

Любимов Владимир Валерьевич,

старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова (ИЗМИРАН) Российской академии наук, г. Москва
Lyubimov Vladimir Valerievich, Senior researcher, Pushkov institute of terrestrial magnetism, ionosphere and radio wave propagation (IZMIRAN) of RAS, Moscow, Troitsk, Russia

**НОВЫЙ ВАРИАНТ ЦИФРОВОГО МАГНИТОМЕТРА НА ОСНОВЕ
КОМПАКТНОГО КВАРЦЕВОГО ДАТЧИКА ДЛЯ РАЗЛИЧНОГО ПРИМЕНЕНИЯ
A NEW VARIANT OF THE DIGITAL MAGNETOMETER BASED ON A COMPACT
QUARTZ SENSOR FOR A VARIETY OF APPLICATIONS**

Аннотация: Работа посвящена описанию новой конструкции компактного кварцевого датчика и магнитоизмерительного преобразователя на его основе. На базе этих конструкторских решений создан новый прибор – цифровой кварцевый магнитометр, который предназначен как для научных и обсерваторских исследований, так и для проведения геофизических и специальных работ в полевых условиях.

Abstract: The paper is devoted to the description of a new design of a compact quartz sensor and a magnetomeasuring converter based on it. On the basis of these design solutions, a new device was created - a digital quartz magnetometer, which is designed both for scientific and observational research, and for geophysical and special work in the field.

Ключевые слова: Магнитное поле, магнитные измерения, компонентные измерения, кварцевый датчик, кварцевый вариометр, магнитовариационная станция, кварцевый магнитометр, цифровые данные.

Keywords: Magnetic field, magnetic measurements, component measurements, quartz sensor, quartz variometer, magnetic variation station, quartz magnetometer, digital data.

ВВЕДЕНИЕ

Кварцевые вариометры (**КВ**) всегда заметно отличались от магнитометров другого типа тем, что являются всегда стационарными приборами, а также имеют значительно более высокие характеристики по термостабильности, помехозащищённости и стабильной работе на длительном интервале времени. Этот класс приборов предназначен для регистрации и исследования геомагнитных вариаций.

Новые технологические возможности и современная элементная база позволили заметно модернизировать ранее созданные сотрудниками ИЗМИРАН модели и конструкции приборов. Этому помогло развитие современных малогабаритных и малопотребляющих микросхем АЦП и ЦАП. Появилась реальная возможность усовершенствования технологии создания приборов на основе кварцевых магнитных датчиков (**КМД**) и создания приборов уже другого класса, - *кварцевых магнитометров*, которые позволяют проводить измерения как в режиме «вариометра», так и измерять полные значения составляющих вектора магнитной индукции (**ВМИ**) поля Земли. При этом, в отличие от КВ, в конструкции КМД отсутствуют компенсирующие магниты (**КМ**), которые обязательны для схемы различных КВ. Вместо КМ (или совместно с ними) стали применяться

В настоящей работе предложен один из вариантов трехканального магнитоизмерительного преобразователя (**МИП**), который создан на базе компактной конструкции **КМД** и фотоэлектрического преобразователя (**ФЭП**), а также представлен новый вариант компактного цифрового кварцевого магнитометра (**ЦКМ**) созданного на основе этого МИП и КВ.

Предложенный вариант конструкции КМД и ЦКМ предназначен для использования в полевых и экспедиционных условиях, а также для специальных исследований и работ в магнитных обсерваториях (**МО**).



О НЕКОТОРЫХ ВАРИАНТАХ ЭЛЕМЕНТОВ ПОСТРОЕНИЯ КМД

За прошедшие десятилетия в ИЗМИРАН создано достаточно много вариантов конструкций КМД, которые построены на различного типа и вида магниточувствительных элементах (МЧЭ) [1-3]. В процессе создания КМД разные варианты МЧЭ по-разному крепятся на растяжках (кварцевых нитях - КН) в специальной рамке из кварцевого стекла (КР) и представляют собой подвесную магнитную систему (ПМС), которая имеет как «сейсмичный», так и «антисейсмичный» варианты схемы исполнения [3]. Эти МЧЭ предназначены для проведения магнитных измерений (например, для буссолей и вариометров), для астатических магнитометров и градиентометров, а также для измерения наклонов (кварцевые наклонометры) [2]. Из различных вариантов и комбинаций МЧЭ были созданы астатические и комбинированные системы датчиков, а также датчики и системы, основанные на взаимодействии различных МЧЭ.

В качестве основного варианта корпуса датчика для многочисленных различных приборов, которые используются для проведения исследовательских работ в МО и для полевых экспедиционных работ, - был разработан и многократно применялся корпус КМД стандартных размеров - диаметром 100 и высотой 40 мм [2, 3]. Некоторые варианты (см. фото) таких корпусов КМД показаны на *рис.1а*. На этом же рисунке, а также на *рис.1б* и *рис.1в*, - представлены фото вариантов корпусов КМД (в том числе и прямоугольном исполнении, - см. *рис.1г* и *рис.1д*) малогабаритных размеров, которые применялись для различного исполнения кварцевых датчиков. На *рис.1б* и *рис.1в* показана конструкция корпуса самого малогабаритного из созданных КМД, который имеет диаметр корпуса и его высоту размером всего 40 мм.

На *рис.1е* показаны основные варианты исполнения ПМС для КМД, которые могут быть использованы в приборах для магнитных измерений. Для различных датчиков и решаемых задач существует восемь основных вариантов ПМС, каждая из которых включает в себя различные варианты крепления, комбинации и количество необходимых элементов, а именно: магнитов (М), зеркальных отражателей (ЗО) и отвесов (ОТ) [3]. В предлагаемой конструкции ЦКМ используются КМД с прямоугольной формой корпуса, аналогичные показанным на *рис.1г* и *рис.1д*, а также применена конструкция ПМС, которая показана на *рис.1е* (вариант 7).

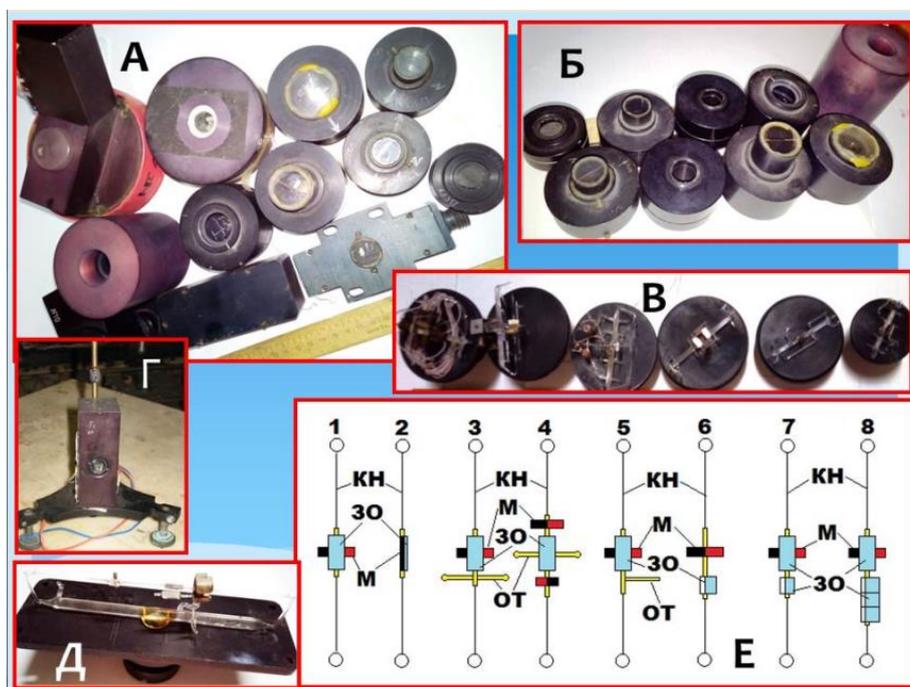


Рис.1. Общий вид различных конструкций корпусов КМД для магнитометров (а-д) и основные схемы исполнения подвесной магнитной системы (ПМС) с МЧЭ, применяемые для магнитных измерений (е).



ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА И КОНСТРУКЦИЯ ЦКМ

На *рис.2а* представлена функциональная схема ЦКМ, который построен на основе КМД и МИП. Эта схема построения для каждого измерительного канала (**ИК**) является традиционной для цифровых вариометров нового поколения [4], которые построены на КМД с применением ФЭП. Отличие схемы построения ЦКМ заключается в том, что для реализации работы прибора в режиме «магнитометра» в нее дополнительно введен трехканальный ЦАП, который позволяет автоматически устанавливать каждый КМД в необходимый измерительный диапазон с одновременной регистрацией в цифровой форме полных значений всех измеряющих составляющих ВМИ.

МИП состоит из следующих основных узлов, - блока КМД (трех ИК для измерения D, H и Z-составляющих ВМИ) и блока электроники (БЭ), установленных на юстировочной платформе (ЮП), питание которых осуществляется от внешнего источника постоянного тока.

Каждый ИК МИП представляет собой систему с замкнутой петлей отрицательной обратной связи (**ООС**) по магнитному полю (**МП**). Такое преобразование называется «преобразованием недокомпенсации», поскольку часть магнитного сигнала остается некомпенсированной и угол поворота магнита (**М**) с зеркалом (**ЗО**), - *ненулевым*. При этом глубина ООС в данной конструкции МИП составляет примерно 1000, что позволяет достигать максимальной чувствительности прибора (при динамическом диапазоне $\pm 2 \dots 5$ мкТл) порядка $0,1 \dots 0,01$ нТл.

Функциональная схема ЦКМ (см. рис.2а) включает в себя цепь последовательно включённых друг за другом преобразователей: магнитное поле/постоянный ток, ток/напряжение и напряжение/цифровой код. 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 АЦП.

*КМД преобразует вариацию МП в угол поворота МЧЭ - магнита. Оптическая система датчика (ФЭП) преобразует угол поворота зеркального отражателя (**ЗО**) закрепленного вместе с магнитом на кварцевой нити (**КН**) в линейный сдвиг светового пятна, а фотодиод преобразует линейный сдвиг этого светового пятна в фототок. Первый каскад усилителя УСИ (**МДМ**) линейно преобразует фототок в напряжение, а второй каскад усилителя УСИ (**УПТ**) усиливает сигнал до необходимой величины, после чего напряжение с его выхода линейно преобразуется в ток **Юс**. Этот ток при помощи катушки ООС преобразуется в МП, которое почти полностью (примерно на 0,999) компенсирует входной сигнал.*

*С выхода УПТ сигнал через схему интегратора (**ИНТ**), которая включает в себя фильтр нижних частот второго порядка с частотой среза 5 Гц и инвертор, - поступает на схему аналого-цифрового преобразователя (**АЦП**), где преобразуется в цифровой код (**ЦК**). Этот ЦК, соответствующий измеренным данным с выхода АЦП, - поступает на вход микроконтроллера (**МК**) и далее (при помощи последовательного интерфейса **RS-232**) к персональному компьютеру (**ПК**).*



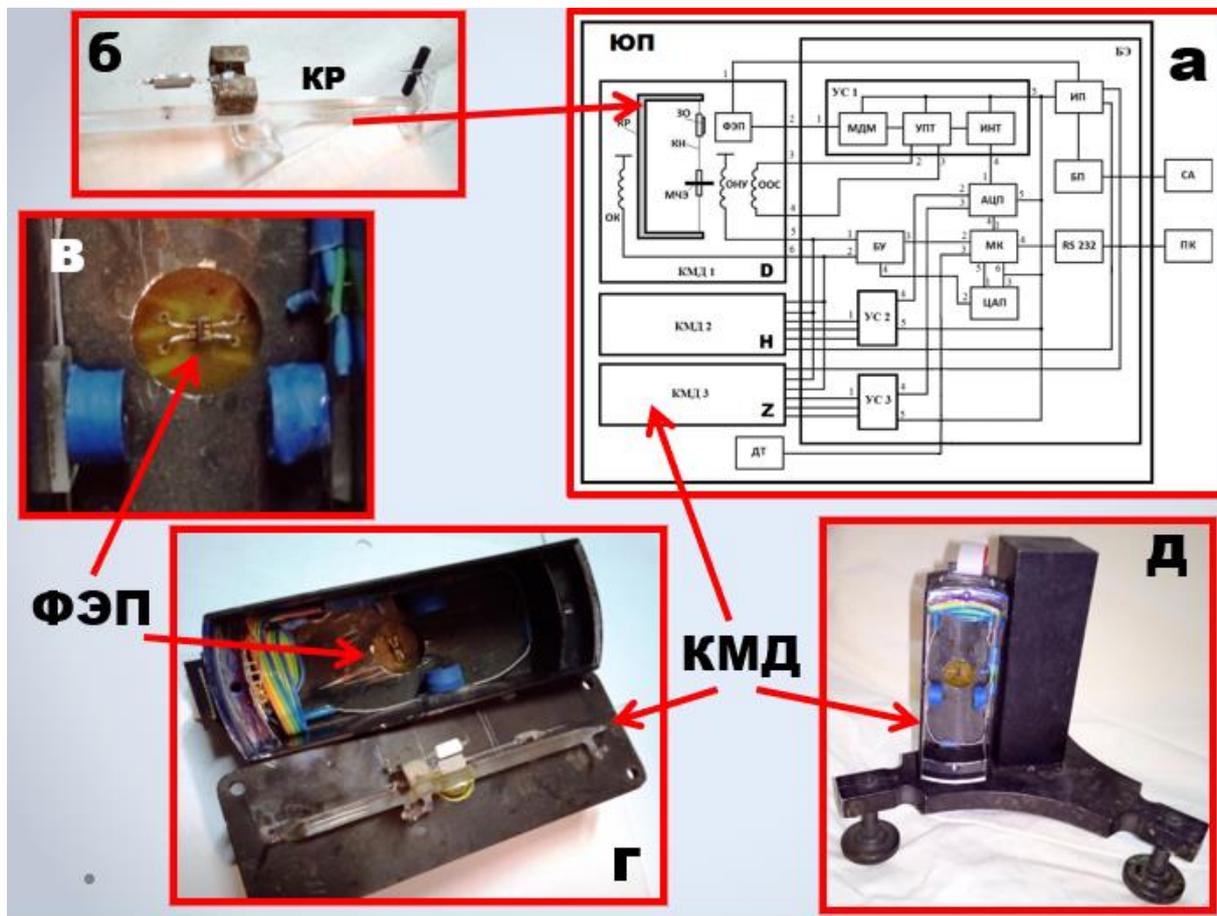


Рис.2. Функциональная схема ЦКВ (а) и общий вид конструкции блока КМД, - подвесной системы с кварцевым датчиком и ФЭП на основе ТОП.

Функционально БЭ включает в себя (см. рис.2а) схемы МДМ, УПТ, АЦП, управляющего МК и блок питания (БП). Для питания всех схем ЦКВ используется сетевой адаптер (СА) или аккумуляторная батарея (АБ). Также БЭ включает в себя схему блока управления (БУ) и датчик температуры (ДТ). ДТ располагается вблизи от КМД (обычно рядом с датчиком Z), что позволяет контролировать температуру окружающей среды в месте установки кварцевого датчика. МК контролирует работу всех узлов как автономно, так и при помощи внешнего ПК.

На рис.2б и рис.2в, рис.2г, рис.2д показаны фрагмент подвески МЧЭ на КН и конструкции отдельных элементов КМД и ФЭП (вид сверху). Блок КМД (см. рис.2а) включает в себя кварцевую рамку (КР), на которой при помощи КН закреплены МЧЭ (ПМС согласно варианта 7 на рис.1е) и зеркальный отражатель (ЗО), а также установленные в непосредственной близости от МЧЭ катушки начальной установки (ОНУ), обратной связи (ООС) и калибровки (ОК). Строго напротив ЗО расположен ФЭП, который выполнен на основе транзисторной оптопары (ТОП) отражательного типа. ТОП представляет собой миниатюрный фотоэлектрический преобразователь линейных и угловых перемещений. В данной конструкции МИП схема ФЭП линейных и угловых перемещений выполнена на базе ТОП типа АОТ137А1 с открытым оптическим каналом [5].

ЗО (размером 2x4 мм) закреплен на КН и располагается соосно центру ФЭП. В предлагаемой схеме ЗО находится на расстоянии в 10 мм от МЧЭ. Это позволяет значительно уменьшить влияние на МЧЭ источника тока питающего схему ФЭП (на рис.2а обозначенного как ИП).

Каждый блок КМД размещен (см. рис.2г и рис.2д) в герметичном прямоугольном металлическом немагнитном корпусе с размерами 120x40x40 мм, который крепится при помощи кольцевой специальной немагнитной гайки на раскладной юстировочной платформе



ЮП (см. **рис.3**) оборудованной тремя юстировочными ножками-винтами для нивелировки КМД в пространстве. На этой же ЮП установлен и корпус БЭ, который (при необходимости) может быть съёмным и удаляемым от блока КМД при проведении высокоточных измерений. Для соединения БЭ с блоками КМД применяются экранированные кабели с 10-контактными немагнитными разъёмами, длина которых может быть от 0,5 до 2,5 м. Все элементы схем БЭ расположены в немагнитном металлическом влагозащитном корпусе размером 240x165x55 мм.

Конструкция ЮП раскладного типа (см. **рис.3**) выполнена из дюралевой немагнитной пластины толщиной 10 мм и шириной 100 мм, что позволяет использовать эту конструкцию так же и для КМД круглых конструкций с высотой корпуса 40 мм. Такая конструкция ЮП оборудована жидкостными уровнями для ее нивелировки в пространстве (на **рис.3** – не показаны) и удобна как для транспортировки прибора (см. **рис.3а**), так и для его установки в экспедиционных условиях (см. **рис.3б** и **рис.3в**). Для проведения работ в условиях низких температур ЮП может быть оборудована цифровыми инклинометрами для ее нивелировки в пространстве. Раскладная конструкция ЮП позволяет проводить компонентные измерения ВМИ с ориентировкой всех КМД в «плоскости магнитного меридиана» и обеспечить компактное расположение КМД на минимальном расстоянии от БЭ и излучений, которые влияют на точность проводимых магнитометрических измерений.

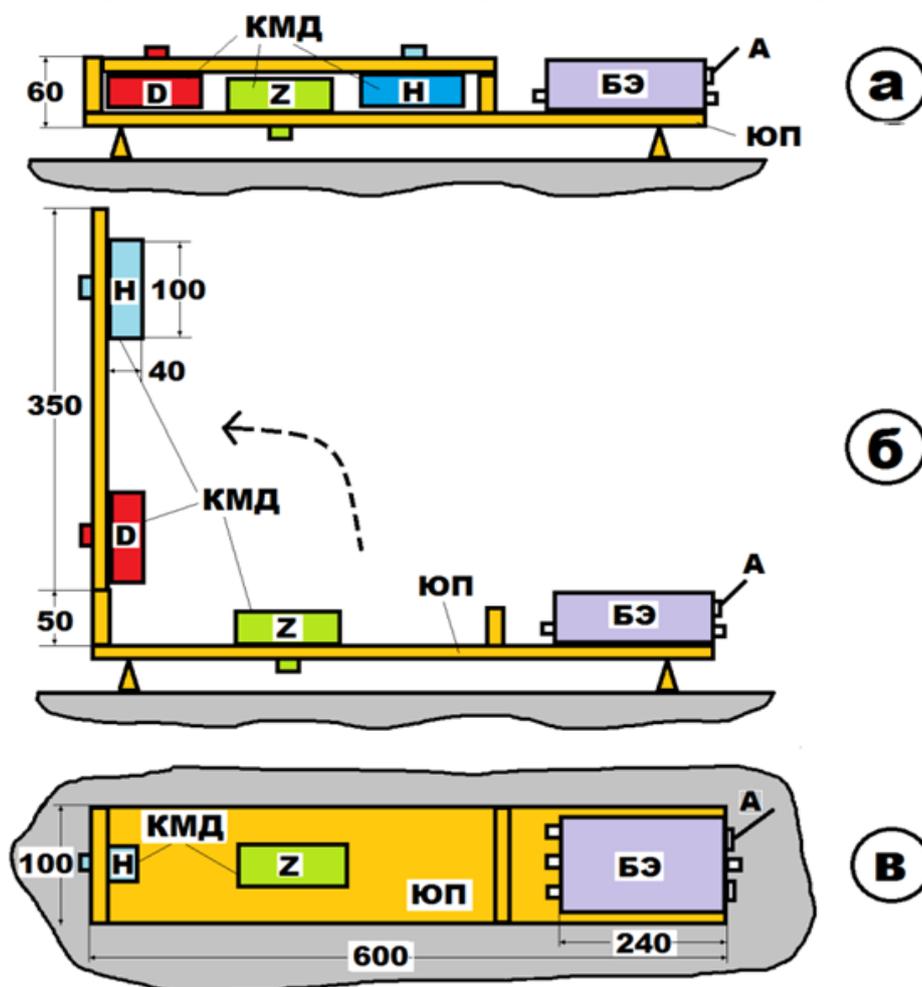


Рис.3. Общий вид конструкции ЦКМ. Юстировочная платформа (ЮП) в состоянии транспортирования (а) и в рабочем состоянии (б) и (в).

Как было показано выше схема БЭ (см. **рис.2а**) включает в себя усилитель сигнала, состоящий из трёх функциональных узлов [4]: предварительного усилителя (МДМ), УПТ и интегратора (ИНТ). Предварительный усилитель выполнен на основе мало шумящего УПТ с собственной внутренней ООС и МДМ-преобразованием.



УПТ обеспечивает основное усиление входного сигнала от схемы ФЭП. Схема УПТ совместно с ИНТ выполнена на основе микросхемы OP497FS и позволяет добиться требуемого выходного уровня аналогового напряжения для АЦП, а также осуществляет функции фильтра с частотой среза 3...5 Гц. Благодаря использованию в схеме МДМ специального дифференциального усилителя с МДМ-преобразованием (микросхема ICL7653CSA), удалось добиться уменьшения собственных шумов МИП и повышения общей стабильности работы УПТ как во времени, так и при изменении температуры окружающей среды в широких пределах.

Схема 24-разрядного АЦП (AD7734) обеспечивают оцифровку аналогового напряжения с выхода ИНТ с частотой 16 Гц. При этом точность измерения МВС реализуется на уровне 0,1 нТл и точнее. Схема трехканального ЦАП позволяет автоматически (при помощи МК) вводить каждый из КМД в его динамический диапазон измерений ступенями, каждая из которых соответствует величине этого измерительного диапазона. Например, в данной конструкции ЦКМ величина динамического диапазона каждого из КМД соответствует ± 2000 нТл. На базе микросхемы MS5614 построена схема 12-битного ЦАП с низким потреблением для каждого из трех ИК. В предлагаемой конструкции БЭ для передачи цифровых данных через эфир, - возможно включение в его схему модуля «накопителя данных», функции которого показаны в работе [4].

Управляющий микроконтроллер (МК) выполнен на базе микросхемы ATMEGA8 и осуществляет передачу цифровых данных от АЦП, обмен информацией и управляющими командами через последовательный порт (RS-232) с ПК. МК активизирует всю работу МИП, посылает управляющие команды, связанные с настройкой и проверкой работоспособности КМД на блок управления (БУ) и ЦАП.

БУ выполнен на базе цифрового аналогового низкоомного управляемого ключа ADG451, основным назначением которого является кратковременное включение калибровочного тока различной полярности в обмотки ОНУ и ОК в процессе установки и калибровки МЧЭ, а также управлением подключением ЦАП к ИК в процессе работы прибора.

К одному из входов МК через последовательный интерфейс также подключен ДТ, установленный вблизи от МЧЭ и выполненный на базе микросхемы LM35DZ. ДТ потребляет ток не более 60 мкА и конструктивно выполнен в пластмассовом корпусе, что позволяет исключить его влияние на показания МЧЭ и контролировать температуру внутри КМД с точностью $\pm 0,1^\circ\text{C}$. ДТ может быть установлен (при необходимости) и внутри корпуса БЭ.

БП построен с использованием DC-DC преобразователей типа DU1PO-12D05(N), питание которых может осуществляется как от внешнего источника постоянного тока (или от АБ) напряжением 7...24 В, так и от стандартного СА напряжением 12 ± 5 В. БП осуществляет питание всех электронных схем БЭ и ФЭП с помощью трёх стабилизированных ИП напряжением ± 5 В и 12 В. При этом потребляемая мощность ЦКМ составляет, не более 1,7...2,0 Вт.

Созданное программное обеспечение для ЦКМ обеспечивает накопление и организацию базы цифровых данных, их визуализацию в процессе проводимых работ в цифровой или аналоговой форме на дисплее ПК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённых научно-исследовательских и опытных работ создана новая конструкция компактного КМД и ЦКМ на его основе, который имеет достаточно широкий измерительный диапазон и низкий уровень собственных шумов измерительного канала.

Малое потребление энергии позволяет эффективно использовать прибор в конструкциях автономных станций с питанием от аккумуляторных или солнечных батарей, что важно при проведении полевых исследовательских и геофизических работ, а также для применения ЦКМ в редко обслуживаемых пунктах наблюдений.



В процессе последующих работ и с применением новой техники и технологий конструкция предлагаемого решения ЦКМ может быть существенно модернизирована и усовершенствована в плане создания многопараметрической платформы (измерительного модуля) для измерения некоторых геофизических данных (например, температура, давление, влажность и др.) совместно с магнитометрическими данными и на базе КМД.

Список литературы:

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. DOI: 10.5281/zenodo.3818532
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. DOI: 10.5281/zenodo.3888083
3. Любимов В.В. КВАРЦЕВЫЕ ПРИБОРЫ. Вопросы разработки. Часть 1: Особенности технологии и современная практика изготовления магнитных вариометров на примерах созданных конструкций датчиков // Приднепровский научный вестник. 2023. Уральск: Наука и образование, Volume 2, №11. С.29-51. DOI: 10.5281/zenodo.10183169_
4. Любимов В.В. Универсальный электронный блок и его варианты для построения магнитометров на базе кварцевых датчиков с фотоэлектрическими преобразователями различных конструкций // Евразийский союз учёных (ЕСУ). М., 2022. №10 (103) Том 1. С.14-22. DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2022.1.103.1731
5. Оптопара транзисторная с открытым оптическим каналом. Проспект ОАО «ОПТРОН». <http://optron.ru/electronic-components/60/329>.

