

ТРЕХКОМПОНЕНТНЫЙ КВАРЦЕВЫЙ МАГНИТОМЕТР

В.В. Любимов

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова Российской академии наук*

ВВЕДЕНИЕ

История создания и развития кварцевой магнитометрии в ИЗМИРАН, а также результаты исследований и основные публикации по этой тематике представлены в работах [1, 2]. В этих работах приведены также сведения о приборных разработках, связанных с созданием высокоточной аппаратуры на основе кварцевых магнитных датчиков (КМД).

В работе [3] приведены созданные в разные годы основные конструкции КМД и магнитоизмерительные преобразователи (МИП) на их основе. Этот класс приборов предназначен для регистрации и исследования геомагнитных вариаций. Такой аппаратурой оснащены большинство магнитных обсерваторий (МО) России, а также многие МО зарубежных стран [1, 2].

Кварцевое магнитное приборостроение всегда относилось к «рукотворным нанотехнологиям» в плане создания и изготовления КМД мастерами-кварцедувами. Уникальность работ состояла в том, что чувствительный элемент КМД различными способами вывешивался (или закручивался) на кварцевой нити, толщина которой, как правило, была менее толщины человеческого волоса и составляла порядка 15...30 микрон. При этом сама подвеска КМД в последних моделях и конструкциях вариометров выполнялась в *антисейсмичном* или *антинаклонном* вариантах исполнения.

Кварцевые вариометры всегда заметно отличались от магнитометров другого типа тем, что имели значительно более высокие характеристики по термостабильности, помехозащищённости и стабильной работы на длительном интервале времени.

Помехозащищённость КМД обеспечивается как довольно узким диапазоном работы в области низких частот (при помощи ФНЧ с частотой среза 3...5 Гц) и механической конструкцией подвесной системы КМД с

резонансной частотой собственных колебаний в районе 1,7...2 Гц, так и толстостенным металлическим корпусом, выполненным из немагнитного материала.

Термостабильность КМД обеспечивается тем, что вся конструкция подвесной системы выполнена на основе кварцевого стекла, которое имеет температурный коэффициент линейного расширения $1 \cdot 10^{-7}$, при этом температурный коэффициент магнитного момента (**ТКММ**) компенсационных магнитов (**КМ**), используемых для компенсации (не измеряемой вариометрами) постоянной части измеряемого поля составляет $1 \cdot 10^{-6}$.

При изготовлении КМД компенсация неизмеряемой составляющей (**НС**) вектора магнитной индукции (**ВМИ**) поля Земли осуществляется при помощи двух КМ (устанавливаемых с двух разных сторон от чувствительного элемента). Каждый из КМ подбирается таким образом, чтобы он (его магнитный момент) для ввода вариометра в измерительный диапазон компенсировал половину величины этой НС. Два КМ обеспечивают суммарный магнитный момент (в точке установки КМД для каждой из составляющих ВМИ) соответствующий полю, необходимому для компенсации НС в центре КМД, то есть в месте установки подвесной системы с чувствительным элементом. При этом ТКММ каждого из этих КМ должен быть противоположного знака в рабочем диапазоне температур для КМД, чтобы обеспечивать точность измерений и общую термостабильность на уровне менее 0,1...0,3 нТл/°С при его эксплуатации.

Изготовление (отжиг, калибровка, температурные испытания) и подбор КМ для каждого из КМД является сложным технологическим (и механическим) процессом. Мастерам-кварцедувам при изготовлении КМД практически редко удаётся (в результате подбора КМ и последующей их юстировки относительно друг друга) создать компенсатор НС с «нулевым» (или близким к этому значению) ТКММ для широкого диапазона рабочих температур. Особенно это актуально для магнитовариационных станций (**МВС**), которые предназначены для проведения полевых экспедиционных работ. Для работы в

условиях МО, - при положительных значениях рабочих температур в помещении, - удаётся обеспечить термостабильность КМД на уровне $0,5...1,5$ нТл/°С. В результате этого МВС с КМД возможно использовать не везде, а только в тех регионах, на поля которых настроены КМ для точного введения датчиков в измерительный диапазон.

В данной работе рассмотрен вариант конструкции трёхкомпонентного кварцевого магнитометра (ТКМ) на базе КМД и фотоэлектрического преобразователя (ФЭП), выполненного на основе транзисторной оптопары (ТОП) [4], а также созданного на их основе МИП, который позволяет проводить измерения составляющих ВМИ в любом месте без перестройки компенсатора НС и без использования дополнительных КМ. В этой конструкции КМД (в отличие от классической схемы) отсутствуют оба КМ, - их функции выполняют две катушки для начальной (токовой) установки (НУ) чувствительного элемента в рабочее состояние и управляемый микроконтроллером (МК) цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), служащий для автоматического ввода датчика прибора в измерительный диапазон.

Предложенный вариант конструкции компактного КМД в практике кварцевого магнитометрического приборостроения осуществляется впервые и предназначен для построения современных МВС, которые используются для исследований в полевых и экспедиционных условиях, а также для проведения специальных работ.

КОНСТРУКЦИЯ БЛОКА КВАРЦЕВЫХ ДАТЧИКОВ

Новая конструкция КМД в совокупности с управлением от МК с современными методами контроля, получения и накопления цифровой информации, её хранения и беспроводной передачи данных позволяет реализовать не только МВС но и полностью цифровой компонентный магнитометр для использования его в полевых условиях или необслуживаемых или редко обслуживаемых пунктах наблюдений. При этом КМД, как основной элемент этого устройства, - имеют высокую разрешающую способность,

термостабильность и стабильные характеристики на достаточно большом временном интервале их применения.

Устройство и работа ТКМ поясняется рисунками. На **рис.1** представлен общий вид КМД и ФЭП. На этом рисунке также показана компоновка и конструкции отдельных элементов КМД и ФЭП (*вид сверху и сбоку*), корпус КМД и фрагмент подвески одного из магнитов на кварцевой нити (система подвески в сборе). Все КМД (чувствительные элементы каналов D, H и Z) расположены ортогонально друг к другу на минимально возможном расстоянии, которое исключает их взаимовлияние, и закреплены жёстко на основании, которое имеет возможность нивелировки всех КМД одновременно в горизонтальной плоскости.

На **рис.2** показана функциональная схема ТКМ. Каждый из КМД построен из следующих основных элементов и деталей: магниточувствительного элемента (МЧЭ), – магнита, отражающего зеркала (ЗО), которые вместе подвешены (закреплены) с помощью кварцевой нити (КН) на кварцевой рамке (на **рис.1** не показана), сделанной из прутка кварцевого стекла диаметром 5 мм и длиной 10 см.

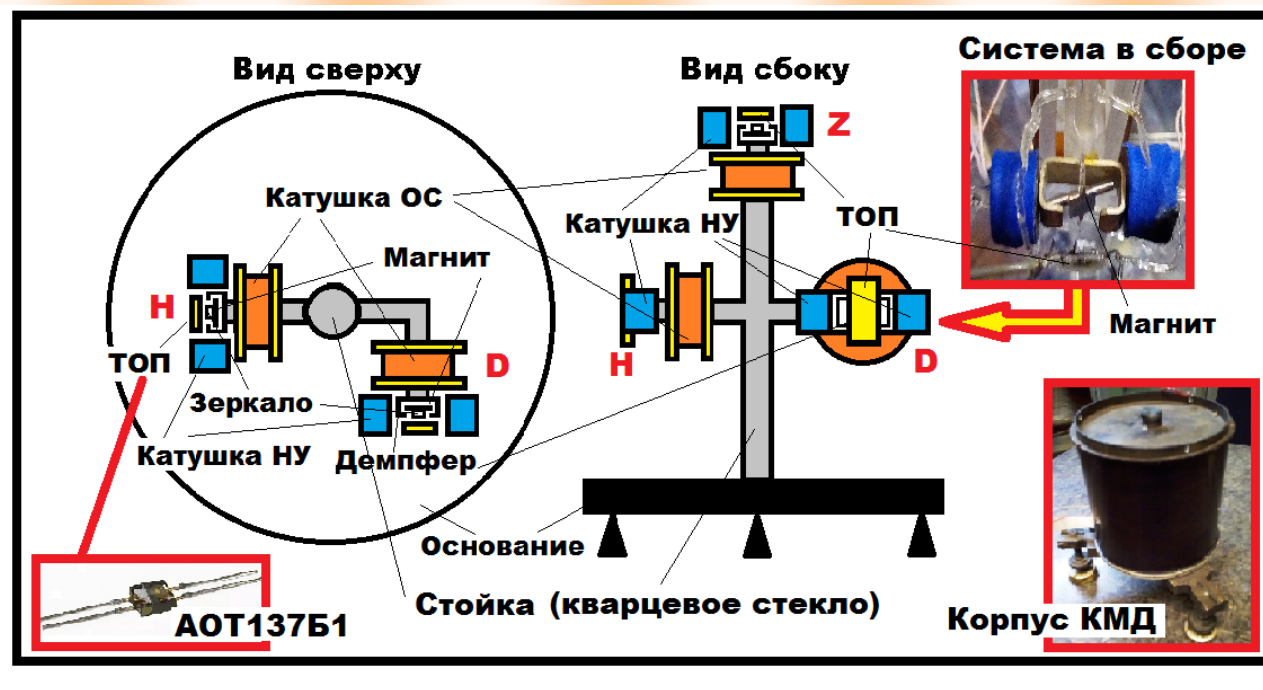


Рис.1. Общий вид конструкции блока кварцевых датчиков трёхкомпонентного магнитометра.

Напротив ЗО (и строго параллельно ему на расстоянии в 10 мм) установлена ТОП с открытым оптическим каналом (главный элемент ФЭП), с помощью которой осуществляется преобразование магнитное поле-угол поворота магнита-постоянный ток.

В конструкции КМД использованы три катушки, намотанные тонким медным проводом на каркасах из кварцевого стекла:

- катушка **ОНУ (НУ)**, служащая для начальной установки и ввода в измерительный диапазон датчика;
- катушка обратной связи (**ООС**), служащая для стабилизации работы МИП;
- катушка калибровки (**ОК**), предназначенная для проведения периодической калибровки измерительного канала и МИП.

Чувствительный элемент КМД, - магнит, - установлен (с помощью КН) внутри демпфера (см. *рис.1*), сделанного из С-образной немагнитной металлической пластины. Демпфер служит для защиты КН и для устранения колебаний системы при транспортировке датчиков или при возникновении нештатных ситуаций (например, наличие рядом сильных магнитов или металлических предметов).

С каждой из сторон демпфера (и полюсов магнита) установлены две катушки НУ. А сзади демпфера, ортогонально катушкам НУ и направлению КН, - установлен каркас, на который намотаны обе катушки ОС и ОК. Все эти элементы (катушки и демпфер) жестко приварены прутком из кварцевого стекла к общему вертикальному стержню-основанию (стойке диаметром 10 мм и длиной 150 мм), который сделан также из кварцевого стекла.

В процессе разработки было создано два варианта исполнения КМД. Они различались только конструкцией и установкой ФЭП относительно магниточувствительного элемента (**МЧЭ**). Первый вариант использования ФЭП показан на *рис.1*, когда отражающее зеркало (**ЗО**) крепилось на самом МЧЭ, - магните. Для исключения влияния на МЧЭ схемы ТОП (протекающего через нее тока), конструкция подвески КМД была видоизменена, как это

показано на *рис.2*. То есть ЗО было подвешено на кварцевой нити (КН) на расстоянии 25 мм ниже МЧЭ, что позволило удалить ТОП от МЧЭ и тем самым исключить некоторое влияние его на результаты измерений.

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ТКМ

Функциональная схема ТКМ показана на *рис.2* и содержит три МИП (три отдельных измерительных канала - D, H и Z) и блок управления (БУ). Каждый из МИП включает в себя последовательно соединенные друг за другом преобразователи: магнитное поле/постоянный ток, ток/напряжение и напряжение/цифровой код. При этом ТКМ имеет цифровой выход измеренных данных для подключения (при помощи последовательного интерфейса RS-232) к персональному компьютеру (ПК).

МИП состоит из следующих основных узлов, - блока КМД и блока электроники (БЭ), питание которых осуществляется от внешнего источника постоянного тока (или от сетевого адаптера – СА).

Преобразователь магнитное поле/постоянный ток сконструирован на основе КМД и ФЭП. Преобразователь ток/напряжение сделан на основе усилителя постоянного тока (УПТ), а преобразователь напряжение/цифровой код выполнен на основе аналого-цифрового преобразователя (АЦП). При этом все три КМД размещены в едином металлическом защитном корпусе (см. *рис.1*)., а все элементы схем БЭ и БУ и расположены в немагнитном металлическом корпусе (размером 240x165x56 мм) на некотором отдалении от БЭ (от 1,5 до 3 м), чтобы исключить электромагнитное влияние на результаты измерений.

Схема БЭ (см. *рис.2*) включает в себя усилитель сигнала, состоящий из трёх функциональных узлов: предварительного усилителя (МДМ), УПТ и интегратора (ИНТ), а также схему управления (СУ), схему индикации (СИ) и источник питания (ИП), который обеспечивает питающими напряжениями все схемы БЭ и ФЭП.

Предварительный усилитель выполнен на основе малошумящего УПТ с собственной внутренней ООС и МДМ-преобразованием. Он обеспечивает

основное усиление входного сигнала от схемы ФЭП. Схема УПТ совместно с ИНТ позволяет добиться требуемого выходного уровня аналогового напряжения для АЦП и осуществляет функции фильтра с частотой среза 3...5 Гц. Благодаря использованию в схеме УПТ специального дифференциального усилителя с МДМ-преобразованием, удалось добиться уменьшения (до 3...5 нТл) собственных шумов МИП и повышения общей стабильности работы УПТ как во времени, так и при изменении температуры окружающей среды в широких пределах. При этом за счёт ООС реализуется динамический диапазон измерения геомагнитных вариаций измерительным каналом МИП $\pm (4000...6000)$ нТл.

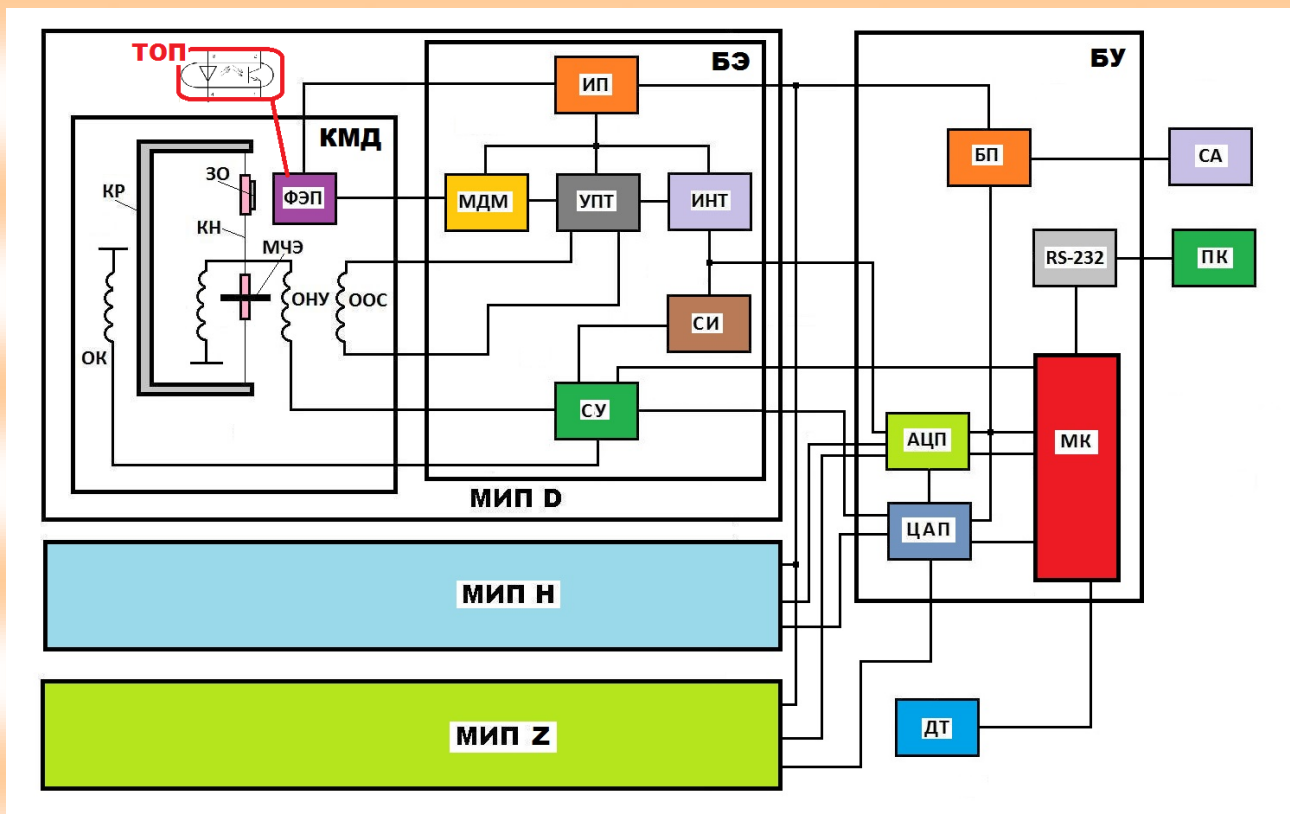


Рис.2. Функциональная схема трёхкомпонентного кварцевого магнитометра.

СУ обеспечивает управление режимами работы КМД, его калибровкой и компенсацией НС и управляется от МК. СУ также управляет работой СИ в моменты, когда происходит установка и нивелировка всего прибора, например, установка КМД в плоскости магнитного меридиана (ПММ).

БУ включает в себя АЦП, ЦАП, управляющий МК, последовательный преобразователь RS-232 и блок питания (БП). Также БУ включает в себя схему

выносного датчика температуры (ДТ), чувствительный элемент которого устанавливается вблизи одного из КМД (датчик Z) и позволяет контролировать температуру КМД внутри защитного кожуха с точностью $0,1^{\circ}\text{C}$.

Схема 24-разрядного АЦП обеспечивают оцифровку аналогового напряжения с выхода УПТ с частотой 16 Гц. При этом реализуется регистрация аналоговых данных измерительного канала МИП с ценой единицы счета младшего разряда визуализируемая на дисплее подключённого ПК на уровне 0,1 нТл (с возможностью программного увеличения разрешения).

Управляющий микроконтроллер (МК) осуществляет передачу цифровых данных АЦП, обмен информацией и управляющими командами через последовательный порт (**RS-232**) с ПК на расстоянии от 3 до 25 м. МК активирует работу МИП, посылает управляющие команды, связанные с настройкой и проверкой работоспособности КМД на блок управления (БУ). МК также управляет работой встроенного таймера, а при наличии и необходимости, - поддерживает работу подключаемого к ПК приёмника GPS, имеет канал синхронизации с GPS и возможность коррекции хода часов реального времени. МК также управляет работой трёхканального ЦАП в процессе установки КМД прибора в измерительной точке, - для токовой компенсации НС при помощи катушек НУ и ввода датчиков в измерительный диапазон. Величина токовых ступеней компенсации ЦАП определяется значением измерительного диапазона КМД и устанавливается программно. ДТ, расположенный в защитном корпусе КМД, позволяет при помощи МК, ЦАП и специального программного обеспечения реализовать коррекцию и управление значением тока компенсации НС при изменении внешней температуры окружающей среды и тем самым обеспечить необходимую стабильность и точность измерения всего прибора. При помощи ЦАП, управляющего МК и ПК производится также, при необходимости, периодическая калибровка всех измерительных каналов магнитометра.

БП построен с использованием DC-DC преобразователей, питание которых может осуществляется как от внешнего источника постоянного тока

напряжением 7...24 В, так и от стандартного СА напряжением 12 ± 5 В. БП осуществляет питание всех электронных схем БЭ, БУ и ФЭП с помощью трёх стабилизированных ИП напряжением ± 5 В и 12 В. При этом потребляемая мощность ТКМ составляет, не более 3...3,6 Вт.

Программное обеспечение для ТКМ обеспечивает организацию базы данных, их визуализацию в процессе проводимых работ на дисплее ПК и возможность обработки данных для использования их в формате, пригодном для участия в международных программах сбора данных.

При подготовке и работе с ТКМ необходимо выполнить следующие операции:

- установить блок КМД на ровном месте (с минимальным пространственным градиентом поля) и отnivelировать его в горизонтальной плоскости;
- медленно вращая блок КМД в горизонтальной плоскости добиться установки измерительного канала D ортогонально ПММ (точность установки индицируется при помощи СИ), при этом КМД измерительных каналов H и Z будут автоматически ориентированы необходимым образом;
- с помощью программного обеспечения на ПК запустить процесс компенсации НС последовательно для всех измерительных каналов ТКМ (при этом контроль оптимальной установки измерительного диапазона каждого из КМД отслеживается при помощи дисплея ПК и схемы СИ). Установка каждого из КМД в центр измерительного диапазона производится с точностью не хуже $\pm 10...20$ нТл.

После выполнения этих технических процедур прибор будет подготовлен к работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённых научно-исследовательских и опытных работ создан новый прибор, - кварцевый магнитометр с построением КМД отличным от «традиционных и «классических» конструкций. Техническое решение КМД,

МИП и всего прибора имеет следующие отличительные особенности от всех ранее созданных аналогичных конструкций:

Высокая стабильность работы во времени (что важно для длительных исследований в условиях МО) и хорошая стабильность работы при изменении температуры окружающей среды в широких пределах (что важно при проведении полевых и экспедиционных работ).

Низкий уровень собственных шумов (не более 3...5 пТл), амплитуда которых определяется схемой и элементами построения усилительного тракта измерительного канала.

Малое потребление энергии, что позволяет эффективно использовать МИП в конструкциях автономных станций с питанием от аккумуляторной батареи.

При использовании ТКМ совместно с приемником GPS, цифровым акселерометром-ориентатором высокой точности и необходимыми управляющими программами, появляется возможность использования прибора (аналогично феррозондовому магнитометру) в любом месте без проведения точной установки и привязки положения КМД к ПММ, то есть для проведения компонентных измерений X, Y и Z-составляющих ВМИ.

Литература

1. Любимов В.В. К 80-летию ИЗМИРАН: цифровые кварцевые магнитовариационные станции (история их создания и применения) // Евразийское научное объединение. М., 2020 №4 (62). С.480-493.
2. Любимов В.В. Кварцевые датчики магнитного поля, магнитовариационные станции и приборы на их основе (Библиография) // Евразийское научное объединение. М., 2020 №5 (63). С.130-144.
3. Любимов В.В. Магнитоизмерительный преобразователь для цифровых вариационных станций // Приборы, М., 2019. №8 (230). С.11-16.
4. Оптопара транзисторная с открытым оптическим каналом. Проспект ОАО «ОПТРОН». <http://optron.ru/electronic-components/60/329>.