

РАЗРАБОТКА ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКОГО ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ АНАЛИЗЕ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

КАЛЕНТЬЕВ Е. А.

Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения РАН,
426067, г. Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34

АННОТАЦИЯ. В статье рассматривается вопрос разработки, изготовления и использования тензометрического оборудования – тензометрической станции, на основе измерительного моста Уитстона, аналого-цифрового преобразователя и специализированного ПО PowerGraph. Предлагаемое оборудование использовано для измерения деформации изделий и конструкций, испытывающих динамические ударные нагрузки. Особенностью разработанной тензометрической станции является использование инструментального усилителя с высокоточным опорным напряжением INA 125 фирмы Texas Instruments Incorporated.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: тензодатчик, тензорезистор, мост Уитстона, удар.

ВВЕДЕНИЕ

В экспериментальной практике повсеместно возникает необходимость в измерении деформации разнообразных конструкций и изделий. Это необходимо и с прямой целью так и в случае экспериментальной проверки результатов теоретических методов. Среди широкого спектра экспериментальных методов измерения деформаций большинство исследователей отдает предпочтение измерениям с тензорезисторов (тензорезисторов – измерительный преобразователь линейной деформации в изменение активного сопротивления, принцип действия которого основан на тензорезистивном эффекте), поскольку они наилучшим образом удовлетворяют критерию стоимость-эффективность, обладая оптимальным сочетанием характеристик. В основе работы тензорезисторов лежит тензорезистивный эффект – свойство проводников и полупроводников изменять электрическое сопротивление при объемном или линейном деформировании. Тензорезисторы широко применяются в качестве чувствительных элементов тензодатчиков, разработанных для измерения сил, деформаций, перемещений, моментов, давления и другое [1].

В качестве примеров использования разнообразных тензодатчиков в экспериментальной практике можно привести следующие работы. Автоматическое измерение деформации стальной балки с помощью тензодатчика, в данной работе применяется классическое решение на базе измерительного моста Уитстона, а особенностью работы являются различные параметры процесса, их влияние изучаются с помощью оптимизации и дисперсионного анализа [2]. Измерения с помощью тензодатчиков на лопатке полномасштабной приливной турбины рассмотрено в работе [3].

В работе [4] выполнено сравнение методов испытания на удар при падении с использованием тензометрических измерений, высокоскоростная система сбора данных используется для регистрации реакции на деформацию в критических местах в реальном времени. Моделирование методом конечных элементов используется для определения места размещения тензодатчиков. Два метода испытания на удар при падении с уровня платы, А и В, сравниваются с помощью измерений тензодатчиков. Результаты показывают значительные различия в амплитуде деформации, скорости деформации, частоте, отскоке и демпфировании. Метод В обеспечивает более высокую амплитуду деформации, более сильный отскок и меньшее демпфирование, тогда как метод А обеспечивает более высокую частоту и скорость деформации.

Непрерывное измерение деформации шин с помощью длинномерных тензодатчиков выполнено в [5]. Измерение деформации шин – это важный момент в создании и исследованиях «интеллектуальной» шины, которое не только дает глубокое понимание механизма создания сил и моментов в шинах, но также оказывает значительное влияние на оценку состояния мостов. В этой статье был предложен метод измерения деформации шины путем мониторинга деформации обруча шины с помощью датчиков с большой волоконной брэгговской решеткой, которые могут обеспечить непрерывное измерение деформации шины в реальном времени с помощью модифицированного метода сопряженных пучков. Используя преимущества высокой чувствительности, долговечности и макро-микродатчика, модифицированный метод сопряженного луча превращает проблему измерения деформации шины в более удобное решение изгибающего момента сопряженной конструкции. Для проверки предложенного метода были проведены эксперименты с транспортным средством, в том числе с ударами и высокоскоростным экспериментом, согласно которым расчетные деформации шин при различных нагрузках на колеса и давлениях в шинах хорошо согласуются с эталонными измерениями.

Использование тензодатчика на малом гребном винте с помощью специального оборудования собственной разработки описано в работе [6]. Статья посвящена разработке специального прибора для измерения нагрузки на внутреннюю часть винта с очень маленьким изменяемым шагом. Поэтому требовались малый вес, оптимизированная конструкция и надежность. Измерение тензодатчика было успешно выполнено до частоты вращения 4300 об/мин. Как видно, тензометрические измерения прочно вошли в арсенал исследователей самых различных областей.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ УСТРОЙСТВА

В основу разработанного оборудования положен принцип измерения электрического сопротивления чувствительного элемента тензорезистора при его деформации. Для измерения сопротивления используется измерительный мост (мост Уитстона). Принцип работы измерительного моста основан на балансировке измерительных плеч, один из которых содержит неизвестное сопротивление. Основное достоинство данного метода — это возможность получения чрезвычайно высокой точности измерений, в сравнении с каким-либо делителем напряжения [7, 8].

Принципиальная схема измерительного моста Уитстона показана на рис. [9].

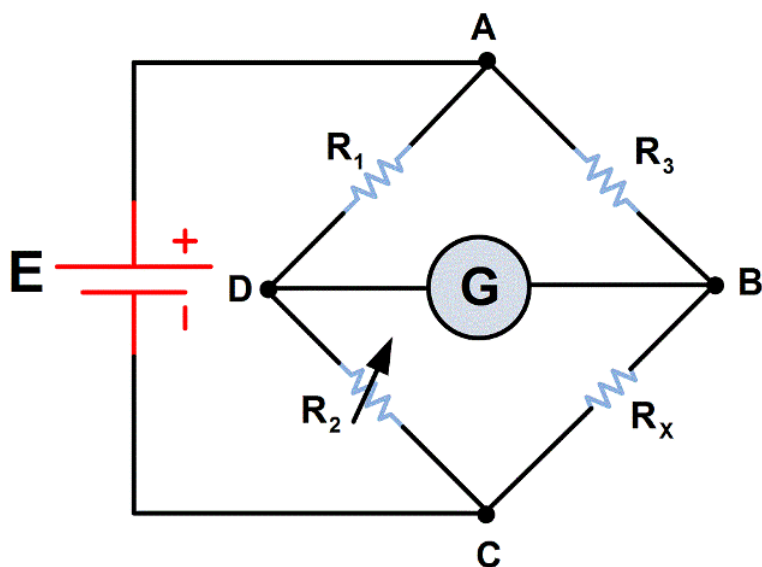


Рис. 1. Принципиальная схема измерительного моста Уитстона

Схема моста Уитстона содержит две ветви, потенциалы средних выводов (D и B) которых уравниваются в процессе проведения измерений. Одна из ветвей моста включает в себя сопротивление R_x , значение сопротивления которого необходимо определить. Противоположная ветвь содержит реостат R_2 — сопротивление регулируемой величины. Между средними выводами ветвей включен индикатор G, в качестве которого может выступать гальванометр, вольтметр, нуль-индикатор или амперметр. Если в момент равновесия три из сопротивлений известны, то четвертое можно подсчитать (измерить). Высокая точность изготовления сопротивлений и большая чувствительность нулевых индикаторов обеспечивают точное измерение неизвестного сопротивления. Для равновесия моста необходимо, чтобы произведения сопротивлений противоположных плеч были равны между собой. Уравновешивание моста достигается изменением одного или нескольких сопротивлений плеч. С этой целью они выполняются чаще всего в виде реостата или магазинов (набора) сопротивлений [9].

Основной сложностью при измерении деформации с использованием измерительного моста являются крайне малые диапазоны изменения сопротивления чувствительных элементов тензорезисторов при деформации. Например, как указано в [1], изменения сопротивления тензодатчика чрезвычайно малы и составляют для 100 Ом датчика около 0.0002 Ом на деформацию 1 мкм/м. Таким образом, деформация 1000 мкм/м (соответствующая приращению напряжения в стали примерно 200 МПа) изменяет сопротивление 100 Ом датчика на 0.2 Ом.

Столь малое изменение сопротивления тензорезистора вызывает незначительную разбалансировку измерительного моста и как следствие низкую разность потенциалов между точками (D и B). Для его усиления используется прецизионный инструментальный усилитель с высокоточным опорным напряжением INA 125 фирмы Texas Instruments Incorporated [10]. Принципиальная схема инструментального усилителя приведена на рис. 2, включение измерительного моста Уитстона выполнено к выводам 6 и 7. Подбором сопротивления R_G , подключенного к выводам 8, 9 регулируют желаемый коэффициент усиления.

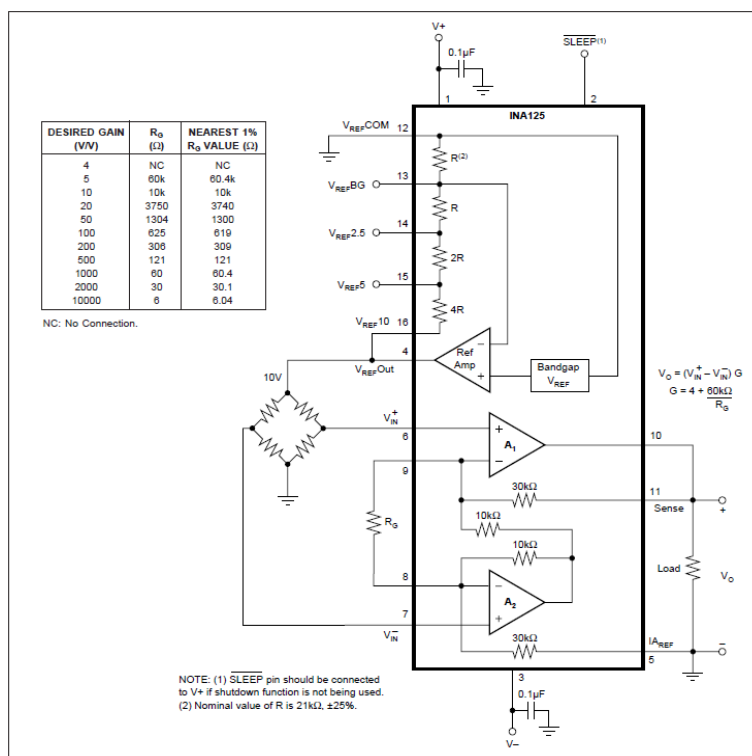


Рис. 2. Принципиальная схема включения инструментального усилителя и измерительного моста Уитстона

К ключевым особенностям данного инструментального усилителя относятся: малый потребляемый ток, точное опорное напряжение, низкое напряжение смещения, низкий шум и температурный дрейф.

Далее усиленный сигнал поступает на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП) E14-440M, который является малогабаритным многофункциональным измерительным модулем, подключаемым к PC через USB-интерфейс. Базовые функции: многоканальный АЦП с мультиплексированием каналов, цифровой асинхронный ввод-вывод. Модуль E14-140(-M) предназначен для построения многоканальных измерительных систем сбора аналоговых данных, а также цифрового управления и контроля состояния внешних устройств [11]. Частота регистрации сигнала полученного на выходе инструментального усилителя составляет 400 кГц, что позволяет проводить исследование быстропротекающих процессов, таких как удары, столкновения, взрывное воздействие и т.д.

РАЗРАБОТКА ТОПОЛОГИИ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ

На следующем этапе, по разработанной принципиальной схеме, выполнялась разводка печатной платы в специализированном программном обеспечении и ее последующее изготовление. С учетом того, что на практике необходимо одновременно измерять и регистрировать несколько точек деформирования, топология печатной платы разрабатывалась под 8-канальный вариант принципиальной схемы. Итоговый вариант печатной платы показан на рис. 3.

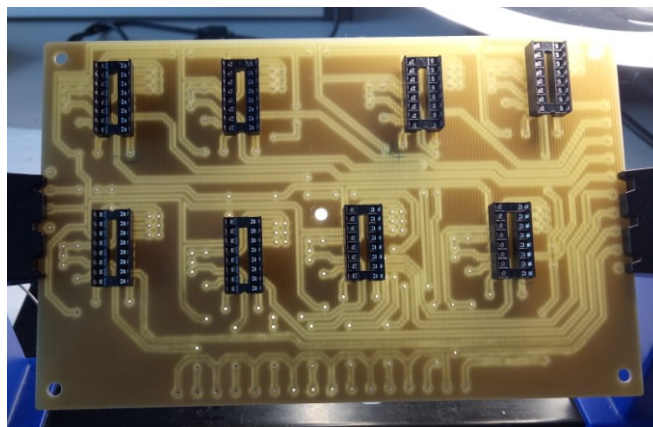


Рис. 3. Изготовленная печатная плата

На завершающем этапе производился монтаж радиоэлектронных компонентов и окончательная сборка устройства (рис. 4).

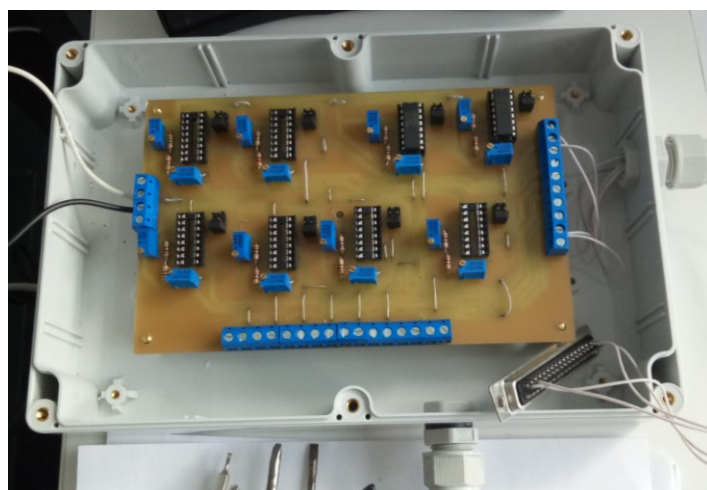


Рис. 4. Собранное устройство для тензометрического измерения деформации

ТАРИРОВКА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ

Разработанное устройство позволяет работать с различными типами тензорезисторов и тензодатчиков. Опытная эксплуатация и тарировка устройства производилась совместно с константановыми пленочными тензорезисторами ФКПА-10-200, база измерительной решетки 10 мм, электрическое сопротивление 200 Ом. К основным достоинствам константановых тензорезисторов относится: постоянство коэффициента тензочувствительности в весьма широком диапазоне деформаций (до 8 %); в отожженном состоянии константан может быть использован при измерении деформаций до 20 %; однако в этом случае у константана обнаруживается изменение начального сопротивления, свидетельствующее о систематическом изменении сопротивления при каждом цикле нагружения; отсутствие существенных изменений при переходе от упругого деформирования к пластическому; константан обладает, кроме того, высоким удельным сопротивлением ($\rho = 0.49 \text{ мкОм/м}$); обладает высокой температурной стабильностью; возможностью создания температурно-компенсированных тензодатчиков путем согласования коэффициента температурного расширения датчика с аналогичным параметром технического материала (в диапазоне от 0 до $100 \cdot 10^{-6} \cdot 1/^\circ\text{C}$) [1].

Для наклейки тензорезисторов использовался клей на основе цианокрилата.



Рис. 5. Образцы для тарировки с наклеенными тензорезисторами (слева) и образец с установленным экстензометром

Основным этапом тарировки измерительного канала является контролируемая деформация образца с наклеенным тензорезистором и установленным на нем экстензометром (рис. 5). При этом одновременно фиксируется приложенная нагрузка, напряжение на выходе инструментального усилителя (измерительного моста) и текущее значение относительной деформации. Далее методом наименьших квадратов строится аппроксимирующая функция, связывающая изменение сопротивления тензорезистора и соответственно напряжение на выходе инструментального усилителя с относительной деформацией образца (рис. 6).

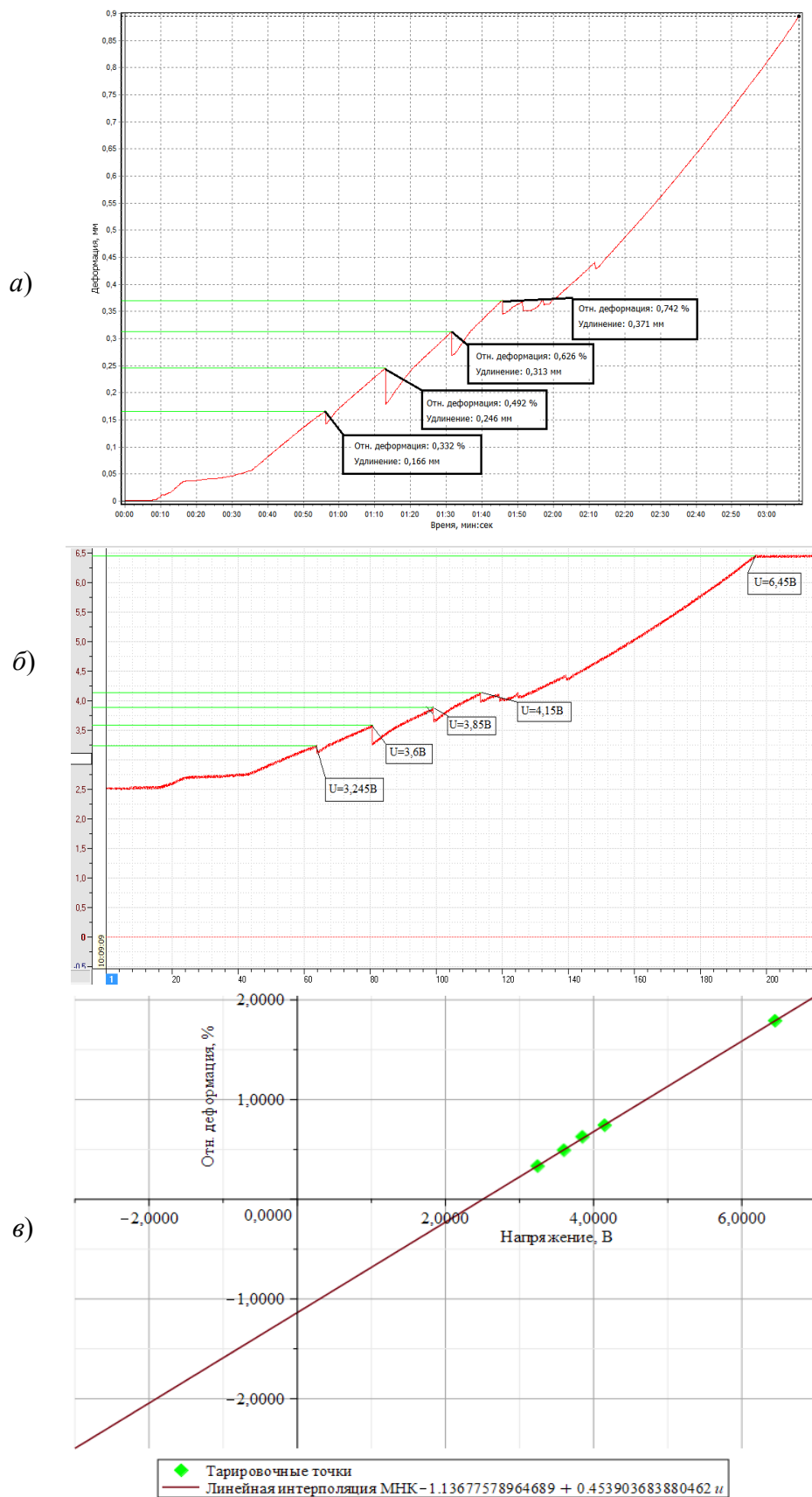


Рис. 6. Пример процесса тарировки измерительного канала: относительная деформация (а), напряжение на выходе инструментального усилителя (б), аппроксимирующая функция (в)

ВЫВОДЫ

Разработанное и изготовленное устройство для тензометрического измерения деформаций успешно использовалось для измерения относительных деформаций при высокоскоростных и ударных нагрузках, при максимальной скорости деформации около 25 с^{-1} . По результатам тарировки измерительного канала диапазон измеряемых относительных деформации составил до 2 %. Аппроксимация методом наименьших квадратов выявила высокую линейную зависимость сопротивления тензорезисторов от деформации. Вместе с тем, использованные тензорезисторы, в пределах одной партии, показали значительный разброс характеристик, так максимальный диапазон разброса составил 11.3 %.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 18-48-180006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мехеда В.А. Тензометрический метод измерения деформаций: учебное пособие. Самара: Изд-во СГАУ, 2011. 56 с.
2. Anand L. D. V., Palaniappan S., Sumathy B., Vijayakumar P., Rani S. S. Automatic strain sensing measurement on steel beam using strain gauge // *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 45(3), pp. 2578-2580.
3. Lake T., Hughes J., Togneri M., Williams A. J., Jeffcoate P., Starzman R., Kaufmann N., Masters I. Strain gauge measurements on a full scale tidal turbine blade // *Renewable Energy*, 2021, vol. 170, pp. 985-996.
4. Liu Y., Liu Y., Kessels F. J. H. G., Driel W. D., Driel J. A. S., Sun F. L., Zhang G. Q. Comparing drop impact test method using strain gauge measurements // *Microelectronics Reliability*, 2009, vol. 49, no. 9-11, pp. 1299-1303.
5. Zhao W., Zhang C., Zhang J. Continuous measurement of tire deformation using long-gauge strain sensors // *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, vol. 142, Article no. 106782.
6. Rosa J., Cagan J., Rosler J. Strain gauge measurement on small propeller using special in-house developed hardware // *Materials Today: Proceedings*, 2017, vol. 4, no. 5, pp. 5931-5934.
7. Teja R. Wheatstone Bridge. Working, Examples, Applications. Electronics Hub, 2021. URL: <https://www.electronicshub.org/wheatstone-bridge/> (дата обращения: 17.05.2021).
8. Wheatstone bridge. Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Wheatstone_bridge (дата обращения: 17.05.2021).
9. Повный А. Применение моста Уитстона для измерения неэлектрических величин. Электрик Инфо, 2020. URL: <http://elektrik.info/main/school/1594-primeneniye-mosta-uitstona-izmereniye-neelektricheskikh-velichin.html> (дата обращения: 19.03.2021).
10. Instrumentation Amplifier with Precision Voltage Reference. Burr-Brown INA 125, 1998. 18 p. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina125.pdf> (дата обращения: 17.05.2021).
11. Гарманов А. В. Преобразователи напряжения измерительные Е14-140 Е14-140-М Е14-140-М-Д Е14-140-М-І Е14-140-М-Д-І. Руководство пользователя, 2020. URL: https://www.lcard.ru/download/e14_140_users_guide.pdf (дата обращения: 14.01.2021).

Development of Equipment for Strain Gauge Measurement of Deformation in the Analysis of Fast Dynamic Processes

Kalentev E. A.

Udmurt Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia

SUMMARY. The article discusses the development, manufacture and use of strain gauge equipment - strain gauge station, based on the Wheatstone measuring bridge, analog-to-digital converter and specialized software PowerGraph. The proposed equipment is used to measure the deformation of products and

structures undergoing dynamic shock loads. A feature of the developed strain gauge station is the use of an instrumental amplifier with a high-precision reference voltage INA 125 from Texas Instruments Incorporated.

KEYWORDS: strain gauge, strain gage, Wheatstone bridge, impact.

REFERENCES

1. Mekheda V. A. Tenzometricheskiiy metod izmereniya deformatsiy [Strain gauge method for measuring deformations]. Uchebnoe posobie. Samara: SGAU Publ., 2011. 56 p.
2. Anand L. D. V., Palaniappan S., Sumathy B., Vijayakumar P., Rani S. S. Automatic strain sensing measurement on steel beam using strain gauge. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 45(3), pp. 2578-2580. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.274>
3. Lake T., Hughes J., Togneri M., Williams A. J., Jeffcoate P., Starzman R., Kaufmann N., Masters I. Strain gauge measurements on a full scale tidal turbine blade. *Renewable Energy*, 2021, vol. 170, pp. 985-996. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.137>
4. Liu Y., Liu Y., Kessels F. J. H. G., Driel W. D., Driel J. A. S., Sun F. L., Zhang G. Q. Comparing drop impact test method using strain gauge measurements. *Microelectronics Reliability*, 2009, vol. 49, no. 9-11, pp. 1299-1303. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2009.07.008>
5. Zhao W., Zhang C., Zhang J. Continuous measurement of tire deformation using long-gauge strain sensors. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, vol. 142, Article no. 106782. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.106782>
6. Rosa J., Cagan J., Rosler J. Strain gauge measurement on small propeller using special in-house developed hardware. *Materials Today: Proceedings*, 2017, vol. 4, no. 5, pp. 5931-5934. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2017.06.072>
7. Teja R. *Wheatstone Bridge. Working, Examples, Applications*. Electronics Hub, 2021. URL: <https://www.electronicshub.org/wheatstone-bridge/> (accessed May 17, 2021).
8. *Wheatstone bridge*. Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Wheatstone_bridge (accessed May 17, 2021).
9. Povnyj A. *Primenenie mosta Uitstona dlja izmereniya nejelektricheskikh velichin* [Application of the Wheatstone bridge for measuring non-electrical quantities]. *Electric Info*, 2020. URL: <http://elektrik.info/main/school/1594-primeneniye-mosta-uitstona-izmereniye-neelektricheskikh-velichin.html> (accessed March 19, 2021).
10. *Instrumentation Amplifier with Precision Voltage Reference*. Burr-Brown INA 125, 1998. 18 p. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina125.pdf> (accessed May 17, 2021).
11. Garmanov A. V. *Preobrazovateli naprjazhenija izmeritel'nye E14-140 E14-140-M E14-140-M-D E14-140-M-I E14-140-M-D-I*. Rukovodstvo pol'zovatelja [Measuring voltage converters E14-140 E14-140-M E14-140-M-D E14-140-M-I E14-140-M-D-I. User's manual], 2020. URL: https://www.lcard.ru/download/e14_140_users_guide.pdf (accessed January 14, 2021).

Калентьев Евгений Александрович, кандидат технических наук, УдмФИЦ УрО РАН,
e-mail: eugenekalentev@gmail.com