

УДК 550.361

© Д. В. Лиходеев, В. В. Гравиров, К. В. Кислов, С. М. Долов, 2019

ПРЕЦИЗИОННЫЕ УЗКОДИАПАЗОННЫЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ДАТЧИКИ

С целью исследования тонкой структуры температурных полей в толще горных пород, а также учета внутренних температурных вариаций в различных геофизических приборах созданы прецизионные узкодиапазонные температурные датчики, позволяющие проводить температурные измерения с относительной погрешностью не более $0.005\text{ }^{\circ}\text{C}$. В статье рассмотрены принципиальные способы достижения требуемой точности измерений, калибровки, установки необходимого рабочего температурного диапазона датчиков. Проведение измерений с использованием разработанных датчиков в штольне Баксанской нейтринной обсерватории ИФЗ РАН позволит получить уникальные данные о структуре и динамике теплового поля в окрестности вулкана Эльбрус.

Кл. сл.: температурные датчики, тепловое поле Земли, мониторинг

ВВЕДЕНИЕ

Исследование тонкой структуры температурных полей в толще горных пород в связи с малой скоростью распространения температурных возмущений и высокой долговременной температурной стабильностью требует высокоточных измерений вариаций температуры. Такое измерение временных вариаций температур с высокой точностью позволит получить оценку динамики температурных полей в толще горных пород уже в течение относительно непродолжительных сроков наблюдения. Установка подобных датчиков после их предварительной одновременной калибровки с разнесением их по вертикали позволит проводить экспериментальные высокоточные измерения динамики теплового потока. В качестве полигона для тестирования системы температурного мониторинга была выбрана уникальная геофизическая лаборатория № 2, находящаяся в составе Северо-Кавказской геофизической обсерватории ИФЗ РАН и располагающаяся в штольне Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН (БНО ИЯИ РАН) на расстоянии 4100 м от устья штольни [1].

Однако возможное применение приборов подобного типа не ограничивается только измерением температур горных пород или разнообразных грунтов. Такие высокочувствительные термометры позволят проводить высокоточный мониторинг температур внутри любых геофизических приборов. Окружающая температура, как и температурный режим внутри, например, сейсмометра, ока-

зывают существенное влияние на значения его выходных сигналов [2]. В связи с этим очевидно, что при проведении особо точных наблюдений совершенно необходимо вести измерение температуры подобных приборов [3, 4]. Неоценимую помощь такие термометры могут оказать при проектировании и отладке новых приборов, поскольку установка любых исполнительных устройств или электронных схем во внутреннем объеме сейсмических приборов будет вызывать внутренний локальный нагрев воздуха внутри прибора, что может приводить как к возникновению конвекционных воздушных потоков, так и к появлению длиннопериодных термических волн, оказывающих влияние и на элементы конструкции прибора, и на сам чувствительный элемент прибора, например маятник, в случае сейсмометра [5]. Помехи подобного типа относятся к классу трудно идентифицируемых. Учет их влияния до сегодняшнего дня весьма затруднителен ввиду отсутствия необходимых приборов — высокочувствительных малогабаритных электронных термометров.

ПРЕДПОСЫЛКИ К РАЗРАБОТКЕ

Температурные измерения, проводившиеся в БНО ИЯИ РАН с использованием различного типа датчиков [6, 7], позволили получить предварительную оценку температурных полей в ее окрестностях (рис. 1). На основе полученных ранее результатов измерений был сделан вывод о высокой



Рис. 1. Динамика температуры в конце выработки лаборатории № 2. Длительность записи 6 месяцев. Измерение поверхностных температур производилось при помощи миниатюрных термографов (логгеров) High Capacity Temperature Loggers iButton. Точность измерения 0,1 °C [7]

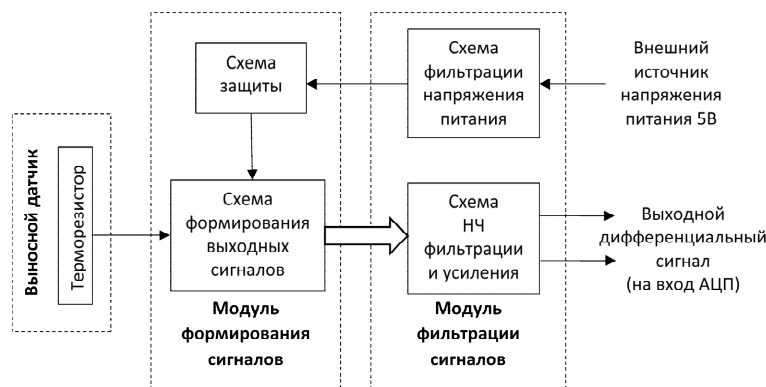


Рис. 2. Базовая блок-схема термометра

стабильности температуры в вырубке лаборатории № 2, однако из-за физической невозможности расположить датчики на достаточно большом расстоянии друг от друга по вертикали, ввиду того что высота штольни составляет всего 3,5 м и точность измерения использованных датчиков была не более 0,1 °C, погрешность измерений не позволила получить данные низкоамплитудных температурных флуктуаций.

Для измерения температур в отверстиях, пробуренных в штольне БНО ИЯИ РАН в рамках работ по совершенствованию системы температурного мониторинга в штольне Баксанской нейтринной обсерватории в ИФЗ РАН разработаны новые прецизионные узкодиапазонные (диапазон измерений не более 20 °C) дифференциальные температурные датчики, предназначенные для сверхточного измерения вариаций температур (с чувствительностью не хуже 0,005 °C). Проведение новых экспериментальных наблюдений с использованием этих термометров позволит в ближайшее время получить уникальные данные о структуре и динамике теплового поля.

ОПИСАНИЕ РАЗРАБОТКИ

Для прецизионного измерения температур в условиях их высокой стабильности была разработана схема специализированного узкодиапазонного дифференциального термометра, состоящего из нескольких взаимосвязанных блоков, представленных на рис. 2.

В качестве основного термочувствительного элемента термометра был выбран платиновый терморезистор, обладающий практически линейной температурной зависимостью изменения внутреннего сопротивления от внешней температуры, великолепной долговременной стабильностью базовых характеристик. Применение подобного типа терморезисторов позволяет проводить оперативную и нетрудозатратную замену одного терморезистора на другой в случае неисправности ввиду практически идентичных терморезистивных значений (с точностью до единиц Ом), а также отличной терморезистивной точности (соответствия реальных и теоретических значений зависимости сопротивления от температуры) в большом

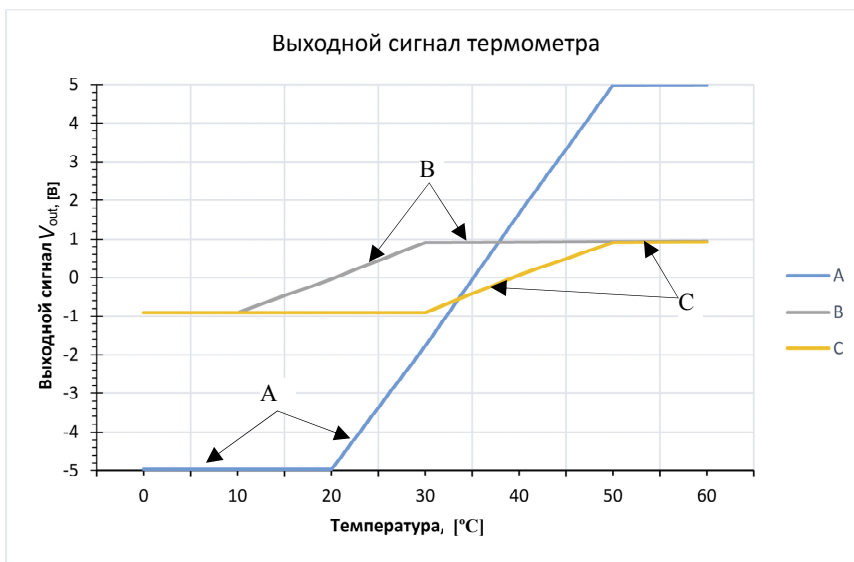


Рис. 3. Семейство зависимостей выходного сигнала термометра от температуры

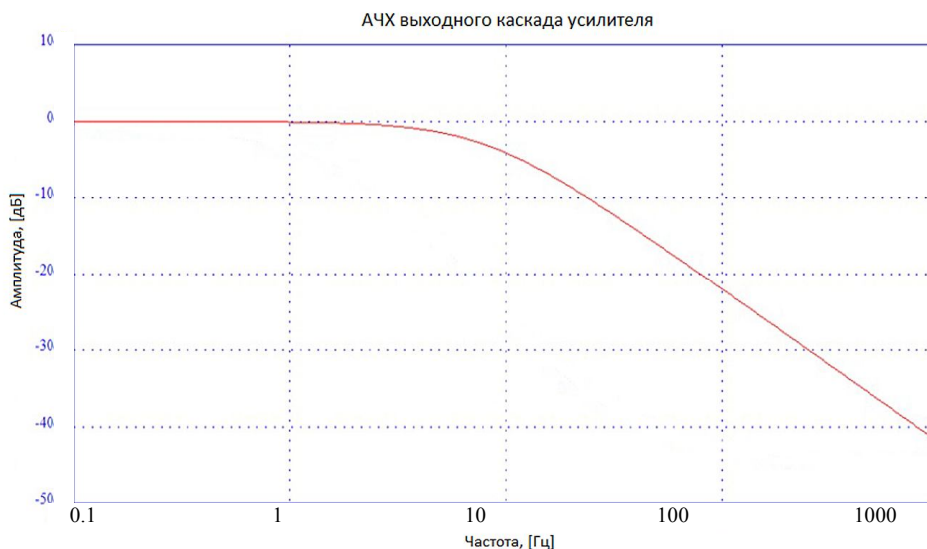


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика выходного каскада фильтра-усилителя при установке единичного коэффициента усиления

температурном диапазоне. Терморезистор входит в состав модуля формирования выходных сигналов, где текущее значение сопротивления терморезистора преобразуется в напряжение выходного дифференциального сигнала. Используя однополярный источник питания, оказалось возможным не только в два раза увеличить выходной динамический диапазон прибора, но и активно бороться с любыми помехами, которые могут быть наведены в проводах и линиях связи между отдельными платами, поскольку внешние электромагнитные помехи в этом случае будут наводиться на оба выхода одновременно и одинаково.

Так как при разработке прибора была поставлена задача получить разрешение термометра не хуже $0.005\text{ }^{\circ}\text{C}$, то особое внимание было уделено мерам по дополнительному снижению уровня

возможных электромагнитных шумов и локализации их источников. Разумеется, при такой высокой чувствительности динамический диапазон термометра будет весьма ограничен. Поэтому для решения широкого класса задач по наблюдению термодинамического режима разнообразных объектов было разработано семейство дифференциальных термометров, обладающих как разной чувствительностью $\text{В}/^{\circ}\text{C}$, так и рабочим температурным диапазоном: характеристики некоторых из них представлены на рис. 3. Из представленных характеристик видно, что варианты В и С обладают существенно уменьшенным рабочим диапазоном как по температуре, так и по значениям выходных дифференциальных напряжений. Это связано с тем, что данная модификация термометра, обладающая пониженным уровнем собственных

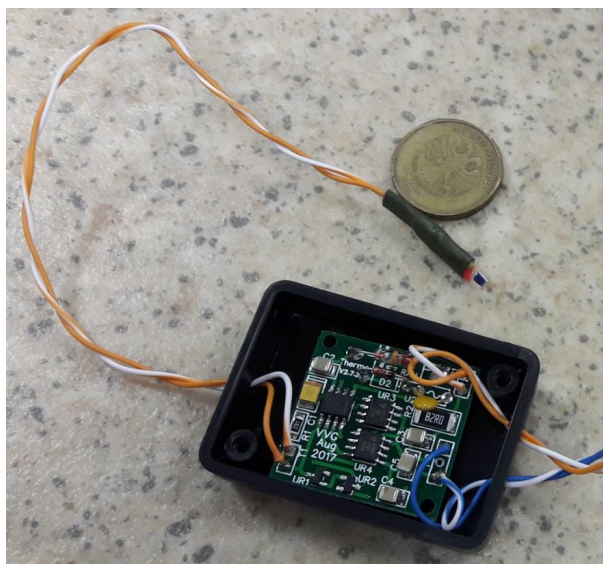


Рис. 5. Терморезистор с модулем формирования выходного сигнала и защиты

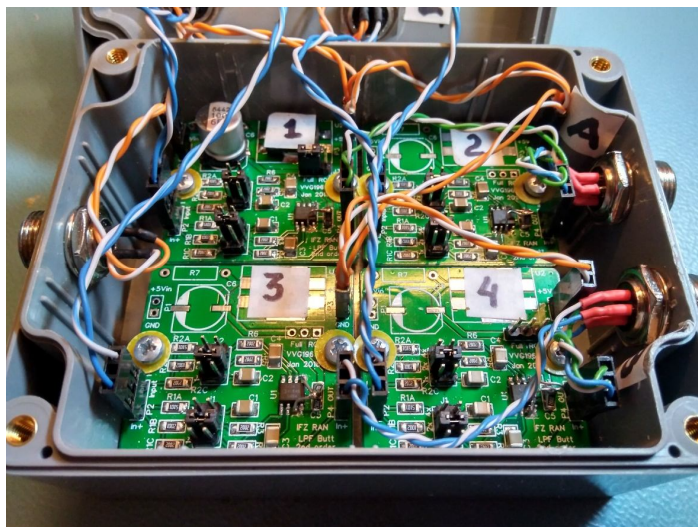


Рис. 6. Общий вид сборки 4-канального модуля фильтрации и усиления

и наведенных шумов, должна использоваться совместно с последующим низкочастотным фильтром-усилителем, осуществляющим как фильтрацию измеренных температурных сигналов, так и их усиление до величины полного рабочего динамического диапазона. Амплитудно-частотная характеристика фильтра-усилителя при установке единичного коэффициента усиления, показана на рис. 4.

Частота среза низкочастотного фильтра настроена на 8 Гц по уровню -3 дБ. Это позволяет избавиться от большинства средне- и высокочастотных наведенных шумовых гармоник. Кроме этого, в схеме прибора присутствует также дополнительная схема низкочастотной фильтрации по шине питания, настроенная также на частоту 8 Гц, что позволяет убрать как гармоники, кратные частоте сетей питания 50 Гц, так и всевозможные помехи, которые могут возникать при использовании для питания термометра импульсных блоков питания, модулей AC-DC и DC-DC, шин питания систем сбора информации и т.п.

Функционально элементы дифференциального термометра расположены в двух герметичных корпусах. В первом миниатюрном корпусе размером $50 \times 35 \times 15$ мм (рис. 5) расположены схемы модуля формирования выходного сигнала и модуля защиты. Данный корпус должен быть установлен максимально близко к термодатчику-терморезистору. С этим связаны его малые габариты, позволяющие производить его установку в скважинах малого диаметра и т.п.

Далее полученный дифференциальный сигнал передается по витой паре во второй корпус (рис. 6), где смонтированы схемы модуля фильтрации напряжения питания (один для всех термометров) и схемы модуля НЧ-фильтрации и усиления (по одной на каждый термометр). На рисунке представлен вариант для 4-канального дифференциального термометра. При помощи быстросъемных перемычек, установленных на электронной плате модуля, можно оперативно и независимо для каждого термометра менять коэффициент усиления. На рис. 7 показан общий вид сборки макета 4-канального термометра, предназначенного для опытной установки в штольне Баксанской нейтринной обсерватории.

Выходные дифференциальные сигналы представленного термометра лежат в диапазоне от 0 до $+5$ В, что позволяет его легко подключать к большинству современных электронных систем сбора информации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданные прецизионные температурные датчики найдут применение в широком круге геофизических задач, таких как учет температурных вариаций в различных сейсмодатчиках, наклонометрах и других измерительных приборах. А также, что немаловажно, в составе системы постоянного температурного мониторинга в штольне Баксанской нейтринной обсерватории, что позволит

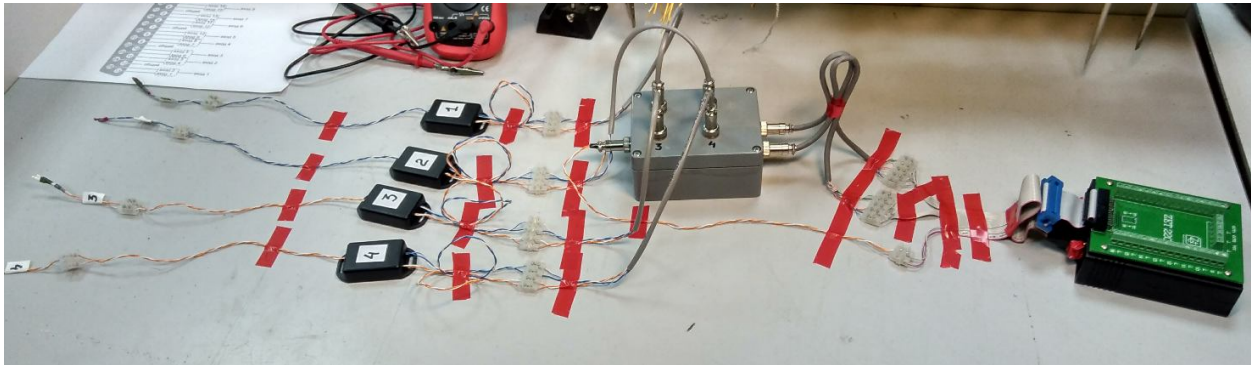


Рис. 7. Общий вид макета сборки 4-канального дифференциального термометра

получать высокоточные данные о динамике температурного поля в окрестности вулкана Эльбрус и внесет важный вклад в продолжающееся комплексное изучение Эльбрусского вулканического центра [8, 9], что особенно актуально в свете активно развивающейся туристической инфраструктуры как в Баксанском ущелье, так и в Приэльбрусье в целом.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для поддержки научных школ № НШ 5545.2018.5, а также в рамках гос. задания ИФЗ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Собисевич А.Л., Гриднев Д.Г., Собисевич Л.Е., Канониди К.Х. Аппаратурный комплекс Северокавказской геофизической обсерватории // Сейсмические приборы. 2008. Т. 44, № 1. С. 21–42.
2. Кислов К.В., Гравиров В.В. Исследование влияния окружающей среды на шум широкополосной сейсмической аппаратуры. Серия "Вычислительная сейсмология", вып. 42. М.: Красанд, 2013, 240 с.
3. Кислов К.В., Гравиров В.В. Шумы упругих элементов сейсмической аппаратуры // Естественные и технические науки. 2008. Т. 37, № 5. С. 142–148.
4. Гравиров В.В., Кислов К.В. Критичность сейсмометра к вариациям параметров // Электр. научн. ж. "Исследовано в России". 2008. № 26. С. 301–312.
5. Гравиров В.В., Кислов К.В. Один из путей генерации температурной помехи широкополосного сейсмометра // Электр. научн. ж. "Исследовано в России". 2008. № 27. С. 313–321.
6. Голубев В.Г., Лиходеев Д.В. Система геотермического и климатического мониторинга Баксанской геофизической обсерватории // Сейсмические приборы. 2006. Т. 42. С. 29–36.
7. Лиходеев Д.В. Исследование тепловых и наведенных волновых процессов в районе Эльбрусского вулканического центра. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2013. 151 с.
8. Маловичко А.А., Габсатарова И.П., Лиходеев Д.В., Заключовская А.С., Преснов Д.А. Развитие системы разномасштабного сейсмического мониторинга в районе вулкана Эльбрус // Сейсмические приборы. 2014. Т. 50, № 4. С. 47–57.
9. Масуренков Ю.П., Собисевич А.Л., Лиходеев Д.В., Шевченко А.В. Тепловые аномалии Северного Кавказа // Доклады Академии наук. 2009. Т. 428, № 5. С. 667–670.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва (Лиходеев Д.В., Гравиров В.В.)

Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Москва (Гравиров В.В., Кислов К.В.)

Федеральный исследовательский центр "Единая геофизическая служба Российской академии наук", Обнинск (Долов С.М.)

Контакты: Лиходеев Дмитрий Владимирович, dmitry@ifz.ru

Материал поступил в редакцию 28.06.2018

PRECISION NARROW BAND DIFFERENTIAL TEMPERATURE SENSOR

D. V. Likhodeev¹, V. V. Gravirov^{1,2}, K. V. Kislov², S. M. Dolov³

¹*Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow; Russia*

²*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics of the Russian Academy of Science, Moscow; Russia*

³*Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (GS RAS), Obninsk, Russia*

Recently, we have created precision narrow-band temperature sensors that allow us to measure temperature with a relative error of at least 0.005 °C. These temperature sensors are designed to study the fine structure of temperature fields in the rock solid, as well as to take into account internal temperature variations in various geophysical devices. The article considers the principal ways to achieve the required accuracy of measurements, calibration, and installation of the necessary operating temperature range of the sensors. Carrying out measurements using the developed sensors in the tunnel of the North Caucasus Geophysical Observatory of the IPE RAS in the Baksan Gorge will provide unique data on the structure and dynamics of the thermal field near the Elbrus volcano.

Keywords: temperature sensors, the Earth's thermal field, monitoring

REFERENCES

1. Sobisevitch A.L., Gridnev D.G., Sobisevitch L.E., Kano-nidi K.Kh. [Instrumental System of the North Caucasus Geophysical Observatory]. *Seismicheskie pribory* [Seismic instruments], 2008, vol. 44, no. 1, pp. 21–42. DOI: 10.3103/S0747923908010027 (In Russ.).
2. Kislov K.V., Gravirov V.V. *Issledovanie vliyaniya okruzhayushchej sredy na shum shirokopolosnoj sejsmicheskoy apparatury. Seriya "Vychislitel'naya sejsmologiya"* [Research of influence of a surrounding medium on noise of the broadband seismic equipment. Computing Seismology series]. Moscow, Krasand Publ., 2013, vol. 42. 240 p. (In Russ.).
3. Kislov K.V., Gravirov V.V. [Noise of elastic elements of the seismic equipment]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Natural and technical science], 2008, vol. 37, no. 5, pp. 142–148. (In Russ.).
4. Gravirov V.V., Kislov K.V. [Criticality of a seismometer to variations of parameters]. *Elektronnyj nauchnyj zhurnal "Issledovano v Rossii"* [Online scientific magazine "It is investigated in Russia"], 2008, no. 26, pp. 301–312. (In Russ.).
5. Gravirov V.V., Kislov K.V. [One of paths of oscillation of a temperature hindrance of a broadband seismometer]. *Elektronnyj nauchnyj zhurnal "Issledovano v Rossii"* [Online scientific magazine "It is investigated in Russia"], 2008, no. 27, pp. 313–321. (In Russ.).
6. Golubev V.G., Lihodeev D.V. [System of geothermic and climatic monitoring of the Baksan geophysical observatory]. *Seismicheskie pribory* [Seismic instruments], 2006, vol. 42, pp. 29–36. (In Russ.).
7. Lihodeev D.V. *Issledovanie teplovyh i navedennyh volnovykh processov v rajone El'brusskogo vulkanicheskogo centra*. Diss. kand. fiz.-mat. nauk [Research of the thermal and induced wave processes around the Elbrus volcanic center. Cand. phys. math. sci. diss.]. Moscow, 2013. 151 p. (In Russ.).
8. Malovichko A.A., Gabsatarova I.P., Likhodeev D.V., Zaklyukovskaya A.S., Presnov D.A. [Development of the multiscale seismic monitoring system in the Elbrus volcano region]. *Seismicheskie pribory* [Seismic instruments], 2014, vol. 50, no. 4, pp. 47–57. (In Russ.).
9. Masurenkov Yu.P., Sobisevich A.L., Lihodeev D.V., Shevchenko A.V. [Thermal anomalies of the North Caucasus]. *Doklady Akademii nauk* [Reports of Academy of Sciences], 2009, vol. 428, no. 5, pp. 667–670. (In Russ.).

Contacts: *Likhodeev Dmitriy Vladimirovitch*,
dmitry@ifz.ru

Article received in edition 28.06.2018