

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, г. Москва, г. Троицк
ORCID: 0000-0002-3316-4656

КВАРЦЕВЫЕ ПРИБОРЫ. ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ. ЧАСТЬ 3: СПОСОБЫ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ КВАРЦЕВЫХ ДАТЧИКОВ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ИХ РЕАЛИЗАЦИЯ

ВВЕДЕНИЕ

Главная задача магнитометрических приборов применяемых в магнитных обсерваториях (МО) состоит в проведении длительных измерений, причём эти измерения должны быть стабильны во времени. Получаемые данные таких приборов не должны быть «осложнены» заметным дрейфом нулевого (базисного) уровня измерительных каналов на длительном временном интервале, а также заметным изменением показаний от влияния погодных (в основном изменением температурных) условий при их эксплуатации. Ранее, проводились работы и исследования [1-7], а также предпринималось много попыток и различных способов термостабилизации датчиков различных магнитометров и вариометров [8-12]. Это всегда являлось сложной задачей, так как вблизи чувствительных элементов магнитометров не должно быть искусственных постоянных и переменных токов и электромагнитных полей, которые могли бы давать сбои или приводить к получению недостоверных результатов измерений. Предпринимались многочисленные попытки для улучшения условий работы магнитных датчиков, обеспечения им максимально комфортного температурного режима работы (их термостатирования) и, при этом, чтобы не было каких-либо помех процессу измерения [12-14].

Следует отметить, что термостатирование датчиков измерительных приборов необходимо не только в условиях МО, где не поддерживается необходимый температурный режим в измерительных павильонах, но, в основном, - это необходимое условие для проведения работ в необслуживаемых (НО) или редко обслуживаемых (РО) измерительных павильонах и пунктах наблюдений (ПН), а также в условиях экспедиционных полевых работ.

В качестве экспериментов с датчиками кварцевых цифровых магнитовариационных станций (ЦМВС), которые нашли наибольшее применение в МО, в ИЗМИРАН в последние годы было реализовано несколько способов и вариантов термостатирования кварцевых магнитных датчиков (КМД), речь о которых пойдет ниже.

РЕАЛИЗОВАННЫЕ СПОСОБЫ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ КМД

Некоторые современные КМД, по типу своей конструкции и применяемым в них элементам (при правильном их изготовлении для указанной в ТЗ измерительной точки), - являются достаточно термостабильными приборами. Но это их достоинство отлично реализуется при использовании КМД только в положительном диапазоне рабочих



температур [3, 6]. На *рис.1* показаны конструкции основных вариантов КМД, которые применялись в ранних разработках аналоговых приборов (а), а также используются в современных ЦМВС (б, в). Термостабилизация КМД для работы в широком диапазоне температур (в том числе и отрицательных) необходима для того, чтобы стабилизировать магнитный момент (ММ) и влияние дополнительных компенсирующих магнитов (КМ), которые применяются в отдельных случаях для ввода КМД в необходимый рабочий измерительный диапазон (КМ на *рис.1* обозначены как М1 и М2) [16-18].

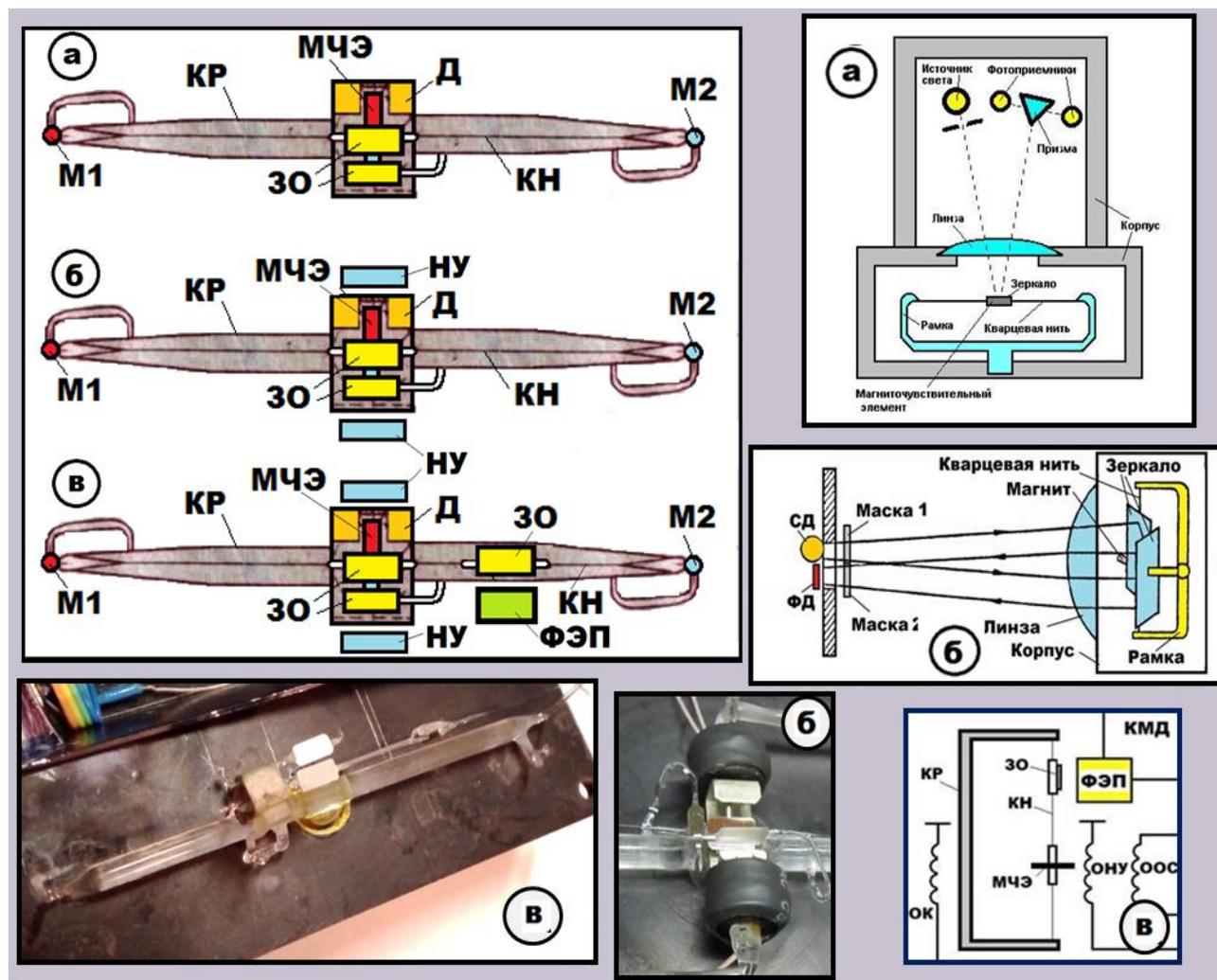


Рис.1. Схемы фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) и конструкций ранее серийно выпускаемых вариометров (а) и современных вариометров для ЦМВС (б) и (в).

Самый простой способ термостабилизации КМД с КМ был ранее реализован некоторыми создателями ЦМВС при помощи обычных остеклованных немагнитных мощных сопротивлений, используемых в качестве нагревательных элементов (НЭ). Эти НЭ устанавливались в верхних углах термокамеры (ТК) или термокожуха, выполненного, как правило, из пенопласта, на некотором удалении от юстировочной платформы (ЮП), с установленными на ней КМД. При этом НЭ работали на постоянном или переменном токе с частотой 50 Гц. Однако управление их включением и выключением давало заметные изменения показаний на записях измерительных каналов ЦМВС, которые превышали 5 нТл.



Некоторые созданные в 80-е годы варианты кварцевых ЦМВС (например, ЦАИС, СИГМА и ЦМВС-6) для работы в МО и ПН, в условиях с большим изменением температуры окружающей среды, - были выполнены на основе пассивного термостата совместно с активным поддержанием внутри него необходимой температуры. Примером такого вида комбинированного термостатирования явились конструкции датчиков ЦМВС [8-10], которые представлены на *рис.2*. Следует отметить, что данная конструкция КМД получилась достаточно громоздкой, тяжелой и не экономичной, а также не всегда удобной при проведении полевых экспедиционных работ (например, у ЦАИС мощность потребления от источника питания постоянного тока составляет 20 Вт [9]).



Рис.2. Общий вид ЦМВС и системы термостабилизации КМД, которые установлены на ЮП.

Другим примером способа термостабилизации КМД является установка НЭ совместно с датчиком температуры (ДТ) непосредственно на ЮП, как это сделано в конструкции ЦМВС «Кварц-7» [15] и представлено на *рис.3*. При этом блок датчиков (ЮП и три КМД) устанавливаются в специальный термокожух (ТК) размерами 70x40x40 см (на *рис.3* он не показан).





Система термо стабилизации датчиков ЦМВС «Кварц-7»

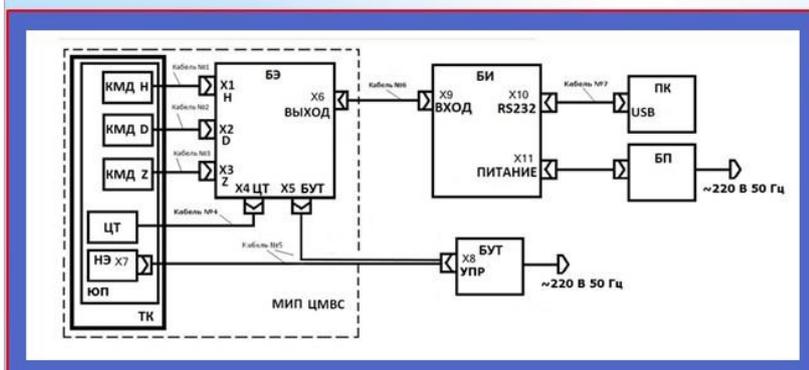


Рис.3. Схема установки НЭ и ДТ на ЮП
и функциональная схема ЦМВС «Кварц-7».

Как следует из описания, эта ЦМВС предназначена для проведения непрерывных стационарных измерений в МО и может быть использована при проведении полевых экспедиционных работ в условиях НО и РО пунктов наблюдений. При этом нормальные условия эксплуатации ЦМВС с регламентируемым температурным коэффициентом (ТКД) для каждого из КМД в МО, - работа в диапазоне температур от 15 до 25С°.

Схема термостатирования ЦМВС (см. *рис.3*) состоит из блока управления термостатом (БУТ), цифрового термометра (ЦТ), НЭ и термокожуха (ТК). Управление нагревом и поддержанием заданных температурных условий в районе КМД осуществляется с помощью персонального компьютера (ПК) и специального программного обеспечения (ПО). При этом ПК регистрирует данные ЦТ о температуре в ТК и управляет работой БУТ, подавая напряжение (порядка 16 В) переменного тока с частотой 50 Гц на НЭ (два резистора с общим номиналом 7,8 Ом). Мощность потребления терморегулятора (ТР) в этом случае составляет не более 30 Вт. При включенном активном терморегулировании допустимый диапазон рабочих температур для КМД при работе в полевых и экспедиционных условиях увеличивается от минус 20 до 35 С°, однако ТКД и точность измерений в этом диапазоне не регламентируется [15].

В процессе работ по созданию ЦМВС были рассмотрены варианты использования (в качестве НЭ) современных достижений науки и техники. Была изучена возможность применения в качестве НЭ для ЦМВС греющих силиконовых пластин, плёночных нагревателей с изоляцией из полиамида, полиэфировых тонкоплёночных нагревателей и гибких нагревательных кожухов. А также изучались возможности использования некоторых стандартных типов современных ТР. Все эти созданные промышленные НЭ по разным параметрам и причинам обладали существенными недостатками, главным из которых



является, - заметное магнитное влияние на КМД, в том числе в выключенном их состоянии. Был также рассмотрен вопрос применения немагнитного нагревательного кабеля с тефлоновой изоляцией типа SH-2FP, однако к нему требовался специальный дорогостоящий ТР.



Система термо стабилизации датчиков ЦМВС «Кварц-4МО»

Рис.4. Общий вид КМ, расположенных в различных конструкциях КМД, а также функциональная схема системы терморегулирования ЦМВС и элементы ее конструкции.

В последние годы результате проведённых экспериментов и испытаний были разработаны и изготовлены конструкции ТК и блока ТР для кварцевых ЦМВС (серии «Кварц-4МО»), которые используются для проведения магнитных наблюдений в МО [13]. Общая функциональная схема этих приборов представлена на *рис.4*. На этом же рисунке показаны внешний вид устройства ТК и блока ТР, а также представлен общий вид и конструкция НЭ входящего в состав ТК. Длина соединительного экранированного кабеля между блоком ТР и ТК может быть разной от 4 до 10 м.

Кожух ТК выполнен на основе немагнитного материала – пеноплекса, толщина которого 50 мм и внешние размеры – 680x450x420 мм (при максимальных габаритных размерах различных конструкций ЮП с КМД у ЦМВС - 500x220x240 мм). В качестве НЭ в этой конструкции используется кабель нагревательный саморегулирующийся (**КНС**) типа 17КСТМ-2-Т [13], который питается от источника переменного тока напряжением 220 В и имеет номинальную мощность потребления энергии 17 ВА на каждый метр своей длины. КНС имеет оболочку из термопластичного эластомера со степенью защиты IP67. Эффект саморегулирования КНС основан на применении в нем специальной полупроводниковой матрицы, которая меняет свои проводящие свойства в зависимости от окружающей температуры. С увеличением температуры увеличивается сопротивление КНС, а значит и



уменьшается протекающий через него ток, что в свою очередь приводит к уменьшению выделяемой тепловой мощности. При уменьшении температуры происходит обратный процесс, при этом каждый участок КНС меняет свои свойства от конкретной температуры на определённом участке вне зависимости от других участков. Длина и расположение КНС в зависимости от конфигурации и размеров ТК могут быть разными. В нашем случае длина КНС была выбрана 4 м, при этом максимальное потребление энергии от сети переменного тока составило примерно 70 ВА, а ток потребления всей схемы не более 0,32 А.

Схема и работа ТР и характеристики его составных элементов подробно описаны в работах [13. 14]. Основными элементами схемы ТР являются (см. *рис.4*): блок питания (БП), таймер и блок управления (БУ).

БУ позволяет реализовать три варианта использования блока ТР:

- использование в режиме саморегулирования КНС;
- использование режима терморегулирования при помощи выносного ДТ и установки необходимого уровня (значения) поддержания температуры в ТК при помощи БУ;
- использование режима терморегулирования при помощи ПК с использованием цифровых данных ЦМВС от ДТ, установленного в ТК на ЮП в непосредственной близости от одного из КМД (как правило, от измерительного канала Z, находящегося в центре ТК).

В первом случае, после момента включения, схема ТР реализует режим максимально возможной стабильной (но не более 48...50°C) температуры внутри ТК в течение 30...60 мин в зависимости от температуры внешней окружающей среды.

Второй вариант использования блока ТР предусматривает использование внешнего аналогового ДТ, который устанавливается внутри ТК.

Третий вариант использования блока ТР предусматривает управление необходимым температурным режимом внутри ТК при помощи ПК, который подключается по последовательному каналу связи RS-232. В этом случае, с помощью специального ПО, анализируются данные цифрового канала измерения температуры ЦМВС, в результате чего по каналу связи «ПК-ТР» поступает управляющий сигнал на БУ и происходит включение/выключение КНС. Таким образом осуществляется поддержание блоком ТР заданной программно температуры внутри ТК с точностью цифрового термометра, то есть порядка $\pm 0,1^\circ\text{C}$.

Первые два варианта использования ТР предпочтительны для работы в условиях НО и РО пунктах наблюдений, а также в экспедиционных условиях. Третий вариант более подходит для работы в условиях МО, где стабильность работы ЦМВС является главной задачей её работы.

Для обеспечения минимального электромагнитного влияния (процесса включения/выключения тока в НЭ) на результаты измерения ЦМВС, конструкция нагревательного элемента (КНС) в ТК выполнена в виде плоской спирали (см. *рис.4*), закреплённой на немагнитном металлическом радиаторе круглой формы. Этот радиатор крепится на одной из вертикальных боковых стенок съёмного кожуха ТК напротив КМД измерительного канала D ЦМВС на максимально возможном расстоянии от него.

Процесс включения (добавления) тока в НЭ (КНС), при его саморегулировании, - происходит плавно, а не скачкообразно как при использовании схемы включения НЭ при помощи обычного реле. При этом влияние работы НЭ на результаты измерений других каналов ЦМВС, которые отстоят от него ещё дальше, оказывается практически незаметным, не более 0,1...0,2 нТл.

По результатам испытаний оказалось, что коэффициент термостабилизации ТК (при надлежащей её герметизации и герметизации входящих кабельных соединений с БЭ ЦМВС) был достаточно высоким, порядка 10. То есть при изменении внешней температуры окружающей среды на каждые 10°C, - температура внутри ТК в режиме саморегулирования изменялась не более чем на 1°C и всегда КМД находились в достаточно комфортных условиях при положительном (не менее 35°C) значении температур.



НОВЫЙ ВАРИАНТ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ КМД

В настоящее время автопром стал активно использовать в качестве НЭ для различных целей немагнитные нагревательные углеродные ленты (УЛ) и ткани (УТ) различных типов и размеров, в том числе для нагрева салонов автомобилей и обогрева одежды. Ранее УТ в научном приборостроении уже использовались в качестве НЭ, например, для обогрева чувствительных элементов (ЧЭ) у различного типа квантовых магнитометров [12, 16]. При этом обогрев этих ЧЭ осуществлялся переменным током на частотах, которые заметно отличались от диапазона рабочих частот измерительного канала (ИК) магнитометра. Идея такого ТР или системы терморегулирования (СТР) может быть успешно применена и для магнитометров на основе КМД.

В предлагаемой конструкции ТР для КМД и ЦМВС, которая показана на *рис.5*, использован НЭ на основе УЛ типа ЛТ1-40. Этот НЭ (УЛ при своей ширине в 40 мм и длине в 1 метр) позволяет обеспечить термонагрев поверхности до 38С° при его питании от источника постоянного тока напряжением 12 В. При этом ток потребления НЭ не превышает 0,9 А.

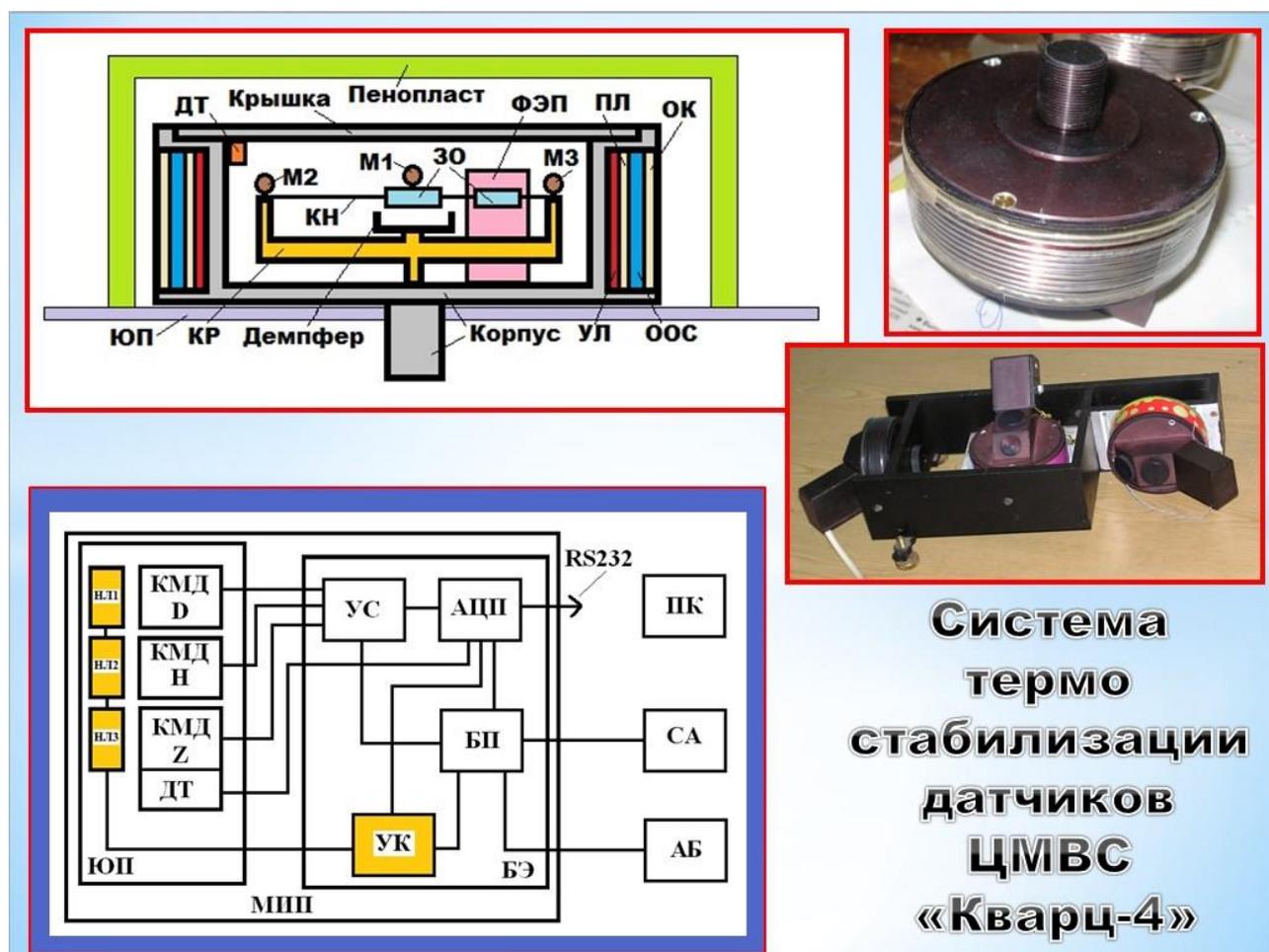


Рис.5. Функциональная схема ТР для ЦМВС и конструкция КМД с использованием УЛ в качестве НЭ.

Суть предлагаемой конструкции терморегулирования КМД заключается в том, что в паз на торце его металлического корпуса накладываается один виток УЛ (см. *рис.5*) шириной 40 и длиной 330 мм, который используется в качестве НЭ. Сверху этого НЭ укладываются 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. Общий вид (фото) КМД в сборе показан на **рис.5**. Здесь также показан общий вид ЮП (компактный полевой вариант) с установленными на ней КМД.

Так как самое заметное влияние изменения температуры окружающей среды оказывается на КМ измерительного канала Z-составляющей ВМИ поля Земли [16, 18], то вблизи (или около) него устанавливаются цифровой ДТ. В нашем случае ДТ выполнен на основе микросхемы LM35D и расположен внутри корпуса КМД Z-канала. Этот ДТ имеет пластиковый корпус исполнения и потребляет ток не более 60 мкА, что позволяет исключить его электромагнитное влияние на результаты измерения ЧЭ кварцевого датчика. Этот ДТ фиксирует температуру внутри КМД с точностью 0,1С° и передает данные при помощи одного из каналов АЦП (см. схему на **рис.5**) в ПК.

Управление термостабилизацией КМД осуществляет СТР, которая реализуется при помощи ПК. Для этого в БЭ ЦМВС 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 – УЛ1, УЛ2 и УЛ3) для установки оптимального температурного режима внутри корпуса каждого из КМД. Выбор рабочей частоты питающего НЭ источника осуществляется с помощью ПК и специального ПО. При этом выбор частоты тока нагрева и уровня его амплитуды осуществляется по результатам контроля измеренных данных и видимой на дисплее ПК и визуализации процесса включения ТР на результаты измерений ЦМВС. Достижение указанной выше цели (заданного при помощи ПК уровня температуры внутри КМД) 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) питающего напряжения 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 от ЦМВС дополнительных блоков и устройств ТР. Применение данного способа ТР, например, в условиях МО не требует наличия ТК и устройств для его нагрева внутри. При необходимости, в экспедиционных и полевых условиях работы, - для ТК можно обойтись простым кожухом (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 ЦМВС. При этом 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, как это делается у промышленных термостатируемых высокоточных кварцевых генераторов и резонаторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном обзоре рассмотрены некоторые известные из литературных источников информации варианты термостатирования КМД для различных конструкций выпускаемых ранее и в настоящее время ЦМВС. Обсуждаются достоинства, возможности и недостатки существующих конструкций ТР, связанные с особенностями влияния термообогрева датчиков на результаты их измерения вариаций ВМИ поля Земли при работе в различных условиях применения приборов.



Предложен новый вариант термостатирования КМД и предложена новая конструкция ТР, позволяющая реализовать различные режимы его использования при постоянном контроле и оценке результатов влияния НЭ на измерительные каналы ЦМВС.

Список литературы:

1. Бобров В.Н. Температурная компенсация магнитных приборов с помощью антипараллельных магнитов // Труды ИЗМИР №16(26), 1960. С.107-116.
2. Бобров В.Н. Температурная компенсация кварцевых Z-вариометров и влияние влажности на их показания // Труды ИЗМИР №16(26), 1960. С.117-143.
3. 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.55-67.
4. Бобров В.Н. Серия кварцевых магнитных вариометров // Геомагнетизм и аэрономия. М., 1962. Т.2, №3. С.348-356.
5. Бобров В.Н. Кварцевые геомагнитные приборы // Вестник Академии наук СССР. М., 1963. Вып.2. С.82-84.
6. Бобров В.Н. Магниты с нулевыми температурными коэффициентами // Геомагнетизм и аэрономия. М., 1965. Т. 5, № 5.
7. Бобров В.Н., Павлович Л.К. О влиянии влажности на показания QНМ // Геомагнетизм и аэрономия. М., 1967. Т. 7, № 4. С.756-758.
8. Станция информационная геофизическая микропроцессорная автономная «СИГМА». Проспект ЦФП Института общей физики АН СССР, 1987. – 3 с.
9. Станция цифровая автоматическая измерительная ЦАИС. Проспект СКБ ФП Института общей физики АН СССР, 1987. – 4 с.
10. Цифровая магнитовариационная станция ЦМВС-6. Проспект СКБ ФП Института общей физики АН СССР, 1987. – 2 с.
11. Высокостабильная 3-компонентная кварцевая магнитовариационная станция «Кварц-ЗЕМ». Проспект ИЗМИРАН. Троицк, 2004. – 4 с.
12. Любимов В.В. К вопросу повышения точности измерений магнитного поля: Опыт термостатирования датчиков магнитометров // Приднепровский научный вестник / Геофизика. Г. Днепр: Наука и образование, 2017. Том 3. №4. С.84-93. DOI: 10.5281/zenodo.5593677.
13. Любимов В.В. Управляемый термостат для цифровых кварцевых магнитовариационных станций // Приборы. М., 2017. №6. С.5-11. DOI: 10.5281/zenodo.2567264.
14. Любимов В.В. Вопросы термостабилизации датчиков кварцевой магнитовариационной станции: специальная конструкция нагревательного элемента как средство для уменьшения влияния терморегулятора на результаты измерений магнитного поля / Евразийское научное объединение. М., 2019. №2 (48). С.343-346. DOI: 10.5281/zenodo.2590768
15. Станция трехкомпонентная цифровая магнитовариационная (ЦМВС) «КВАРЦ-7». Техническое описание и инструкция по эксплуатации ВСПИ.416633.001 ТО. М.: ИЗМИРАН, 2019. – 38 с.
16. 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.
17. Любимов В.В. Некоторые отличия кварцевых датчиков для современных ЦМВС от датчиков для аналоговых вариометров // Перспективные исследования в технических и естественных науках: сборник статей. Международная научная конференция (Великий Новгород, Май 2024). СПб.: МИПИ им. Ломоносова, 2024. С.21-24. DOI: 10.58351/240312.2024.71.99.002.



18. 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.

