

DOI 10.58351/2949-2041.2024.16.11.015

УДК 550.380.87

**Любимов Владимир Валерьевич**, старший научный сотрудник  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова, Российской академии наук

## **НОВАЯ КОНСТРУКЦИЯ АКТИВНОГО ТЕРМОСТАБИЛИЗАТОРА ДЛЯ ЦИФРОВЫХ ВАРИОМЕТРОВ И МАГНИТОМЕТРОВ СОЗДАННЫХ НА ОСНОВЕ КВАРЦЕВЫХ МАГНИТНЫХ ДАТЧИКОВ**

**Аннотация:** В работе обсуждаются новые варианты конструкции активного термостабилизатора для цифровых кварцевых вариометров и магнитометров, которые позволяют проводить работы и научные исследования с приборами не только в условиях обсерваторий, но и в экспедиционных условиях при заметном изменении температуры окружающей среды. Применение активного термостатирования датчиков позволяет достичь высокой точности проводимых измерений и исследований.

**Ключевые слова:** магнитное поле, магнитные измерения, компонентные измерения, кварцевые магнитные датчики, цифровые вариометры и магнитометры, термостабилизаторы.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Созданные на основе кварцевых магнитных датчиков (КМД) современные цифровые магнитовариационные станции (ЦМВС) [1-5], используются в настоящее время во многих магнитных обсерваториях (МО) и пунктах наблюдений (ПН) [5-8]. Они являются прецизионными точными приборами, предназначенными для проведения непрерывных стационарных или мобильных измерений вариаций трёх составляющих вектора магнитной индукции (ВМИ) поля Земли (D, H, Z) и регистрации измеренных данных в цифровой форме при помощи персонального компьютера (ПК). Теория и режимы работы КМД, а также и присущие им погрешности, – хорошо известны и подробно описаны в работах основоположников кварцевой магнитометрии в ИЗМИРАН С.М. Мансуровым [9] и В.Н. Бобровым [10 – 12].

Добиться высокой стабильности работы любого магнитометрического прибора в широком диапазоне изменяющихся температур окружающей среды всегда для приборостроителей было достаточно трудной задачей. Вот и в области кварцевого магнитного приборостроения, где чувствительный элемент КМД состоит более чем из 100 элементов и разнородных материалов в его конструкции, – достаточно непростая задача. Это очень кропотливая работа, в частности для рабочего-кварцедува, в результате которой реально (но, – тяжело!) удаётся достигнуть значений температурного коэффициента для кварцевого датчика не лучше чем  $0,3 \text{ нТл/}^\circ\text{C}$  [10 -12]. Коллективом сотрудников под руководством В.Н. Боброва ранее уже предпринимались попытки по созданию КМД с «нулевым» ТК [11], однако они были сопряжены с достаточно кропотливым трудом кварцедува по подбору компенсирующих магнитов (КМ), устанавливаемых внутри корпуса КМД, – для ввода датчика в измерительный диапазон. Причем эти КМ должны быть одинаковыми по величине создаваемой магнитной индукции в месте установки магниточувствительного элемента (МЧЭ) каждого из КМД, но иметь противоположные по знаку ТК. И это достигалось только для работы КМД в небольшом диапазоне положительных температур и только для определенной установки прибора с известными значениями компенсационных полей. А значения ТК для КМ, которые устанавливались (как дополнительные) вне корпуса КМД при необходимости коррекции полей компенсации и вводе МЧЭ в измерительный диапазон, как правило, – были неизвестны.

В настоящее время, для получения необходимых по точности и стабильности результатов измерений при работе в широком диапазоне температур в практике МО и



необслуживаемых (**НО**) и редко обслуживаемых (**РО**) ПН широкое применение находят методы активного или пассивного термостатирования помещений (где устанавливаются ЦМВС) с использованием малогабаритных немагнитных термостатов (**ТС**) или термокамер различных конструкций для КМД, которые оборудованы цифровым контролем температуры и имеют возможности поддержания определённой температуры внутри в месте установки КМД при помощи программного управления от ПК [13].

#### НЕКОТОРЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ И СООБРАЖЕНИЯ

Известно [14], что материалы, из которых изготавливаются корпус, все детали КМД и крепежные элементы ФЭП, имеют различные температурные коэффициенты (**ТК**) линейного расширения. Их значения заметно превышают коэффициент линейного расширения кварцевого стекла, из которого сделана чувствительная подвесная система КМД. Поэтому ожидать высокую стабильность метрологических характеристик у приборов, КМД которых состоит из многочисленных различных элементов конструкции и материалов, – не приходится. Дрейфы «нулевых показаний» этих приборов связаны не только с изменением взаимного расположения КМД и элементов ФЭП в результате изменений температуры, но и с остаточными деформациями в крепежных элементах в течение времени [8, 12].

На рис.1 представлена функциональная схема одного измерительного канала (**ИК**) современного цифрового кварцевого магнитометра (**ЦКМ**), который построен на основе КМД [15]. На этом рисунке можно увидеть состав элементов конструкции (некоторые показаны схематически) и основных деталей из которых собран КМД. К таким основным деталям большинства конструкций КМД, входящих в состав каждого из ЦКМ, – относятся:

- герметично закрытый круглый точеный металлический корпус (размеры основного, серийного варианта применения –  $\varnothing 100 \times 30$  мм);
- кварцевая рамка (**КР**);
- кварцевая нить (**КН**);
- магнито-чувствительный элемент (**МЧЭ**);
- зеркальный отражатель (**ЗО**);
- фото-электрический преобразователь (**ФЭП**);
- катушки (*обмотки*) компенсации (**ОК**), начальной установки (**ОНУ**) и обратной связи (**ООС**).

К основным конструктивно-электрическим параметрам КМД относятся:

- измерительный диапазон кварцевого датчика –  $\pm 1000 \dots 2000$  нТл;
- внешний диаметр корпуса датчика – 100 мм;
- длина окружности одного витка провода, уложенного на корпус – 0,314 м;
- диаметр обмоточного провода – 0,26 мм;
- постоянная колец  $S_k$  одного витка на корпусе датчика – 12,6...13,3 нТл/мА;
- удельное сопротивление меди –  $0,0178 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ ;
- температурный коэффициент (**ТК**) меди –  $0,0043^{-1}$  (положительный);
- величина сопротивления обмотки калибровки (**ОК**) датчика – 2,2...3,4 Ом;
- величина сопротивления обмотки **ООС** датчика – 21,1...33,0 Ом;
- постоянная **ОК** датчика – 520...550 нТл/мА.

Наиболее существенными параметрами для обеспечения точности измерений КМД и построенным на их основе ЦКМ при изменении температуры окружающей среды являются параметры **ОК** и **ООС**, которые выполняются с применением медного провода (как правило, – марки ПЭВ-2). На основании этих данных произведем расчет влияния температуры на изменение сопротивления обмоток КМД и возникновения погрешности измерений ЦКМ при изменении температуры окружающей среды на  $\pm 30$  °С

Для расчета примем следующие реальные исходные данные. Пусть при калибровке в объеме датчика создается поле примерно 520 нТл. При постоянной  $S_k$ , например, 13,0 нТл/мА, – число витков в **ОК** составляет примерно 40. При диаметре корпуса датчика 100 мм длина обмотки провода в этом случае будет равна 12,56 м. Сопротивление всего провода (при его диаметре 0,26 мм и удельном сопротивлении  $0,0178 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ ) **ОК** датчика составит для меди 3,31 Ом.



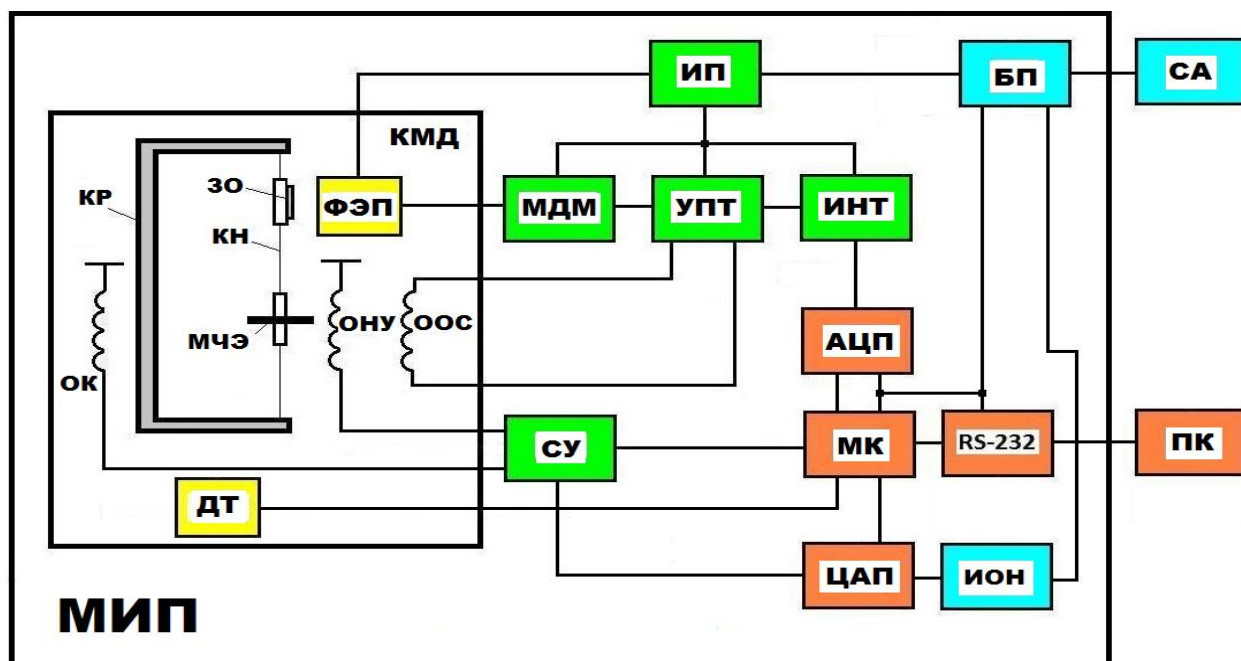


Рис.1. Функциональная схема МИП (один измерительный канал) современного цифрового магнитометра на основе КМД (схема ЦМК взята из работы [15].

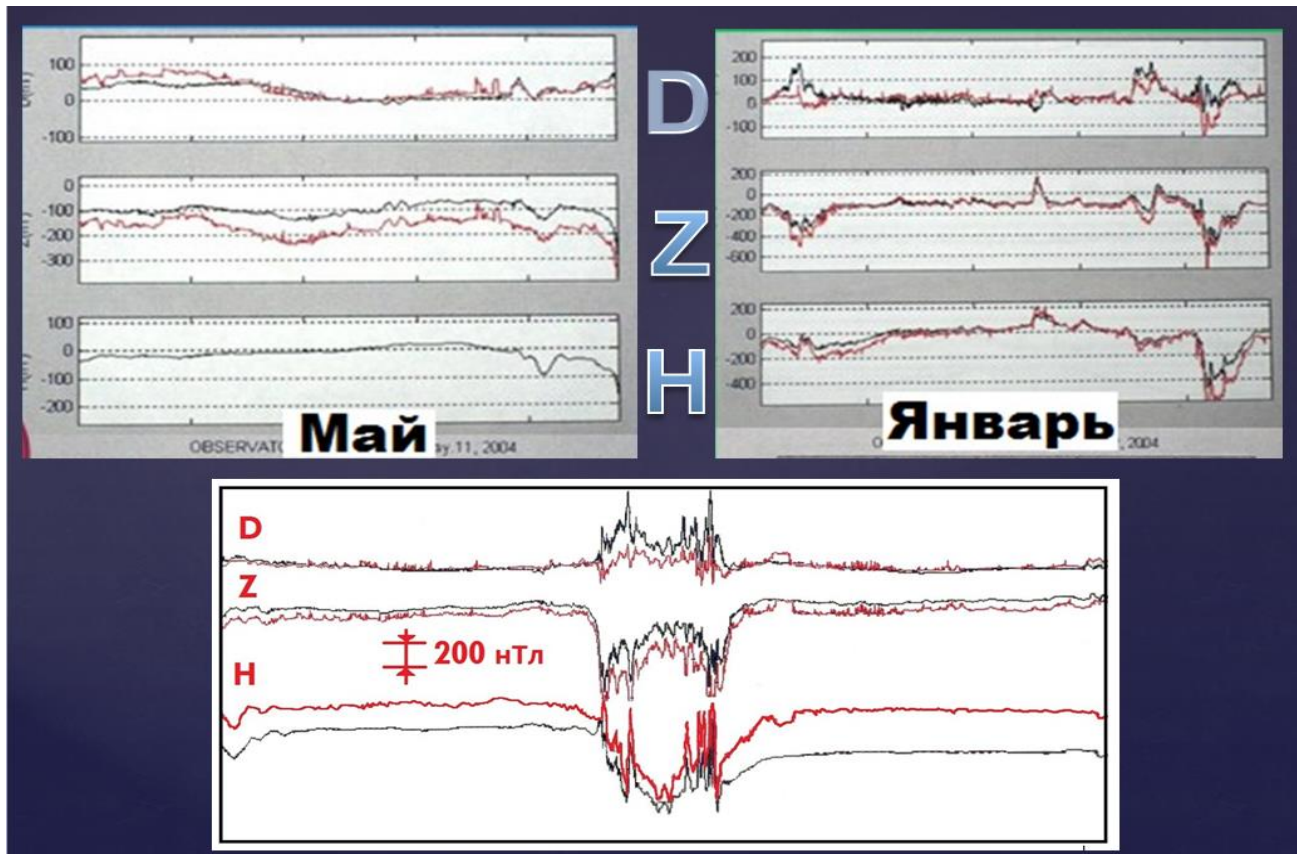
(Принятые обозначения на схеме: МИП – магнитоизмерительный преобразователь; МДМ – усилитель; УПТ – усилитель постоянного тока; ИНТ – интегратор; ИП – источник питания; БП – блок питания; СА – сетевой адаптер; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; МК – микроконтроллер; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; ИОН – источник опорного напряжения; СУ – схема управления; ДТ – датчик температуры; RS232 – последовательный канал связи с персональным компьютером – ПК).

При изменении температуры окружающей среды в диапазоне  $\pm 30$  °C сопротивление медного провода ОК датчика будет изменяться в пределах от 2,88 до 3,73 Ом, то есть на величину  $\pm 0,425$  Ом (или на  $\pm 12,8\%$ ), что в пересчете на задаваемое калибровочное поле составит значение  $\pm 66,8$  нТл. При этом температурный коэффициент ОК датчика составит  $2,22$  нТл/°C, что в пересчете даст ошибку измерения по измерительному диапазону прибора равной от  $4,27$  нТл/°C (в измерительном диапазоне  $\pm 1000$  нТл), – до  $8,53$  нТл/°C (в измерительном диапазоне  $\pm 2000$  нТл) при изменении температуры окружающей среды в выбранном диапазоне изменения рабочих температур. Расчет ТК медной обмотки обратной связи (ООС) КМД дает аналогичные результаты при определении погрешности измерения прибора в диапазоне температур.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РАСЧЕТНЫХ ДАННЫХ

Так как при изготовлении КМД, в том числе для ПН на Крайнем Севере (КС), в процессе применяемой технологии и приспособлений в условиях ИЗМИРАН [14] не представлялось возможности настройки и исследований КМД приборов при минусовых температурах, то для определения температурного коэффициента КМД и всех измерительных каналов ЦМВС были проведены экспериментальные работы на территории МО расположенных на КС [6 – 8]. Для проведения исследований использовались ЦМВС, датчики и МИП которых были размещены соответственно в неотапливаемом (имитация *полевых условий эксплуатации* прибора) и термостатируемом немагнитных павильонах. При проведении этого эксперимента регистрация вариаций трёх составляющих **ВМИ** поля Земли проводилась в районе КС в осенне-весенний и зимний период времени, – когда суточная температура воздуха меняется достаточно значительно. В нашем случае суточный перепад температур воздуха, например, в весенний период времени, – достигал значений  $15...25$ °C. Некоторые результаты этих исследований (полученные фрагменты суточных магнитограмм в различные периоды времени) представлены на рис.2.

На рисунке хорошо видно, что ход кривых практически одинаков, зато разность между ними (между данными соответствующих пар ИК) при регистрации составляющих ВМИ поля Земли разными КМД, – существенна, переменна и достигает (например, весной) значений более 200 нТл. Результаты проведенного эксперимента хорошо согласуется с приведенными выше расчетными данными по погрешности измерений, однако некоторое увеличение (от расчетного значения) разницы измеренных ИК магнитометров данных связано с ТК компенсирующих магнитов (КМ) прибора, который находился в неотапливаемом ПН, в том числе, – из-за КМ, которые находятся вне корпуса КМД.



**Рис.2. Примеры одновременной записи естественных вариаций составляющих (D, Z, H) ВМИ поля Земли двумя ЦМВС, КМД которых расположены в термостатированном помещении (чёрная кривая) и вне его (красная кривая) при изменении температуры окружающего воздуха (данные из работы [7]).**

Процесс получения экспериментальных данных наводит на мысль о необходимости для повышения точности и достоверности процесса измерений магнитометрических каналов в полевых условиях и на РО ПН некоторым образом обеспечить активную термостабилизацию КМД этих приборов.

### **НОВЫЙ ВАРИАНТ АКТИВНОГО ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ КМД**

Ранее уже принималось достаточно много разных попыток термостабилизации датчиков магнитометров и вариометров. Это всегда являлось сложной задачей, так как вблизи чувствительных элементов не должно быть искусственных постоянных и переменных токов и полей, которые могли бы давать сбои или приводить к получению помех и недостоверных результатов измерений. В настоящее время в качестве нагревательного элемента (НЭ) для различных целей применяются немагнитные нагревательные углеродные ленты (УЛ) и ткани (УТ) различных типов и размеров. Ранее в научном приборостроении УТ уже использовались в качестве НЭ, например, для обогрева МЧЭ у различного типа квантовых магнитометров [13, 16]. При этом обогрев этих МЧЭ осуществлялся переменным током на частотах, которые заметно отличались от диапазона рабочих частот ИК магнитометра.



Идея такого терморегулятора (ТР) или системы терморегулирования (СТР) может быть успешно применена и для магнитометров на основе КМД. При этом схема магнитометра (см. рис.1) отличается от схемы КМД ЦМВС тем, что у нее отсутствуют КМ, а ввод датчика в измерительный диапазон осуществляется с применением ООС и схемы прецизионного ЦАП.

В предлагаемых двух вариантах конструкции активного ТР для КМД и ЦКМ, которые показаны на рис.3, использован НЭ на основе УЛ. На этом же рисунке показаны функциональная схема СТР для ЦКМ и несколько видов (фото) конструкции термокожуха из пенофола для КМД.

Первый вариант конструкции ТР (с внутренним расположением НЭ) использует в качестве нагревателя УЛ типа ЛТ2-20. Этот НЭ при своей ширине УЛ в 20 мм и при длине в 1 метр имеет сопротивление 13...14 Ом, что позволяет обеспечить термонагрев поверхности до 40...43°C. Питание ТР осуществляется от источника постоянного (или переменного) тока напряжением 5...12 В, при этом значение тока потребления НЭ не превышает 0,9 А.

Суть предлагаемой конструкции терморегулирования КМД заключается в том, что в паз на торце его металлического корпуса накладывается один виток УЛ (см. рис.3) шириной 20 мм и длиной 330 мм, который используется в качестве НЭ. Сверху этого НЭ укладывается виток (или несколько витков) такой же ширины фторопластовой пленки-ленты (ПЛ) или ленты на основе слюдоситала. Это необходимо для электрической изоляции НЭ от рабочих обмоток (катушек) калибровки (ОК) и обратной связи (ООС) схемы КМД. Затем сверху поочередно и последовательно слоями (виток к витку) наматываются ООС и ОК. И далее, поверх этих обмоток, – надевается тонкий медный электростатический экран (сделанный из однослойного фольгированного стеклотекстолита) и термоусадочный кембрик.

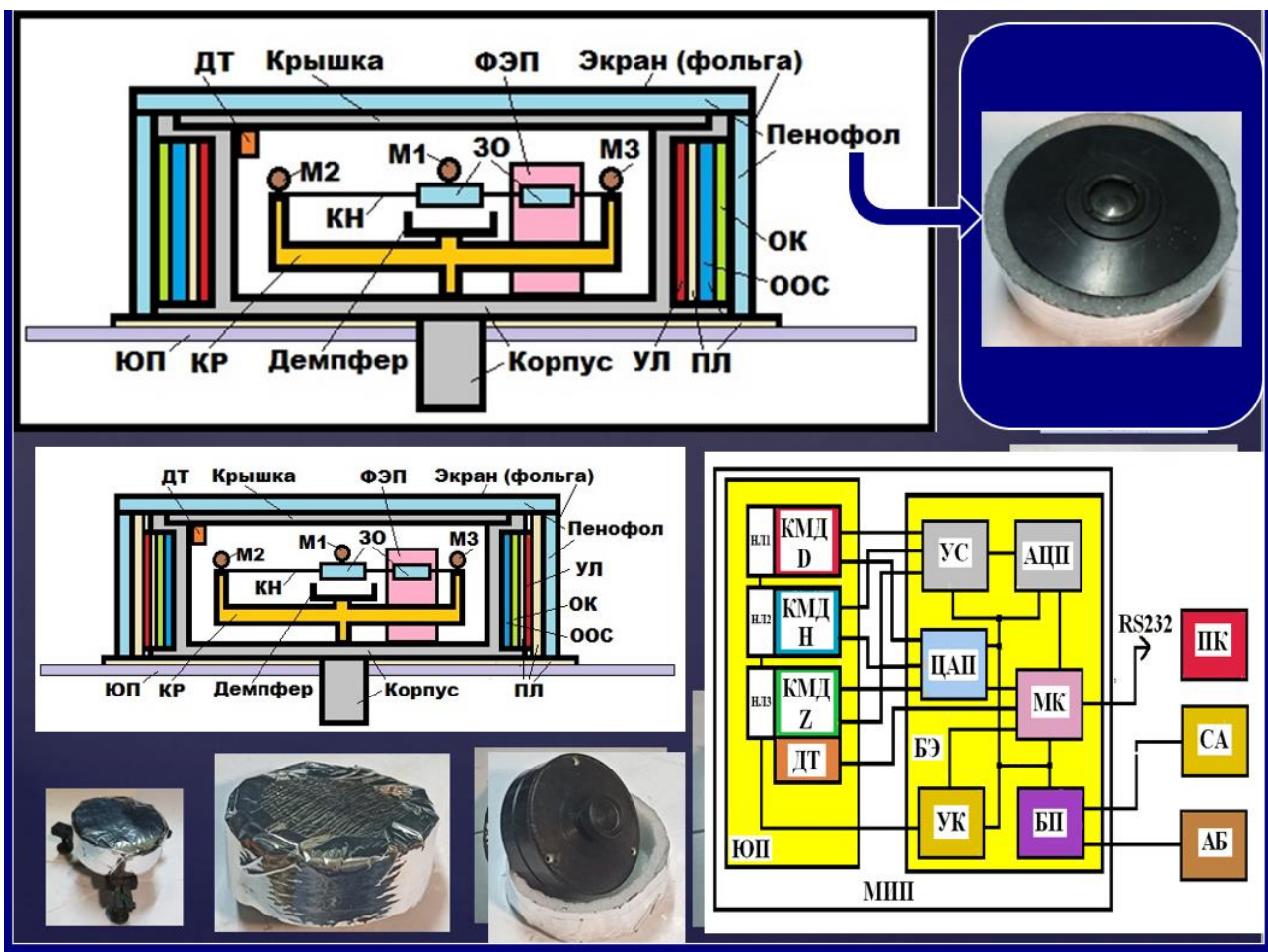


Рис.3. Два варианта конструкции ТР для датчиков ЦКМ (с внутренним и внешним расположением НЭ), функциональная схема СТР и общие виды КМД с термокожухом (фото).

Вся конструкция КМД помещается в термокожух (см. фото на рис.3) сделанный из фольгированного пенофола толщина которого составляет 5 мм. Применение фольги служит как для лучшего удержания тепла внутри ТС, так и служит в качестве дополнительного электростатического экрана для КМД.

Второй вариант конструкции ТР (с внутренним расположением НЭ) использует в качестве нагревателя УЛ типа ЛТ1-40. Этот НЭ при своей ширине УЛ в 40 мм и при длине в 1 метр имеет сопротивление 15...18 Ом, что позволяет обеспечить термонагрев поверхности КМД до 36...38°C. Питание ТР осуществляется от источника постоянного (или переменного) тока напряжением 5...12 В, при этом значение тока потребления НЭ не превышает 0,88 А. Конструкция этого варианта активного ТР отличается от описанного выше тем, что НЭ (см. рис.3) вдвое шире, располагается сверху над всеми катушками КМД (защищенными фторопластовой ПЛ) и закреплен с помощью ленты на основе слюдоситала (или фольгированного стеклотекстолита) на термокожухе из фольгированного пенофола толщиной 5 мм.

Так как самое заметное влияние изменения температуры окружающей среды оказывается на КМ измерительного канала Z-составляющей ВМИ поля Земли [8, 12, 16], то вблизи (или около) него устанавливают цифровой ДТ. В нашем случае ДТ выполнен на основе микросхемы LM35D и расположен внутри корпуса КМД Z-канала (см. рис.3). Этот ДТ имеет пластиковый корпус исполнения и потребляет ток не более 60 мкА, что позволяет исключить его электромагнитное влияние на результаты измерения МЧЭ кварцевого датчика. Этот ДТ фиксирует температуру внутри КМД с точностью 0,1°C° и передает данные при помощи одного из каналов АЦП (см. схему на рис.1) в ПК.

Управление термостабилизацией КМД осуществляет СТР, которая реализуется при помощи ПК. Для этого в БЭ ЦКМ (см. рис.3) добавлена схема управляемого ключа (УК), которая служит для управления подачей питающего напряжения (тока) определенной частоты (в нашем случае от 300 Гц и выше) в три последовательно соединенных НЭ (на схеме – НЛ1, НЛ2 и НЛ3) для установки оптимального температурного режима внутри корпуса каждого из КМД. Выбор рабочей частоты питающего НЭ источника осуществляется с помощью ПК и специального программного обеспечения (ПО). При этом выбор частоты тока нагрева и уровня его амплитуды осуществляется по результатам контроля измеренных ИК данных на дисплее ПК и влиянию процесса включения (выключения) СТР и ТР на результаты измерений ЦКМ.

Достижение указанной выше цели (заданного при помощи ПК уровня температуры внутри КМД и исключение влияния ТР и НЭ на результаты измерений) возможно при реализации трех основных рабочих режимов СТР:

- первый режим – достижение оптимальной температуры путем регулировки частоты и скважности подачи тока в НЭ;
- второй режим – достижение оптимальной температуры путем регулировки величины (амплитуды) напряжения питания от источника (или от СА);
- третий режим – достижение оптимальной температуры путем подачи питающего напряжения (тока) в моменты времени между измерениями (измерительными циклами).

Отличительным преимуществом предлагаемого устройства термообогрева КМД перед другими ТР является простота конструкции и то, что при этом отпадает необходимость в использовании отдельных дополнительных блоков и устройств ТР. Применение данного способа активного ТР, например, в условиях МО не требует наличия термокамеры и устройств для нагрева внутри нее. При необходимости, в экспедиционных или полевых условиях работы с ЦКМ в качестве дополнительного укрытия для КМД можно обойтись простым кожухом (или коробкой) из пенопласта.

Возможность экспериментального подбора частоты тока для НЭ позволяет оператору экспериментально определить оптимальные параметры для питания ТР, при которых отсутствует электромагнитное влияние НЭ на результаты измерений ЦКМ. При этом СТР и питание НЭ всегда работает в непрерывном режиме и позволяет поддерживать температуру внутри корпусов КМД на несколько градусов выше заданной в паспорте на прибор верхней границы температурного диапазона его работы.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных конструкторских работ, расчетов и экспериментальных исследований созданы новые варианты конструкции активного термостабилизатора для цифровых вариометров и магнитометров на базе КМД, которые позволяют проводить работы и научные исследования с приборами в условиях МО и экспедиционных условиях при заметном изменении температуры окружающей среды.

Применение активного термостатирования КМД с цифровым управлением от ПК позволяет достичь высокой точности проводимых ЦКМ измерений и исследований. При этом используются немагнитные НЭ, которые осуществляют непрерывное поддержание (определенного при помощи ПО) необходимого температурного режима для КМД.

### Список литературы:

1. Белов Б. А., Бурцев Ю. А., Кириаков В. Х., Любимов В. В. Цифровые кварцевые магнитные вариационные станции // *Датчики и Системы* / Новые приборы. М.: «ООО СенСиДат», 2006. №5 С.35-38.
2. Бурцев Ю.А., Кириаков В.Х., Любимов В.В. Цифровая магнитовариационная станция «КВАРЦ-4» // *Датчики и Системы* / Новые приборы. М.: «ООО СенСиДат», 2006. №1. С.45-48.
3. Любимов В.В. Станция трёхкомпонентная магнитовариационная // *Приборы*. М., 2016. №12. С.1-4.
4. Любимов В.В. Магнитовариационная станция для геофизических исследований // *Геофизический вестник*. М.: Евро-Азиатское геофизическое общество, 2016, №6. С.9-12.
5. Зайцев А.Н. Исследования в Арктике и Антарктике // Электромагнитные и плазменные процессы от Солнца до ядра Земли. М.: Наука, 1989. С.315-327.
6. Любимов В.В. К 45-летию геомагнитных исследований ИЗМИРАН на Крайнем Севере: История создания и применения цифровых магнитометров (Обзор) // *Уральский научный вестник*. Физика: Геофизика. г. Уральск: ТОО Уралнаучкнига, 2018. Volume 2 № 8, С.3-14.
7. Любимов В.В. К 45-летию геомагнитных исследований ИЗМИРАН на Крайнем Севере: Методические работы, организация пунктов наблюдений и научные исследования с применением цифровых магнитометрических приборов // *Проблемы научной мысли* / Fizika: Geofizika. Г. Днепр: ООО Каллистон, 2018. Volume 3, №12. С.3-21.
8. 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.
9. Мансуров С.М. Теория магнитных вариационных приборов // Труды НИИЗМ. М., 1957. Вып.12 (22). С.91.
10. Бобров В.Н. Температурная компенсация магнитных приборов с помощью антипараллельных магнитов // Труды ИЗМИР. М., 1960. Вып.16 (26).
11. Бобров В.Н. Универсальный высокостабильный чувствительный элемент с нулевым температурным коэффициентом для магнитометров, вариометров и микровариометров, регистрирующих любую компоненту земного магнитного поля // Труды ИЗМИРАН. М., 1961. Вып.18 (28). С.54.
12. Бобров В.Н. Опыт работы с кварцевыми магнитными вариометрами в неблагоприятных метеорологических условиях // Геомагнетизм и аэрномия. М.: Наука, 1968. Т.8, №2.
13. Любимов В.В. Управляемый термостат для цифровых кварцевых магнитовариационных станций // *Приборы*. М., 2017. №6. С.5-11.
14. 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, Vol. 2, №11. С.29-51.



15. Любимов В.В. Новый вариант цифрового магнитометра на основе компактного кварцевого датчика для различного применения // *Вектор научной мысли*. 2023. СПб: МИПИ им. Ломоносова, №5 (5). С.207-213.

16. Любимов В.В. КВАРЦЕВЫЕ ПРИБОРЫ. Вопросы разработки. Часть 3: Способы термостатирования кварцевых датчиков различных конструкций и их реализация // *Вектор научной мысли*. 2024. СПб.: МИПИ им. Ломоносова, №3 (8). С.159-167.