УДК 528.082, 531.714.2
ББК 22.3с

Георгий Степанович Бордонский,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий лабораторией геофизики криогенеза,
Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН,
672000, Россия, г. Чита, ул. Бутина, 26,
e-mail: lgc255@mail.ru
Любовь Дмитриевна Рябова,
ведущий инженер,
Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН,
672000, Россия, г. Чита, ул. Бутина, 26,
e-mail: lgc255@mail.ru

Радиочастотный дифференциальный измеритель деформации

Представлен вариант схемы измерителя деформации, использующий радиочастотный способ измерений. Применение кварцевого генератора и дифференциальной схемы измерения при перемещении ферритового сердечника в катушке индуктивности позволили получить высокую стабильность измерителя. Благодаря простоте, большому значению измеряемой деформации (до ±15 мм) и высокой чувствительности (∼ 1 мкм) измеритель удобен для различных измерений.

Ключевые слова: измеритель деформации, радиочастоты, дифференциальный метод.

Georgy Stepanovich Bordonskiy,
Doctor of Physics and Mathematics,
Chief of the Laboratory of Cryogenesis Geophysics,
Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS,
26, Butina st, Chita, Russia, 672000,
e-mail: lgc255@mail.ru
Lubov Dmitrievna Ryabova,
Lead Engineer,
Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS,
26, Butina st, Chita, Russia, 672000,
e-mail: lgc255@mail.ru

The RF Differential Strain Gauge

The version of the scheme strain gauge using the RF measurement method is presented. Use of the crystal oscillator circuit and differential measurement when moving ferrite core in inductor do possible to obtain a high stability of the meter. Due to its simplicity, the large value of the measured strain (up to ±15 mm) and high sensitivity (∼ 1 micron) the meter is suitable for measuring different measurement.

Keywords: strain gauge, radio frequencies, differential method.

Для измерения деформации применяются разнообразные датчики, вид которых определяется характером задачи [1; 2]. В частности, используются радиочастотные датчики, в которых деформации связывают с изменением частоты, фазы и амплитуды резонансных

 © **Бордонский Г. С., Рябова Л. Д., 2015**

систем [3]. Преимущество таких датчиков, например по сравнению с датчиками механического типа, заключается в том, что для них, как правило, не требуются значительные усилия на закреплённые опоры, они могут использоваться в бесконтактных системах, обладают высокой чувствительностью и большим интервалом измеряемой величины. Однако радиочастотные датчики более сложны по конструкции, требуют температурной стабилизации элементов схемы.

От таких недостатков в значительной степени свободны дифференциальные датчики. В настоящей работе представлен вариант радиочастотного датчика деформации, в котором для достижения стабильности использована специальная дифференциальная схема регистрации деформации при перемещении ферритового сердечника в катушке индуктивности. Особенности функционирования устройства поясняются на рис. 1.

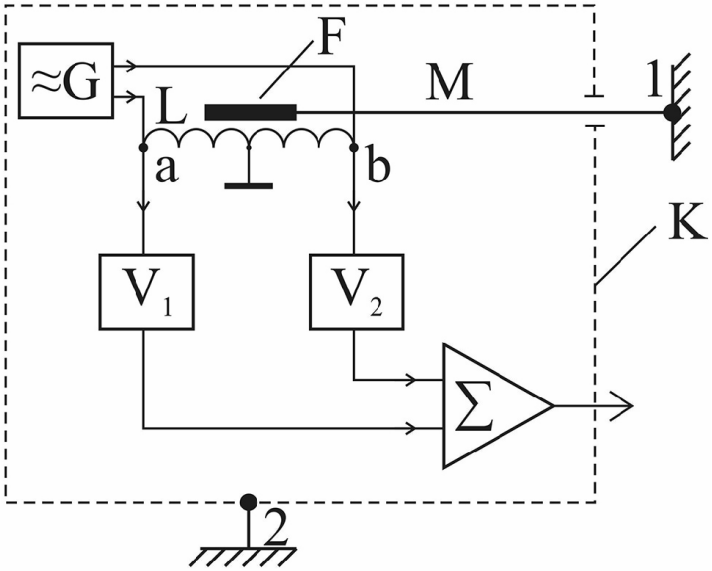

Рис. 1. Принципиальная схема дифференциального радиочастотного измерителя деформации. G – кварцевый генератор, L – катушка индуктивности, F – ферритовый сердечник, M – тонкий стальной стержень, $V_{1,2}$ – противофазные выпрямители, $\sum$ – суммирующий усилитель, 1, 2 – точки креплёния корпуса измерителя и точка опоры, между которыми выполняется измерение деформации

Сигнал от высокочастотного генератора G, стабилизированного кварцевым резонатором, с симметричного выхода подаётся на катушку индуктивности L, средняя точка которой заземлена. В катушке вблизи её средней части расположен ферритовый сердечник F, который может в ней свободно перемещаться. Сердечник соединён с опорой 1 тонким стальным стержнем M. Катушка индуктивности вместе с платой и корпусом прибора крепится в точке 2 изучаемого объекта.

Деформация измеряется между точками 1 и 2 при перемещении сердечника в катушке, что приводит к изменениям индуктивности частей катушки при сохранении её суммы. В результате сдвига сердечника и изменения импеданса частей катушки в точках (a) и (b) на её концах, по отношению к заземлённой центральной точке, происходит изменение амплитуды переменного синусоидального напряжения. Высокочастотное напряжение далее детектируется выпрямительными узлами V_1 и V_2, которые формируют постоянное напряжение различного знака. Выпрямленные напряжения поступают на суммирующий усилитель $\sum$. Усиленное напряжение, пропорциональное деформации изучаемого объекта между точками 1 и 2, поступает на выход измерителя.

Реализация описываемого измерителя выполнена на стандартных схемах [4]. Формирователь синусоидального напряжения состоит из кварцевого генератора на частоту 9 МГц, развязывающего каскада на транзисторе с симметричным выходом и катушки, на которой происходит преобразование перемещения сердечника в приращение амплитуд переменного напряжения, которые далее сравниваются с использованием низкочастотной схемы. Выходные напряжения с точек a и b поступают на развязывающие каскады на полевых транзисторах. Выпрямители $V_{1,2}$ выполнены на детекторных диодах. Далее, выпрямленные напряжения различной полярности поступают на суммирующий усилитель на микросхеме операционного усилителя.

В устройстве могут быть применены любые высокочастотные транзисторы, детекторные диоды и операционный усилитель. Параметр L – некритичен. Частота кварцевого генератора может выбираться в пределах 5–15 МГц. В конструкции была использована катушка, намотанная на пластмассовом каркасе с канавками с шагом 0,6 мм проводом в эмалевой изоляции диаметром 0,2 мм. Диаметр каркаса 15,5 мм, длина намотки 31 мм, число витков 52. В катушку вставляли ферритовый стержень длиной 15 мм и диаметром 6 мм, начальная магнитная проницаемость феррита 1000. На стержень надевали гибкую трубку с таким расчётом, чтобы он мог свободно перемещаться внутри катушки. Трубка соединялась со стальным стержнем диаметром 1,5 мм. Длина стержня выбирается исходя из размеров изучаемого объекта, он может быть изготовлен и из диэлектрического материала с низким коэффициентом теплового расширения. Корпус измерителя изготовлен из оцинкованного железа для экранирования от внешних полей и защиты схемы от внешних воздействий.

Для выбранных параметров установки пределы линейной связи выходного напряжения и смещения сердечника составляли ±4 мм. Работоспособность датчика сохранялась в интервале смещений ±15 мм. Чувствительность датчика составляла 660 мВ/мм, уровень собственных флуктуаций (стандартное отклонение) при постоянной времени внешней измерительной системы 0,2 с составил 0,5 мВ, что позволяло измерять быстрые изменения деформации до 0,8 мкм (без учёта изменения длины стержня М при колебаниях температуры окружающей среды). Температурный дрейф выходного напряжения без подбора диодов $Д_{1,2}$ по идентичности вольтамперной характеристики при комнатной температуре составил 5 мВ/град, т. е. при изменении температуры измерителя на 10 $^\circ C$ дополнительная ошибка измерения составит 8 мкм, поэтому для достижения точности 1 мкм требуется стабилизация температуры на уровне $\pm 0,10$ $^\circ C$ или учёт её вариаций. Требуемая стабильность напряжений питания 0,1 %.

Установка измерителя заключается в подборе положения ферритового стержня, при котором выходное напряжение близко к нулю. Для контроля баланса при закреплёнии стержня в точке 1 используют вольтметр, подключая его к выходу измерителя.

Устройство было использовано для измерений в полевых условиях деформаций ледяного покрова пресного озера в течение нескольких недель в конце зимнего периода. При расстоянии между опорными точками 0,5 м уверенно регистрировались суточные и скачкообразные деформации ледяного покрова, достигающие на этой длине $\sim$ 0,3 мм. В неблагоприятных погодных условиях (снегопады, оттепели) датчик показал более надёжную работу, чем механический датчик с натянутой струной из-за её натяжения и дрейфа точек креплёния при подтаивании льда. На рис. 2. приведён пример записи деформаций.

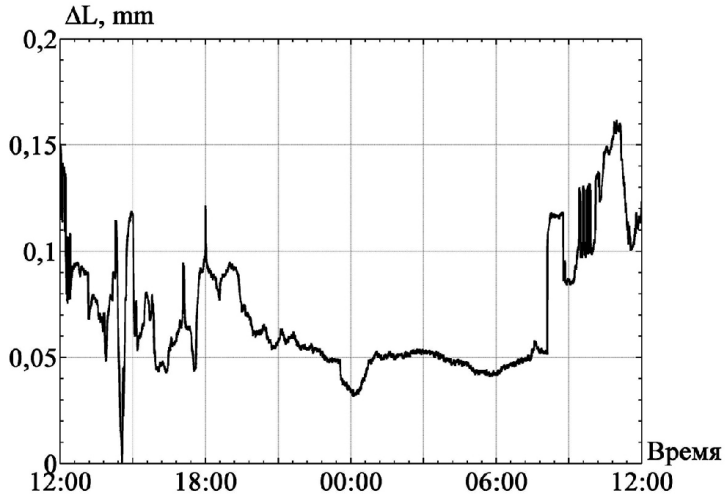

Рис. 2. Запись деформации ледяного покрова оз. Арахлей. 03-04 апреля 2012 г.

Преимущество разработанного датчика заключается также в отсутствии повреждений при возникновении деформаций, существенно превышающих пределы его измерений.

Список литературы

1. Харт Х. Введение в измерительную технику. М.: Мир, 1999. 391 с.

2. Дивин А. Г., Пономарёв С. В., Мозгова Г. В. Методы и средства испытаний и контроля. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2012. Ч. 2. 108 с.

3. Арш Э. И. Автогенераторные методы и средства измерений. М.: Машиностроение, 1979. 256 с.

4. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. М.: Мир, 1984. Т. 1. 598 с.

References

1. Khart Kh. Vvedenie v izmeritel'nuyu tekhniku. M.: Mir, 1999. 391 s.

2. Divin A. G., Ponomarev S. V., Mozgova G. V. Metody i sredstva ispytanii i kontrolya. Tambov: Izd-vo TGTU, 2012. Ch. 2. 108 s.

3. Arsh E. I. Avtogeneratornye metody i sredstva izmerenii. M.: Mashinostroenie, 1979. 256 s.

4. Khorovits P., Khill U. Iskusstvo skhemotekhniki. M.: Mir, 1984. T. 1. 598 s.

Статья поступила в редакцию 19.04.2015