверки.	
	Измеряемое поле не соответствует рабочему поддиапазону магнитометра. Установить предполагаемое значение модуля поля «вручную» с внешнего устройства.	
	Проконтролируйте напряжение питания с включенным магнитометром. При напряжении ниже 10,5 В замените источник питания.	

2.3. Порядок работы

2.3.1. Выполнить проверку работоспособности по пункту 2.2.3.

2.3.2. Если это необходимо, перед началом выполнения измерительных работ установить дату и точное время во внутренние часы магнитометра, подав соответствующую команду с внешнего устройства.

2.3.3. Командой определить режим работы магнитометра: измерение модуля индукции магнитного поля; измерение модуля поля с включенным током в подмагничивающей системе (обычно используется для настройки соответствующего рабочего поддиапазона); серия измерений для определения модуля поля и его вертикальной компоненты; серия для определения модуля поля, вертикальной и горизонтальной компоненты.

2.3.4. На рабочей точке обеспечить правильную ориентацию магнитометра, согласно пункту 2.2.4.

2.3.5. После ориентирования магнитометра серией тестовых измерений необходимо убедиться, что датчик правильно настроен на измеряемое поле. Настройка рабочего поддиапазона магнитометра (приемного контура первичного преобразователя) по измеренному значению индукции магнитного поля, в том числе с включенным подмагничиванием, происходит автоматически при отсутствии сообщения о низком отношении сигнал/шум. В случае невозможности автоматической настройки (проявляется в сильном разбросе значений поля и повторяющихся сообщениях об ошибке настройки рабочего поддиапазона магнитометра) необходимо «вручную» на внешнем устройстве набрать ожидаемое значение модуля поля и подать команду настройки поддиапазона.

2.3.6. При проведении съемки в режиме однократного измерения запуск производится соответствующей командой. В этом случае прибор через порт выдает ответ, в котором содержатся данные, полученные в измерении(ях), спустя некоторое время. После команды измерения модуля внешнего поля – время будет порядка 3-х секунд. После запуска серии измерений для определения вертикальной

(горизонтальной) компоненты задержка ответа составит время порядка 9-ти секунд, а после запуска измерений для определения полного вектора – 15 секунд.

2.3.7. При проведении съемки в режиме автоматического запуска измерений установка цикличности, старт и остановка измерений производится соответствующими командами. После команды старт автоматического измерения с заданной цикличностью магнитометр периодически проводит измерения и по запросу посылает через порт во внешнее устройство полученные данные. По команде остановка магнитометр прекращает измерения.

2.3.8. При использовании режима автоматического запуска следует учитывать, что:

- Начало измерения синхронизовано с началом секунды по встроенным часам магнитометра;
- После старта первое измерение происходит с некоторой задержкой (порядка 2-х секунд).

2.3.9. Во время съемки необходимо:

- Контролировать состояние источника питания;
- Обеспечить неподвижность прибора;
- Создать условия для стабилизации температуры окружающей среды и отсутствия температурного градиента;
- Не допускать грубого (более 45°) отклонения оси цилиндра первичного преобразователя от оптимального пространственного положения;
- Внимательно анализировать дополнительную информацию, посылаемую магнитометром, о качестве (по величине оценки модуля случайной погрешности измерения, рассчитываемой в каждом измерении) и нестандартных условиях измерения (по поступающим сообщениям, см. таблицы 4, 8).

2.3.10. Возможные причины сообщений, выдаваемых магнитометром:

Таблица 8

№ п/п	Сообщение	Возможная причина
1	Низкое напряжение питания	Разряд батарей (аккумуляторов)
2	Нет сигнала	Неверная настройка рабочего поддиапазона
		Неудачная ориентация первичного преобразователя
		Большой градиент магнитного поля
		Обрыв в кабеле первичного преобразователя
3	Значение поля вне диапазона измерений	Вблизи магнитометра находятся сильно намагниченные предметы
		Неудачная ориентация подмагничивающей системы (вне диапазона модуль суммы внешнего и подмагничивающего поля)
4	Низкое отношение сигнал/шум	Неверная настройка рабочего поддиапазона
		Неудачная ориентация первичного преобразователя
		Сильные внешние помехи
		Большой градиент магнитного поля
5	Укорочение длительности сигнала	Неверная настройка рабочего поддиапазона
		Неудачная ориентация первичного преобразователя
		Большой градиент магнитного поля
6	Значение поля вне установленного рабочего поддиапазона	Неверная настройка рабочего поддиапазона
		Значительное изменение поля в процессе съемки
<p>Сообщения в подпунктах 1 – 2 сигнализируют об ошибках, возникших в ходе проведения измерения. Сообщения в подпунктах 4 – 6 предупреждают о возможных причинах снижения качества измерения.</p>		

2.3.11. Можно считать проведенное измерение удовлетворительным при отсутствии сообщений и при оценке случайной погрешности результата измерения модуля поля (с подмагничиванием или без) ниже 0,1 нТл. При появлении сомнительного результата желательно провести повторное измерение, либо изменить условия измерения.

2.3.12. По окончании работы отключить магнитометр от источника питания и внешнего устройства и уложить в ящик.

Транспортирование магнитометра производить только в ящике.

2.3.13. Меры безопасности при использовании магнитометра по назначению:

- магнитометр не имеет источников повышенной опасности в условиях эксплуатации и при отсутствии механических повреждений;
- магнитометр является сложным электронным и физическим прибором, поэтому необходимо оберегать магнитометр от сотрясений и ударов;
- не использовать магнитометр и кабели при наличии видимых механических повреждений;
- не прогревать магнитометр выше +70°C;
- не производить измерений магнитометром без подключенного первичного преобразователя.

3. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ

3.1. Общие указания

3.1.1. С целью обеспечения работоспособности при эксплуатации и хранении для магнитометра проводят следующие виды технического обслуживания:

- текущее профилактическое обслуживание;
- первичная и периодическая калибровка.

При проведении последнего вида обслуживания должны делаться соответствующая запись в паспорте.

3.1.2. Не допускаются вскрытие корпусов магнитометра и разборка подмагничивающей системы. В случае неисправности магнитометра ремонт первичного преобразователя, подмагничивающей системы и электронного блока производится только организацией-изготовителем, либо специализированными организациями или специалистами, сертифицированными организацией-изготовителем.

3.1.3. Не допускается включение магнитометра при отсоединенном от электронного блока первичном преобразователе.

3.2. Порядок технического обслуживания

3.2.1. Текущее профилактическое обслуживание

3.2.1.1. Текущая профилактика проводится при систематической эксплуатации магнитометра с целью поддержания его работоспособности. Профилактику проводят перед и после применения магнитометра по назначению.

3.2.1.2. Текущая профилактика включает в себя следующие виды работ:

- внешний осмотр магнитометра, согласно пункту 2.2.2;
- проверка и при необходимости зачистка клемм источника питания и кабеля питания;
- удаление при помощи кисти и фланелевой ткани с поверхности прибора грязи, пыли, росы и т. п.

3.2.1.3. Перед и после транспортирования, а также после длительного хранения проводятся дополнительные работы:

- при необходимости расконсервацию магнитометра и его принадлежностей;
- проведение работ согласно пункту 3.2.1.2;
- выполнение проверки работоспособности (пункт 2.2.3) магнитометра.

3.2.2. Первичная и периодическая калибровка

Первичная и периодическая калибровка магнитометра производится сертифицированными специалистами в специализированных условиях. Первичная калибровка проводится при поставке магнитометра. Периодическую калибровку рекомендуется проводить ежегодно.

3.3. Контроль параметров магнитометра

3.3.1. Проверка работоспособности магнитометра

3.3.1.1. Опробование прибора выполняется эксплуатационным персоналом.

3.3.1.2. Стандартная процедура опробования включает в себя следующие виды работ:

- Расположить магнитометр в оптимальном положении в месте свободном от влияния промышленных помех, температурных градиентов и градиентов магнитного поля;
- Стабилизировать температуру в области расположения магнитной системы;
- Включить магнитометр и внешнее устройство, сопряженное с ним;
- Произвести серию контрольных измерений;
- Оценить величины случайной погрешности измерений модуля и компонент вектора магнитного поля. Значения не должны превышать модулей среднего квадратического отклонения случайной составляющей погрешности измерений, указанных в таблице 1, и должны отсутствовать сообщения о нестандартных условиях измерения.

3.3.1.3. Для потребителей, предъявляющих повышенные требования к абсолютным показаниям магнитометра, предлагается методика внесения поправок в показания прибора, описанная в Приложении 3.

3.3.2. Опробование и первичная калибровка организацией-изготовителем

3.3.2.1. Опробование и первичная калибровка, производимая организацией-изготовителем, осуществляется при поставке магнитометра или по специальному заказу потребителя. Во-первых, выполняется тестирование первичного преобразователя (оверхаузеровского датчика) на специализированном лабораторном оборудовании, которое включает в себя образцовый магнитометр, лабораторную меру магнитного поля, состоящую из пермаллового магнитного экрана с соленоидальным источником магнитного поля (однородность в объеме датчика POS – 0,01 %). Вторая часть работ посвящена поверке (и получению поправок, см. Приложение 3) магнитометров в режиме компонентных измерений. Проводится либо на мере вектора магнитного поля, либо в условиях, обеспечивающих однородное и относительно стабильное магнитное поле (например, на обсерваториях магнитного поля) с привлечением образцового векторного магнитометра.

Цель указанных процедур – контроль основных параметров магнитометра: основной абсолютной и случайной погрешности модульных и компонентных измерений, энергопотребления магнитометра и его рабочего диапазона, величины протонного сигнала первичного преобразователя.

3.3.2.2. Процедура, проводимая организацией-изготовителем на лабораторной мере поля, включает в себя следующие виды работ:

- подать питание на соленоид лабораторного эталона магнитного поля;
- по показаниям образцового магнитометра проконтролировать отсутствие дрейфа магнитного поля в эталоне в пределах 0,1 нТл за 30 минут (время установления рабочего режима магнитного эталона от 10 до 45 минут);
- установить в магнитном эталоне поле 20000 нТл;

- первичный преобразователь тестируемого магнитометра POS-1 поместить в зону однородности магнитного эталона, ось цилиндра преобразователя перпендикулярна оси соленоида магнитного эталона;
- включить тестируемый магнитометр и внешнее устройство, сопряженное с ним;
- провести 15 – 20 измерений, записать результаты;
- повторить процедуру для эталонных полей 30000 нТл, 40000 нТл, 50000 нТл и так далее до 100000 нТл;
- обработать результаты по следующим формулам:

$$B_{и} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n B_i ,$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (B_{и} - B_i)^2} ,$$

$$\Delta_s = B_{и} - B_{д} ,$$

где

B_i – результат i -го измерения магнитной индукции в серии,

n – число измерений в серии,

$B_{и}$ – среднее арифметическое значение в серии из n измерений,

Δ_s – систематическая погрешность измерения,

$B_{д}$ – действительное значение магнитной индукции,

σ – среднее квадратическое отклонение случайной составляющей погрешности;

- в каждой серии измерений Δ_s и σ не должны превышать значения основной систематической погрешности и модуля среднего квадратического отклонения случайной составляющей погрешности, соответственно, указанных в таблице 1;
- подсоединить концы аналогового выхода контроля сигнала магнитометра к осциллографу;

- устанавливая значения поля магнитного эталона 20000 нТл, 50000 нТл и 100000 нТл, провести серию измерений, контролируя амплитуду на аналоговом выходе магнитометра. В норме начальная амплитуда должна составить 1 – 2 В по показаниям осциллографа;
- в произвольном поле провести серию измерений в циклическом режиме с периодом 3 секунды, контролируя напряжение и ток потребления прибора при помощи ампервольтметра с погрешностью не хуже 5 %. Пиковый ток в момент поляризации при напряжении питания 15 В должен составлять величину 0,3 – 0,4 А и соответственно 0,5 – 0,6 А при 10 В напряжения питания.

3.3.2.3. Процедура поверки магнитометров в режиме компонентных измерений аналогична предыдущей с той лишь разницей, что сличаются полученные значения компонент, рассчитанных по формуле п.1.5.1.3, с образцовым компонентным магнитометром. При этом допускается корректировка показаний магнитометра внесением соответствующих поправок, см. Приложение 3.

3.3.3. Калибровка

Калибровка процессорного оверхаузеровского датчика – магнитометра POS-3,4 выполняется специализированными организациями согласно методике калибровки. При использовании магнитометра в качестве обсерваторского оборудования допускается проводить калибровку прибора по методикам, предусмотренным в системе INTERMAGNET.

3.4. Техническое освидетельствование

Рекомендуется проходить техническое освидетельствование процессорного оверхаузеровского магнитометра POS-3,4 один раз в год при калибровке прибора.

4. ХРАНЕНИЕ

Магнитометр POS-3,4 должен храниться в укладочном ящике в закрытом вентилируемом помещении при температуре от +1°C до +40°C. Максимально допустимая влажность воздуха не должна превышать 80 % при температуре от +15°C до +25°C. В воздухе не должно быть пыли и примесей, вызывающих коррозию и нарушение электрической изоляции.

5. ТРАНСПОРТИРОВАНИЕ

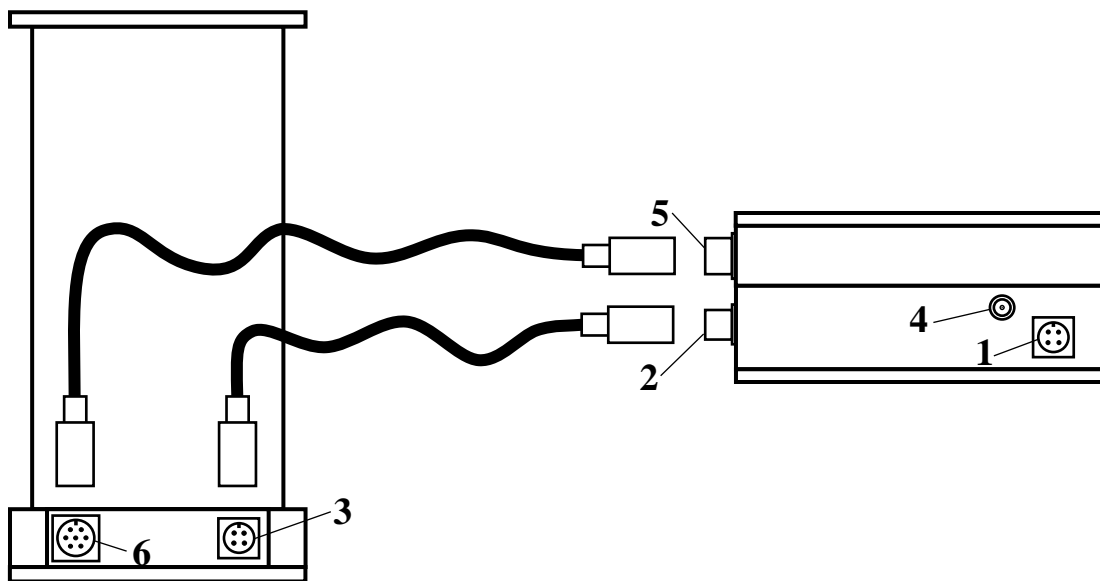
Транспортирование магнитометра POS-3,4 должно производиться в транспортной таре при температуре от -50°C до +60°C любым видом закрытого транспорта в соответствии с правилами перевозки грузов, действующими на этих видах транспорта.

6. УТИЛИЗАЦИЯ

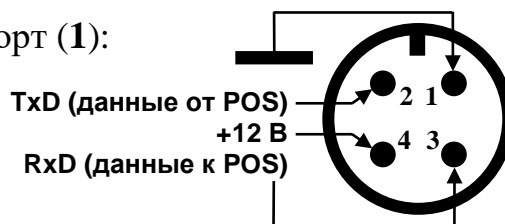
Утилизацию магнитометра POS-3,4 производит потребитель.

При утилизации необходимо выполнять требования правил безопасности при работе с химическими реактивами и легковоспламеняющимися веществами.

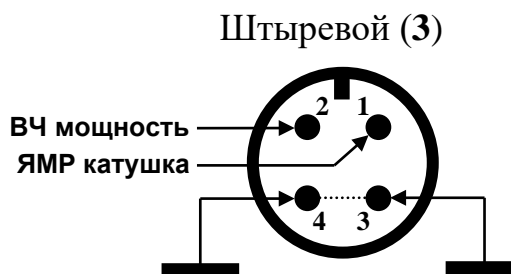
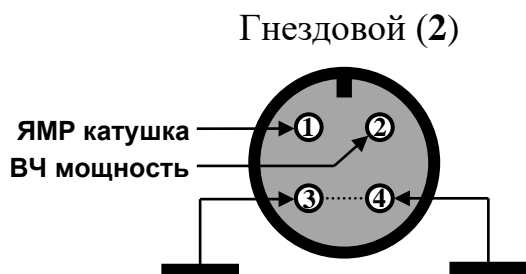
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. РАЗЪЕМЫ ПОДМАГНИЧИВАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ И ЭЛЕКТРОННОГО БЛОКА



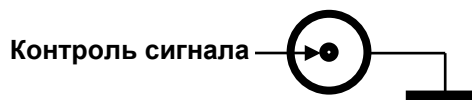
- Штыревой разъем питание + RS-232 порт (1):



- Разъемы датчика POS:



- Разъем контроля сигнала (4):



- Разъемы магнитной системы:

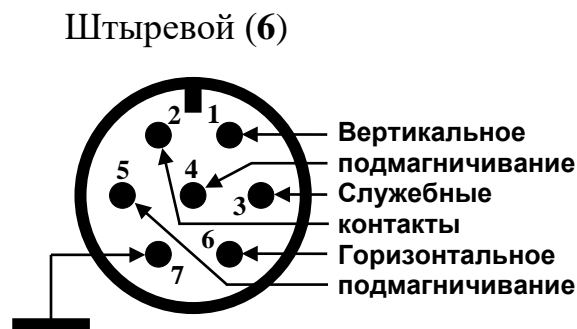
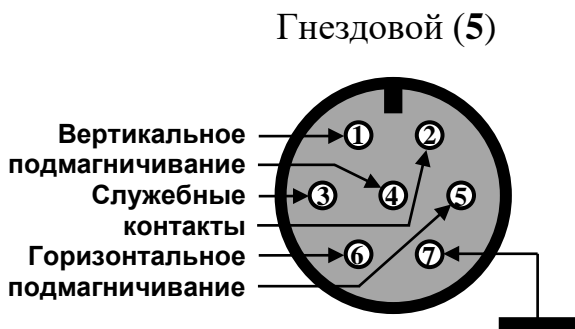


Рис. 8. Разъемы POS-3,4

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ОБМЕН ДАННЫМИ С МАГНИТОМЕТРОМ

Компонентный векторный магнитометр POS-3 и векторный магнитометр POS-4 состоят из модульного магнитометра POS-1, дополнительной системы создания вертикального подмагничивающего поля и, для магнитометра POS-4, системы создания горизонтального подмагничивающего поля. Для обеспечения аппаратной и программной совместимости со штатной системой сбора данных геомагнитных измерений стандарта ИНТЕРМАГНЕТ за основу протоколов обмена данными взят протокол модульного прибора POS-1, обеспечивающий регистрацию геомагнитных измерений с точностью, не уступающей зарубежным аналогам.

Аппаратная совместимость обеспечивается эквивалентностью типов разъемов и их распайки для векторных магнитометров с разъемом модульного прибора POS-1. На физическом уровне протокол обмена представляет собой последовательный интерфейс связи стандарта RS-232 со скоростью обмена данными 9600 бод, 8 бит данных с одним стоп-битом и без бита контроля четности. Аналогичный протокол используется штатной системой сбора данных для связи с модульным магнитометром POS-1.

На программном уровне протокол обмена данными разбит на три составляющие: протокол обмена данными модульного магнитометра POS-1 (основные команды управления), дополнительные команды управления системой создания вертикального подмагничивающего поля (дополнительные команды управления POS-3 и POS-4) и команды управления горизонтальным подмагничиванием (дополнительные команды управления POS-4). Такое разбиение обеспечивает программную совместимость со штатной системой сбора данных, поддерживающей все основные команды управления, и быструю адаптацию этой системы под нужды векторных приборов путем добавления недостающих команд.

Основные команды управления магнитометрами POS

Обмен данными между датчиком POS-3,4 и внешним устройством производится через последовательный порт RS-232. Для связи используются две линии порта RxD и TxD и соединение нуль-модемного типа. В данной модели датчика не поддерживается настройка скорости обмена и контроля четности принимаемых данных. Необходимо вести обмен данными в режиме асинхронной передачи на скорости 9600 бод. Формат передаваемого байта: 8 бит данных, 1 стоп бит, контроль четности отключен.

Далее по тексту при записи значений символьных констант, описании структур данных и функций будет использоваться синтаксис языка программирования C. Команды управления и ответы на их исполнение оформляются в виде блоков, передаваемых через порт связи. Формат блоков: Данные, Ограничитель. Ограничителем является символ 0x00 (NUL), следующий сразу после данных и служащий для разграничения отдельных блоков информации. Данные представляют 1 – 256 байт полезной информации, значения которых лежат в диапазоне от 0x20 до 0xFF, а также символ 0x1A (SUB), служащий для передачи байтов со значениями, лежащими в диапазоне от 0x00 до 0x1F. Наличие символа SUB означает, что для получения истинного значения следующего байта данных в блоке, полученное значение этого байта необходимо уменьшить на 0x80. Исключением из этого правила являются команды связи «ENQ» и «NAK». В них символ SUB не применяется.

Пример:

При приеме блока 0x73, 0x20, 0x1A (\equiv SUB), 0x81, 0x00 (\equiv NUL) полезной информацией является последовательность байт 0x73, 0x20, 0x01 (\equiv 0x81 – 0x80). Для передачи команды 0x62, 0x20, 0x01 необходимо оформить блок передачи 0x62, 0x20, 0x1A (\equiv SUB), 0x81 (\equiv 0x01 + 0x80), 0x00 (\equiv NUL) и передать его через последовательный порт.

Все команды управления датчиком придерживаются одной схемы обмена данными. Сущность ее состоит в следующем: с внешнего устройства передается допустимая команда, в случае успешного приема датчик выполняет требуемые

действия и передает ответ. При ошибке приема, либо ошибке в самой команде датчик игнорирует ее и ждет прихода следующей команды. Таким образом, в описанной выше схеме ответ на команду можно считать подтверждением ее исполнения, а сообщений об ошибках приема не существует.

Далее при описании команд используются следующие обозначения. Вся команда ограничивается квадратными скобками []. Строка, ограниченная символами одинарной кавычки ' является последовательностью символов АССИИ кода. Текстовая и двоичная информации разделены запятой. Символы '[] и разделительные запятые используются только для условных обозначений и не должны использоваться при формировании кода команды. Все пробелы в теле команды являются значимыми.

Команда **ENQ**

Синтаксис: [0x05] (при формировании блока символ SUB не используется).

По этой команде возвращается информация в текстовом виде о подключенном оборудовании длиной до 40 символов. Время исполнения команды – 300 мс.

Команда **NAK**

Синтаксис: [0x15] (при формировании блока символ SUB не используется).

По этой команде датчик повторно передает ответ на предыдущую команду. Возможно использование этой команды для восстановления информации в случае ошибок при приеме или передаче блоков данных. Время исполнения команды – 300 мс.

Команда **about**

Синтаксис: ['about'].

По этой команде возвращается краткая информация о производителе датчика в текстовой форме длиной до 256 символов. Время исполнения команды – 300 мс.

Команда **standby**

Синтаксис: ['standby on'] или ['standby off'].

Включает или отключает режим пониженного энергопотребления прибора. Ответом на выполнение является строка 'set standby on', либо 'set standby off' в зависимости от команды. Следствием включения режима пониженного энергопотребления является отключение линии TxD от источника питания –12 В на время отсутствия передачи данных от датчика к внешнему устройству. При использовании длинного соединительного кабеля между датчиком и внешним устройством и/или при наличии частых ошибок в приеме данных не рекомендуется включать режим пониженного энергопотребления. Значение по умолчанию – выключено. Время исполнения команды – 300 мс.

Команда **mode**

- Без параметров

Синтаксис: ['mode'].

Применяется для определения текущего режима обмена данными. Ответом на команду является строка 'mode is text' или 'mode is binary' в зависимости от установленного режима обмена данными между магнитометром и внешним устройством. Время исполнения команды – 300 мс.

- С параметром

Синтаксис: ['mode text'] или ['mode binary'].

Устанавливает текстовый или двоичный режим обмена данными между магнитометром и внешним устройством. Ответом на команду является строка

'set text mode' или 'set binary mode', соответственно. Режим обмена по умолчанию – двоичный режим. Время исполнения команды – 300 мс.

ВНИМАНИЕ! Формат приводимых далее команд и ответов на их исполнение зависит от установленного режима обмена данными между датчиком и внешним устройством.

Команда **time**

- Без параметров

Синтаксис: ['time'].

Применяется для определения времени встроенных часов магнитометра. Ответ на эту команду содержит информацию о состоянии встроенных часов магнитометра и зависит от режима обмена данными. Значение по умолчанию не определено. В текстовом режиме обмена данными ответом является строка символов в формате 'hh:mm:ss', где hh – часы, mm – минуты, ss – секунды. В двоичном режиме обмена данными ответом служит длинное целое (4 байта, старший байт первый), равное количеству секунд, прошедших с 1 января 1970 года до момента прихода команды. Время исполнения команды – 300 мс.

- С параметром

Синтаксис (текстовый режим): ['time hh:mm:ss'].

Синтаксис (двоичный режим): ['time ',Prm].

Здесь hh – часы, mm – минуты, ss – секунды, Prm – длинное целое (4 байта, старший байт первый), равное количеству секунд, прошедших с 1 января 1970 года или любому другому числу, если не предусматривается переключение режима обмена данными. В дальнейшем, каждую секунду это число будет увеличиваться на 1. Устанавливает внутренний счетчик времени магнитометра. Ответом на исполнение этой команды является строка 'set time ok'. Реально установка времени произойдет по переднему фронту на линии RxD магнитометра начале передачи следующей команды со стороны системы сбора данных. Время исполнения команды – 300 мс.

Команда **date**

- Без параметров

Синтаксис: ['date'].

Применяется для определения даты встроенных часов магнитометра. Ответом является строка символов в формате 'mm-dd-yy', где mm – месяц, dd – день месяца, yy – год. Команда поддерживается только в текстовом режиме, так как в двоичном режиме установку и получение даты реализует команда time. Значение по умолчанию не определено. Время исполнения команды – 300 мс.

- С параметром

Синтаксис: ['date mm-dd-yy'].

Здесь mm – месяц, dd – день месяца, yy – год. Устанавливает текущую дату, не изменяя значения времени. Ответом на исполнение этой команды является строка 'set date ok'. Команда поддерживается только в текстовом режиме, так как в двоичном режиме установку и получение даты реализует команда time. Время исполнения команды – 2,5 сек.

Команда **range**

- Без параметров

Синтаксис: ['range'].

Возвращает текущее значение границ рабочего поддиапазона магнитометра в нТл. Значение по умолчанию соответствует рабочему поддиапазону с центральным полем равным 55000 нТл. Формат ответа зависит от режима обмена данными. В текстовом режиме ответом служит строка 'range MIN – MAX', где MIN – число равное минимальному значению поля рабочего поддиапазона в нТл, MAX – число равное максимальному значению поля рабочего поддиапазона в нТл. В двоичном режиме ответом является структура {long MinField; long MaxField;} (8 байт, старший байт каждого длинного целого первый). Значения полей соответствуют значениям нижней и верхней границ рабочего поддиапазона в нТл. Время исполнения команды – 300 мс.

- С параметром

Синтаксис (текстовый режим): ['range CENTER'].

Синтаксис (двоичный режим): ['range ',Center].

Здесь CENTER – число равное требуемому значению центрального поля рабочего поддиапазона в нТл, Center – длинное целое (4 байта, старший байт первый) равное требуемому значению центрального поля рабочего поддиапазона в нТл. Устанавливает текущий рабочий поддиапазон измерения магнитного поля по значению параметра, соответствующего требуемому значению центрального поля рабочего поддиапазона в нТл. В текстовом режиме ответом является строка 'set range MIN – MAX', где MIN и MAX – числа равные реальным значениям нижней и верхней границ установленного рабочего поддиапазона в нТл. В двоичном режиме обмена данными ответом является структура {long MinField; long MaxField;} (8 байт, старший байт каждого длинного целого первый). Значения полей структуры соответствуют реальным значениям нижней и верхней границ установленного рабочего поддиапазона в нТл. Время исполнения команды – 300 мс.

Команда **run**

Синтаксис: ['run'].

Запускает измерение модуля магнитной индукции. Время исполнения команды – 4000 мс. Ответ зависит от установленного режима обмена данными. В текстовом режиме возвращается результат измерения в виде строки в формате:

'FIELD + – QMC pT [STATE] mm-dd-yy hh:mm:ss.pph',

где

FIELD – значение модуля магнитной индукции в пТл,

QMC – оценка модуля случайной погрешности измерения при доверительной вероятности 0,68 в пТл (оценка СКО измерений),

STATE – состояние измерения (представление байта в

шестнадцатеричном формате),

mm-dd-yy – день-месяц-год измерения;

hh:mm:ss – час:минута:секунда начала измерения;

pph – сотая доля секунды, относящиеся к времени начала измерения.

В двоичном режиме возвращается результат в виде структуры (12 байт, старший байт двойных слов, слов и длинных целых первый):

{DWORD field; WORD qmc; BYTE state; long time; BYTE pph;},

где

field – значение модуля магнитной индукции в пТл;

qmc – оценка модуля случайной погрешности измерения при доверительной вероятности 0,68 в пТл (оценка СКО измерений)

state – состояние измерения;

time и pph – время начала измерения.

Состояние измерения представляет собой байт информации, каждый бит которого имеет значение, представленное в таблице (см. также таблицы 4, 8):

Таблица 10

Бит	Расшифровка
7	значение магнитного поля можно выводить на дисплей
6	низкое напряжение питания (измерение не проводилось)
5	нет сигнала (измерение не проводилось)
4	результат не попадает в пределы 20000 – 100000 нТл
3	зарезервирован
2	низкое отношение сигнал/шум
1	укорочение длительности сигнала
0	значение поля не соответствует установленному рабочему поддиапазону

Байт сообщения о состоянии может быть представлен в шестнадцатеричном (HEX) формате. В этом случае расшифровку значения байта можно вести независимо по старшему (сообщения об ошибках) и младшему разрядам (предупреждения), см. таблицу 11. Например, если байт сообщения о состоянии в HEX представлении – 86. Расшифровка данного сообщения по таблице: низкое отношение сигнал/шум в цикле измерения, длительность протонного сигнала вдвое меньше нормы.

Таблица 11

Значение		Расшифровка	
Старший разряд	Младший разряд		
1	–	Результат не попадает в пределы 20000 – 100000 нТл	Ошибки
2	–	Нет сигнала (измерение не проводилось)	
4	–	Низкое напряжение питания (измерение не проводилось)	
6	–	Низкое напряжение питания; Нет сигнала (измерение не проводилось)	
8	–	Отсутствие ошибок в измерении	
–	1	Значение поля вне установленного рабочего поддиапазона	Предупреждения
–	2	Укорочение длительности сигнала	
–	3	Укорочение длительности сигнала; Значение поля вне установленного рабочего поддиапазона	
–	4	Низкое отношение сигнал/шум	
–	5	Низкое отношение сигнал/шум; Значение поля вне установленного рабочего поддиапазона	
–	6	Низкое отношение сигнал/шум; Укорочение длительности сигнала	
–	7	Низкое отношение сигнал/шум; Укорочение длительности сигнала; Значение поля вне установленного рабочего поддиапазона	
7	F	Фатальная ошибка в измерении, вызванная сбоем в программе	

Команда **auto**

Синтаксис (текстовый режим): ['auto PRM'].

Синтаксис (Двоичный режим): ['auto ',Prm].

Здесь PRM – целое число, определяющее цикличность автоматического запуска последующих измерений в секундах. Допустимые значения: $1 \div 86400$, Prm – длинное целое (4 байта, старший байт первый). Если Prm > 0, то его значение определяет цикличность автоматического запуска измерения в секундах, если Prm < 0 то его абсолютное значение определяет частоту последующих измерений в Гц. Допустимые значения Prm в данной модели магнитометр: $-5 \div -1$ и $1 \div 86400$. Команда переводит магнитометр в режим автоматического измерения модуля индукции магнитного поля. В этом режиме магнитометр измеряет и передает результат в формате, аналогичном формату ответа при однократном измерении, с периодичностью (частотой) определяемой значением параметра команды. Начало каждого измерения синхронизовано с началом секунды по встроенным часам магнитометра. Ответом на команду в текстовом режиме является строка, содержащая результат первого измерения в формате аналогичном ответу на однократное измерение в текстовом режиме. В двоичном режиме ответом является структура данных, содержащая результат первого измерения в формате аналогичном формату ответа на одиночное измерение в двоичном режиме. Время исполнения команды – 5000 мс.

Команда остановки автоматических измерений

Как таковой данной команды не существует. Любая команда, поступившая в датчик, находящийся в режиме автоматического измерения, выводит его из этого режима. При этом дальнейшего анализа команды не происходит, а датчик отвечает также как при команде ENQ и переходит в режим ожидания следующей команды. Рекомендуется использовать команду ENQ для выхода из режима автоматического измерения. Время исполнения команды – 1500 мс.

ВНИМАНИЕ! При обнаружении недостатка в напряжении питания или фатальной ошибки в режиме автоматического измерения (бит 6 установлен или значение байта состояния равно 0x7F), датчик выйдет из режима автоматического измерения, предаст ответ, как по запросу ENQ и перейдет в режим ожидания следующей команды.

Дополнительные команды управления POS-3 и POS-4

Как компонентный магнитометр POS-3, так и векторный магнитометр POS-4 включают в себя систему создания вертикального подмагничивающего поля.

Система создания вертикального подмагничивания может находиться в трех состояниях:

- Вертикальное подмагничивающее поле выключено. В этом случае результатом измерения магнитометра является значение модуля магнитного поля в точке измерения;
- Вертикальное подмагничивающее поле включено в направлении от центра Земли (вверх). В этом случае результатом измерения является значение модуля векторной суммы истинного вектора магнитного поля в точке измерения и вектора подмагничивающего поля. В общем случае это значение существенно отличается от значения модуля магнитного поля в точке измерения. Следовательно, необходимо учитывать это отклонение при настройке приемного контура датчика;
- Вертикальное подмагничивающее поле включено по направлению к центру Земли (вниз). При этом остается справедливым все сказанное в предыдущем случае.

Таким образом, дополнительные команды управления включают в себя три команды управления направлением подмагничивающего поля и две команды установки значений дополнительных рабочих поддиапазонов датчика (для поля «вверх» и поля «вниз»). Эти команды используются для предварительной настройки прибора перед проведением измерений вариаций вертикальной компоненты вектора магнитного поля. То есть, включив подмагничивающее

поле по направлению «вверх» и проведя серию измерений модуля магнитного поля при помощи команды 'gun', определяется значение рабочего поддиапазона для этого направления. Полученное значение записывается по команде установки дополнительного рабочего поддиапазона «вверх». Так же настраивается поддиапазон для направления подмагничивающего поля «вниз». В дальнейшем эти значения будут использоваться магнитометром при проведении измерений с коммутацией подмагничивания для расчета компоненты вектора поля.

К указанному набору команд управления подмагничиванием добавлена команда автоматических измерений вертикальной компоненты вектора магнитного поля. При исполнении этой команды магнитометр самостоятельно управляет коммутацией вертикального подмагничивающего поля и настройкой рабочих поддиапазонов датчика по установленным заранее значениям.

Команда **vector**

Синтаксис: ['vector'].

Применяется для определения текущего состояния системы вертикального подмагничивания. Ответом на команду является строка 'vector is none' при отключенном подмагничивании, 'vector is up' при подмагничивании, включенном в направлении «вверх», и 'vector is down' при подмагничивании, включенном в направлении «вниз». Время исполнения команды – 300 мс.

Команда **vnone**

Синтаксис: ['vnone'].

Применяется для отключения поля, создаваемого вертикальной системой подмагничивания. Ответом на команду является строка 'set vector none'. Время исполнения команды – 300 мс.

Команда **vup**

Синтаксис: ['vup'].

Применяется для включения поля, создаваемого вертикальной системой подмагничивания, в направлении от центра Земли (вверх). Ответом на команду является строка 'set vector up'. Время исполнения команды – 300 мс.

Команда **vdown**

Синтаксис: ['vdown'].

Применяется для включения поля, создаваемого вертикальной системой подмагничивания, по направлению к центру Земли (вниз). Ответом на команду является строка 'set vector down'. Время исполнения команды – 300 мс.

Команда **vup range**

- Без параметров

Синтаксис: ['vup range'].

Возвращает текущее значение границ рабочего поддиапазона датчика в нТл при включении подмагничивающего поля «вверх». Значение по умолчанию соответствует рабочему поддиапазону со значением центрального поля равным 55000 нТл. Формат ответа зависит от режима обмена данными. В текстовом режиме ответом служит строка 'range MIN – MAX', где MIN – число равное минимальному значению поля рабочего поддиапазона в нТл, MAX – число равное максимальному значению поля рабочего поддиапазона в нТл. В двоичном режиме ответом является структура {long MinField; long MaxField;} (8 байт, старший байт каждого длинного целого первый). Значения полей структуры соответствуют значениям нижней и верхней границ рабочего поддиапазона в нТл. Время исполнения команды – 300 мс.

- С параметром

Синтаксис (текстовый режим): ['vup range CENTER'].

Синтаксис (двоичный режим): ['vup range ',Center].

Здесь CENTER – число равное требуемому значению центрального поля рабочего поддиапазона в нТл, Center – длинное целое (4 байта, старший байт первый) равное требуемому значению центрального поля рабочего поддиапазона

в нТл. Устанавливает текущий рабочий поддиапазон измерения магнитного поля при включении подмагничивающего поля «вверх» по значению параметра, соответствующего требуемому значению центрального поля рабочего поддиапазона в нТл. В текстовом режиме ответом является строка 'set range MIN – MAX', где MIN и MAX – числа равные реальным значениям нижней и верхней границ установленного рабочего поддиапазона в нТл. В двоичном режиме обмена данными ответом является структура {long MinField; long MaxField;} (8 байт, старший байт каждого длинного целого первый). Значения полей структуры соответствуют реальным значениям нижней и верхней границ установленного рабочего поддиапазона в нТл. Время исполнения команды – 300 мс.

Команда **vdown range**

- Без параметров

Синтаксис: ['vdow range'].

Возвращает текущее значение границ рабочего поддиапазона датчика в нТл при включении подмагничивающего поля «вниз». Значение по умолчанию соответствует рабочему поддиапазону со значением центрального поля равным 55000 нТл. Формат ответа зависит от режима обмена данными. В текстовом режиме ответом служит строка 'range MIN – MAX', где MIN – число равное минимальному значению поля рабочего поддиапазона в нТл, MAX – число равное максимальному значению поля рабочего поддиапазона в нТл. В двоичном режиме ответом является структура {long MinField; long MaxField;} (8 байт, старший байт каждого длинного целого первый). Значения полей структуры соответствуют значениям нижней и верхней границ рабочего поддиапазона в нТл. Время исполнения команды – 300 мс.

- С параметром

Синтаксис (текстовый режим): ['vdown range CENTER'].

Синтаксис (двоичный режим): ['vdown range ',Center].

Здесь CENTER – число равное требуемому значению центрального поля рабочего поддиапазона в нТл, Center – длинное целое (4 байта, старший байт первый) равное требуемому значению центрального поля рабочего поддиапазона в нТл. Устанавливает текущий рабочий поддиапазон измерения магнитного поля при включении подмагничивающего поля «вниз» по значению параметра, соответствующего требуемому значению центрального поля рабочего поддиапазона в нТл. В текстовом режиме ответом является строка 'set range MIN – MAX', где MIN и MAX – числа равные реальным значениям нижней и верхней границ установленного рабочего поддиапазона в нТл. В двоичном режиме обмена данными ответом является структура {long MinField; long MaxField;} (8 байт, старший байт каждого длинного целого первый). Значения полей структуры соответствуют реальным значениям нижней и верхней границ установленного рабочего поддиапазона в нТл. Время исполнения команды – 300 мс.

Команда **vnone range**

Эта команда работает с основным рабочим поддиапазоном (подмагничивание отключено) и аналогична команде 'range' из основного списка команд магнитометра.

Команда **vauto**

Синтаксис (текстовый режим): ['vauto PRM'].

Синтаксис (Двоичный режим): ['vauto ',Prm].

Здесь PRM – целое число, определяющее цикличность автоматического запуска последующих измерений в секундах. Допустимые значения: $1 \div 86400$, Prm – длинное целое (4 байта, старший байт первый). Если Prm > 0, то его значение определяет цикличность автоматического запуска измерения в

секундах, если $P_{rm} < 0$ то его абсолютное значение определяет частоту последующих измерений в Гц. Допустимые значения P_{rm} в данной модели датчика: $-5 \div -1$ и $1 \div 86400$. Команда переводит датчик в режим автоматического измерения модуля индукции магнитного поля. В этом режиме датчик измеряет и передает результат в формате, аналогичном формату ответа при однократном измерении, с периодичностью (частотой) определяемой значением параметра команды. Начало каждого измерения синхронизовано с началом секунды по встроенным часам датчика.

Единственным отличием от команды 'auto' из основного списка команд является то, что магнитометр самостоятельно производит коммутацию вертикального подмагничивающего поля и перестройку рабочего поддиапазона датчика в соответствии с его направлением. Цикличность включения подмагничивающего поля от измерения к измерению выглядит следующим образом: поле отключено – поле «вверх» – поле «вниз» – поле отключено – ... и так далее.

Ответом на команду в текстовом режиме является строка, содержащая результат первого измерения в формате аналогичном ответу на однократное измерение в текстовом режиме. В двоичном режиме ответом является структура данных, содержащая результат первого измерения в формате аналогичном формату ответа на одиночное измерение в двоичном режиме. Дополнительная информация о направлении подмагничивающего поля в момент измерения содержится в 3-ем (зарезервированном) бите состояния измерения STATE и в старшем бите значения поля FIELD. Если подмагничивающее поле включено, то 3-й бит состояния измерения установлен в единицу. Если подмагничивающее поле направлено «вниз» так же в единицу устанавливается старший бит значения поля. Время исполнения команды – 5000 мс.

Дополнительные команды управления POS-4

Векторный магнитометр POS-4 дополнительно включает в себя систему создания подмагничивающего поля в горизонтальном направлении. Есть три состояния этой подмагничивающей системы:

- Горизонтальное подмагничивающее поле выключено. В этом случае результатом измерения магнитометра является значение модуля магнитного поля в точке измерения;
- Горизонтальное подмагничивающее поле включено в направлении на Запад (влево). В этом случае результатом измерения является значение модуля векторной суммы истинного вектора магнитного поля в точке измерения и вектора подмагничивающего поля. В общем случае это значение существенно отличается от значения модуля магнитного поля в точке измерения. Следовательно, необходимо учитывать это отклонение при настройке приемного контура датчика;
- Горизонтальное подмагничивающее поле включено в направлении на Восток (вправо). При этом остается справедливым все сказанное в предыдущем случае.

Таким образом, дополнительные команды управления включают в себя три команды управления направлением подмагничивающего поля и две команды установки значений дополнительных рабочих поддиапазонов датчика (для поля «влево» и поля «вправо»). Эти команды используются для предварительной настройки прибора перед проведением измерений вариаций горизонтальной компоненты вектора магнитного поля. То есть, включив подмагничивающее поле по направлению «влево» и проведя серию измерений модуля магнитного поля при помощи команды 'gun', определяется значение рабочего поддиапазона для этого направления. Полученное значение записывается по команде установки дополнительного рабочего поддиапазона «влево». Так же настраивается поддиапазон для направления подмагничивающего поля «вправо». В дальнейшем эти значения будут использоваться магнитометром при

проведении измерений с коммутацией подмагничивания для расчета компоненты вектора поля.

В дополнение к этим командам добавлены команды автоматических измерений горизонтальной компоненты и полного вектора магнитного поля. При исполнении этих команд магнитометр самостоятельно управляет коммутацией горизонтального и вертикального подмагничивающих полей и настройкой рабочих поддиапазонов датчика по установленным заранее значениям.

Для определения текущего состояния системы горизонтального подмагничивания используется команда 'vector'. Два дополнительных ответа 'vector is west' и 'vector is east' определяют ориентацию подмагничивающего поля в горизонтальной плоскости.

Команда **vwest**

Синтаксис: ['vwest'].

Применяется для включения поля, создаваемого горизонтальной системой подмагничивания, в направлении на Запад (влево). Ответом на команду является строка 'set vector west'. Время исполнения команды – 300 мс.

Команда **veast**

Синтаксис: ['veast'].

Применяется для включения поля, создаваемого горизонтальной системой подмагничивания, по направлению на Восток (вправо). Ответом на команду является строка 'set vector east'. Время исполнения команды – 300 мс.

Команда **vnone**

Синтаксис: ['vnone'].

Команда аналогична описанной ранее для отключения вертикального подмагничивания. Применяется для отключения полей, создаваемого как вертикальной, так и горизонтальной системами подмагничивания. Ответом на команду является строка 'set vector none'. Время исполнения команды – 300 мс.

Команда **vwest range**

- Без параметров

Синтаксис: ['vwest range'].

Возвращает текущее значение границ рабочего поддиапазона датчика в нТл при включении подмагничивающего поля «влево». Значение по умолчанию соответствует рабочему поддиапазону со значением центрального поля равным 55000 нТл. Формат ответа зависит от режима обмена данными. В текстовом режиме ответом служит строка 'range MIN – MAX', где MIN – число равное минимальному значению поля рабочего поддиапазона в нТл, MAX – число равное максимальному значению поля рабочего поддиапазона в нТл. В двоичном режиме ответом является структура {long MinField; long MaxField;} (8 байт, старший байт каждого длинного целого первый). Значения полей структуры соответствуют значениям нижней и верхней границ рабочего поддиапазона в нТл. Время исполнения команды – 300 мс.

- С параметром

Синтаксис (текстовый режим): ['vwest range CENTER'].

Синтаксис (двоичный режим): ['vwest range ',Center].

Здесь CENTER – число равное требуемому значению центрального поля рабочего поддиапазона в нТл, Center – длинное целое (4 байта, старший байт первый) равное требуемому значению центрального поля рабочего поддиапазона в нТл. Устанавливает текущий рабочий поддиапазон измерения магнитного поля при включении подмагничивающего поля «влево» по значению параметра, соответствующего требуемому значению центрального поля рабочего поддиапазона в нТл. В текстовом режиме ответом является строка 'set range MIN – MAX', где MIN и MAX – числа равные реальным значениям нижней и верхней границ установленного рабочего поддиапазона в нТл. В двоичном режиме обмена данными ответом является структура {long MinField; long MaxField;} (8 байт, старший байт каждого длинного целого первый). Значения полей структуры соответствуют реальным значениям нижней и верхней границ

установленного рабочего поддиапазона в нТл. Время исполнения команды – 300 мс.

Команда **veast range**

- Без параметров

Синтаксис: ['veast range'].

Возвращает текущее значение границ рабочего поддиапазона датчика в нТл при включении подмагничивающего поля «вправо». Значение по умолчанию соответствует рабочему поддиапазону со значением центрального поля равным 55000 нТл. Формат ответа зависит от режима обмена данными. В текстовом режиме ответом служит строка 'range MIN – MAX', где MIN – число равное минимальному значению поля рабочего поддиапазона в нТл, MAX – число равное максимальному значению поля рабочего поддиапазона в нТл. В двоичном режиме ответом является структура {long MinField; long MaxField;} (8 байт, старший байт каждого длинного целого первый). Значения полей структуры соответствуют значениям нижней и верхней границ рабочего поддиапазона в нТл. Время исполнения команды – 300 мс.

- С параметром

Синтаксис (текстовый режим): ['veast range CENTER'].

Синтаксис (двоичный режим): ['veast range ',Center].

Здесь CENTER – число равное требуемому значению центрального поля рабочего поддиапазона в нТл, Center – длинное целое (4 байта, старший байт первый) равное требуемому значению центрального поля рабочего поддиапазона в нТл. Устанавливает текущий рабочий поддиапазон измерения магнитного поля при включении подмагничивающего поля «вправо» по значению параметра, соответствующего требуемому значению центрального поля рабочего поддиапазона в нТл. В текстовом режиме ответом является строка 'set range MIN – MAX', где MIN и MAX – числа равные реальным значениям нижней и верхней границ установленного рабочего поддиапазона в нТл. В двоичном режиме обмена данными ответом является структура {long MinField; long MaxField;} (8 байт, старший байт каждого длинного целого первый).

(8 байт, старший байт каждого длинного целого первый). Значения полей структуры соответствуют реальным значениям нижней и верхней границ установленного рабочего поддиапазона в нТл. Время исполнения команды – 300 мс.

Команда **hauto**

Синтаксис (текстовый режим): ['hauto PRM'].

Синтаксис (Двоичный режим): ['hauto ',Prm].

Здесь PRM – целое число, определяющее цикличность автоматического запуска последующих измерений в секундах. Допустимые значения: $1 \div 86400$, Prm – длинное целое (4 байта, старший байт первый). Если $Prm > 0$, то его значение определяет цикличность автоматического запуска измерения в секундах, если $Prm < 0$ то его абсолютное значение определяет частоту последующих измерений в Гц. Допустимые значения Prm в данной модели датчика: $-5 \div -1$ и $1 \div 86400$. Команда переводит датчик в режим автоматического измерения модуля индукции магнитного поля. В этом режиме датчик измеряет и передает результат в формате, аналогичном формату ответа при однократном измерении, с периодичностью (частотой) определяемой значением параметра команды. Начало каждого измерения синхронизовано с началом секунды по встроенным часам датчика.

Единственным отличием от команды 'auto' из основного списка команд является то, что магнитометр самостоятельно производит коммутацию горизонтального подмагничивающего поля и перестройку рабочего поддиапазона датчика в соответствии с его направлением. Цикличность включения подмагничивающего поля от измерения к измерению выглядит следующим образом: поле отключено – поле «влево» – поле «вправо» – поле отключено – ... и так далее.

Ответом на команду в текстовом режиме является строка, содержащая результат первого измерения в формате аналогичном ответу на однократное измерение в текстовом режиме. В двоичном режиме ответом является структура

данных, содержащая результат первого измерения в формате аналогичном формату ответа на одиночное измерение в двоичном режиме. Дополнительная информация о направлении подмагничивающего поля в момент измерения содержится в 3-ем (зарезервированном) бите состояния измерения STATE и в 30-ом и 31-ом битах значения поля FIELD. Если подмагничивающее поле включено, то 3-й бит состояния измерения установлен в единицу. Если подмагничивающее поле направлено «влево» так же в единицу устанавливается 30-й бит значения поля. Если подмагничивающее поле направлено «вправо» в единицу устанавливаются 30-й и 31-й биты значения поля. Время исполнения команды – 5000 мс.

Команда **vhauto**

Синтаксис (текстовый режим): ['vhauto PRM'].

Синтаксис (Двоичный режим): ['vhauto ',Prm].

Здесь PRM – целое число, определяющее цикличность автоматического запуска последующих измерений в секундах. Допустимые значения: $1 \div 86400$, Prm – длинное целое (4 байта, старший байт первый). Если Prm > 0, то его значение определяет цикличность автоматического запуска измерения в секундах, если Prm < 0 то его абсолютное значение определяет частоту последующих измерений в Гц. Допустимые значения Prm в данной модели датчика: $-5 \div -1$ и $1 \div 86400$. Команда переводит датчик в режим автоматического измерения модуля индукции магнитного поля. В этом режиме датчик измеряет и передает результат в формате, аналогичном формату ответа при однократном измерении, с периодичностью (частотой) определяемой значением параметра команды. Начало каждого измерения синхронизовано с началом секунды по встроенным часам датчика.

Единственным отличием от команды 'auto' из основного списка команд является то, что магнитометр самостоятельно производит коммутацию горизонтального и вертикального подмагничивающих полей и перестройку рабочего поддиапазона датчика в соответствии с их направлением. Цикличность

включения подмагничивающих полей от измерения к измерению выглядит следующим образом: поле отключено – поле «вверх» – «вниз» – «влево» – «вправо» – поле отключено – и так далее.

Ответом на команду в текстовом режиме является строка, содержащая результат первого измерения в формате аналогичном ответу на однократное измерение в текстовом режиме. В двоичном режиме ответом является структура данных, содержащая результат первого измерения в формате аналогичном формату ответа на одиночное измерение в двоичном режиме. Дополнительная информация о направлении подмагничивающих полей в момент измерения содержится в 3-ем (зарезервированном) бите состояния измерения STATE и в старших битах значения поля FIELD. Если подмагничивающее поле включено, то 3-й бит состояния измерения установлен в единицу. Если подмагничивающее поле направлено «вниз» так же в единицу устанавливается 31-й бит значения поля. Если подмагничивающее поле направлено «влево», то в единицу устанавливается 30-й бит значения поля. Если подмагничивающее поле направлено «вправо» в единицу устанавливаются оба старших бита, как показано в Таблице 12.

Таблица 12

Значение		Расшифровка значений старших битов поля в результате измерения при установленном 3-м бите состояния (подмагничивание включено)
31-й бит	30-й бит	
0	0	Подмагничивающее поле направлено «вверх»
1	0	Подмагничивающее поле направлено «вниз»
0	1	Подмагничивающее поле направлено «влево»
1	1	Подмагничивающее поле направлено «вправо»

Время исполнения команды – 5000 мс.

Алгоритм определения направления подмагничивающего поля по значениям соответствующих битов в результате измерения можно описать на языке программирования С следующим образом:

```
struct {    unsigned long    field; // Значение модуля поля
           unsigned short  qmc; // Погрешность измерения
           unsigned char   state; // Флаги состояния измерения
           unsigned char   rph; // Сотые доли времени измерения
           unsigned long    time; // Время измерения в секундах
} result; // Результат измерения

if ( result.state & 8 ) { // -- Анализ битов --
    // Измерен модуль векторной суммы
    // (подмагничивающее поле включено)
    switch ( result.field >> 30) {
        case 0: /* Подмагничивающее поле направлено вверх */;    break;
        case 1: /* Подмагничивающее поле направлено влево */;    break;
        case 2: /* Подмагничивающее поле направлено вниз  */;    break;
        case 3: /* Подмагничивающее поле направлено вправо */;    break;
    }

    // Сбросим старшие биты
    result.field &= 0x3FFFFFF;
}
else { /* Измерен модуль поля Земли */ }
```

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. САМОКОЛИБРОВКА МАГНИТОМЕТРОВ POS-3,4

У компонентных POS-3,4 магнитометров имеется возможность вращения магнитной системы вокруг вертикальной оси и, соответственно, частичного определения углов склонения магнитных и географических осей системы. В результате пользователь может осуществлять самостоятельный контроль ориентации и даже внесение поправок в получаемый результат измерения компонент без использования образцового магнитометра.

Так как для определения ориентации внешнего магнитного поля \vec{T} удобно измерять проекции поля на географические оси (геометрические декартовы: $X \equiv T_x$, $Y \equiv T_y$, $Z \equiv T_z$), именно вдоль них направляют ось магнитной системы (направляющий вектор \vec{m}) компонентного магнитометра, см. пример на рис. 9.

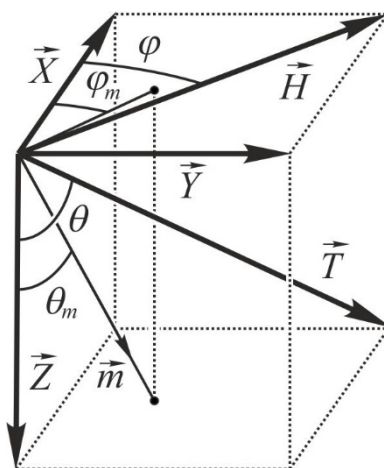


Рис. 9. Векторная диаграмма геометрических осей, магнитной оси и измеряемого магнитного поля

Для выбора направления \vec{m} вдоль оси Oz необходимо устремить $\theta_z \rightarrow 0$ при произвольном φ_z , вдоль оси Oy – $\theta_y \rightarrow \pi/2$ и $\varphi_y \rightarrow \pi/2$. Наличие отклонения магнитной оси от геометрической будет приводить к возникновению погрешностей в определении истинной «географической» проекции магнитного поля. В частности, для измеряемых POS-3,4 компонент получим (штрихом обозначаем значения, получаемые для «отклоненной» оси):

$$\begin{aligned} Z' \equiv T_{Z'} &= X \sin(\theta_{Z'}) \cos(\varphi_{Z'}) + Y \sin(\theta_{Z'}) \sin(\varphi_{Z'}) + Z \cos(\theta_{Z'}) = \\ &= T [\sin(\theta) \sin(\theta_{Z'}) \cos(\varphi_{Z'} - \varphi) + \cos(\theta) \cos(\theta_{Z'})], \end{aligned}$$

$$Y' \equiv T_{Y'} = X \sin(\theta_{Y'}) \cos(\varphi_{Y'}) + Y \sin(\theta_{Y'}) \sin(\varphi_{Y'}) + Z \cos(\theta_{Y'}) = \\ = T [\sin(\theta) \sin(\theta_{Y'}) \cos(\varphi_{Y'} - \varphi) + \cos(\theta) \cos(\theta_{Y'})].$$

Допустим, что мы осуществляем измерения модуля и проекции магнитного поля на магнитную ось \vec{m} в рабочем положении и при поворотах магнитной системы на углы 90° , 180° , 270° вокруг вертикальной Z -оси (для постоянного поля это означает замену азимутального угла в $\varphi_m \rightarrow \varphi_m + \pi/2$, $\varphi_m + \pi$, $\varphi_m + 3\pi/2$). Соответственно, получаемый модуль поля будет равен $T(0)$, $T(\pi/2)$, $T(\pi)$, $T(3\pi/2)$, а проекции на z -ось – $Z'(0)$, $Z'(\pi/2)$, $Z'(\pi)$, $Z'(3\pi/2)$. Предполагаем, что угловые параметры внешнего поля в момент калибровки θ_0 и φ_0 являются слабо изменяющимися. Нормированные проекции в этих случаях:

$$\tau_{Z'}(\alpha) = Z'(\alpha)/T(\alpha), \quad \alpha = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2.$$

Определим величины, которые могут понадобиться в процессе самокалибровки:

$$h_{Z'} \equiv \cos(\theta_{Z'}) \cos(\theta_0) = [\tau_{Z'}(0) + \tau_{Z'}(\pi/2) + \tau_{Z'}(\pi) + \tau_{Z'}(3\pi/2)]/4,$$

$$d_{Z'}^0 \equiv \sin(\theta_{Z'}) \sin(\theta_0) \cos(\varphi_{Z'} - \varphi_0) = [\tau_{Z'}(0) - \tau_{Z'}(\pi)]/2,$$

$$d_{Z'}^1 \equiv \sin(\theta_{Z'}) \sin(\theta_0) \sin(\varphi_{Z'} - \varphi_0) = [\tau_{Z'}(3\pi/2) - \tau_{Z'}(\pi/2)]/2,$$

Предлагаются следующие варианты самокалибровочной процедуры, отличающиеся степенью компенсации ошибок ориентации магнитной оси:

1. Упрощенная самокалибровка вертикальной компоненты магнитометра (POS-3) по тестовым измерениям с поворотом магнитной системы на угол 180° вокруг вертикальной оси ($\varphi_m \rightarrow \varphi_m + \pi$).

2. Самокалибровка только вертикальной компоненты POS-3,4 по показаниям «образцового» векторного магнитометра с поворотом магнитной системы на углы $\pm 90^\circ$, 180° вокруг вертикальной оси ($\varphi_m \rightarrow \varphi_m \pm \pi/2$, $\varphi_m + \pi$);

Рассмотрим поправки, которые можно вносить при указанных процедурах.

1. Для измерителя вертикальной компоненты и модуля магнитного поля возможно проведение процедуры частичной самокалибровки в упрощенном виде, опираясь на выражения. Проводя тестовые измерения с поворотом системы на 180° , предварительно рассчитываем значение $d_{Z'}^0$.

Далее, в процессе рабочих измерений модуля и Z-компоненты поля, можно подправлять полученные результаты, воспользовавшись формулой:

$$Z \cong Z' - T d_{Z'}^0.$$

Необходимо отметить, что для POS-3 возможна дополнительная процедура ориентирования в горизонтальной плоскости, улучшающая компонентное измерение. Для этого предварительно снимается ориентационная зависимость компоненты вращением системы вокруг вертикальной оси (изменение $\varphi_{Z'}$). В условиях стабильного поля можно добиться такой ориентации системы, чтобы в выражении для измеряемой Z' при калибровке слагаемое $\cos(\varphi_{Z'} - \varphi_0)$ стало равным 0. Проводя в дальнейшем измерения в таком положении, мы минимизируем вклад этого слагаемого в погрешность компоненты.

2. Проводим тестовые измерения с разворотом подмагничивающей системы. Считая, что азимутальное направления поля в последующем отличается слабо от «калибровочного» φ_0 , в первом приближении можно положить $\varphi = \varphi_0$. Тогда предлагается следующая формула для внесения поправок к измеряемой вертикальной компоненте POS-3,4

$$Z = Z' \left[1 - \frac{(d_{Z'}^0)^2 - (d_{Z'}^1)^2}{2(1-h_{Z'}^2)} \right] - \frac{d_{Z'}^0}{\sqrt{1-h_{Z'}^2}} \sqrt{T^2 - Z'^2}.$$