

**МОДЕЛЮВАННЯ АНАЛОГОВОГО ІНТЕРФЕЙСУ ДЛЯ ДИСТАНЦІЙНИХ
ВИМІРЮВАНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ РЕЗИСТИВНИХ ТЕНЗОДАТЧИКІВ**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ АНАЛОГОВОГО ИНТЕРФЕЙСА ДЛЯ ДИСТАНЦИОННЫХ
ИЗМЕРЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ РЕЗИСТИВНОГО ТЕНЗОДАТЧИКА**

**SIMULATION OF THE ANALOGUE INTERFACE FOR REMOTE
MEASUREMENTS BY A RESISTANT TENSOR**

Анотація. Аналоговий інтерфейс для дистанційних вимірювань за допомогою резистивних тензодатчиків містить послідовно з'єднаний вимірювальний ланцюг, у який включено тензодатчик та вхід якого зв'язаний з джерелом живлення, вимірювальний підсилювач, виконаний на операційних підсилювачах, включених за двокаскадною схемою, та аналого-цифровий перетворювач логометричного типу, причому вхідні та вихідні лінії зв'язку вимірювального ланцюга є дротовими.

Аннотация. Аналоговый интерфейс для дистанционных измерений с помощью резистивных тензодатчиков содержит последовательно-соединённую измерительную цепь, в которую включен тензодатчик и вход которого связан с источником питания, измерительный усилитель, выполненный на операционных усилителях, включенных по двухкаскадной схеме, и аналого-цифровой преобразователь логометричного типа, причем входные и выходные линии связи измерительной цепи является проволочными.

Abstract. Analogue interface for remote measurements using resistive strain gauges containing a serially connected measuring circuit, which includes a strain gauge and the input of which is connected to a power supply, a measuring amplifier made on operational amplifiers included in a two-stage circuit, and an analog-digital a logometric type converter, wherein the input and output lines of the measuring circuit are wired, which is characterized in that the power supply is performed as a DC source from the galvanic decoupling associated with the input of the measuring circuit through the analog multiplier, the control input of which is connected to the microcontroller, the input connected with the analog-digital converter, the measuring circuit is made in the form of three resistive current dividers, where one divider is formed resistive strain gauge and adjusting resistor, and two others - exemplary resistors, and in the measuring amplifier, the first stage cascade opamps are included in the inverting circuit.

Ключові слова. Вимірювальний підсилювач, аналого-цифровий перетворювач, заводо захищеність, точність вимірювань, тензодатчики, дистанційні вимірювання.

Ключевые слова. Измерительный усилитель, аналого-цифровой преобразователь, помехозащищенность, точность измерений, тензодатчики, дистанционные измерения.

Key words. Measuring amplifier, analog-to-digital converter, noise immunity, measurement accuracy, strain gauges, remote sensing.

Вступ. Одним з основних показників, що забезпечують необхідну точність при дистанційних вимірюваннях (провідна лінія зв'язку), є співвідношення сигнал/шум на вході АЦП, яке визначається ефективністю придушення перешкод загального і нормального вигляду [1]. Слід зазначити, що питанням оптимізації аналогових інтерфейсів у вітчизняній літературі приділяється недостатня увага [2], особливо в зв'язку з сучасною тенденцією інтелектуалізації аналогових інтерфейсів [3], що змушує враховувати не тільки інструментальні похибки, але і методичні похибки, перш за все випадкові похибки, такі як похибки накладення спектрів, похибки відновлення сигналу [4]. Тому, в завдання оптимізації аналогових інтерфейсів входить також визначення оптимальних значень частоти дискретизації, розрядності АЦП, параметрів antialiasing-фільтра для придушення накладення спектрів, яка не знайшло досить докладного кількісного аналізу в сучасній періодичній літературі.

Мета доповіді і постановка досліджень. Аналоговий інтерфейс для дистанційних вимірювань за допомогою резистивних тензодатчиків відноситься до області вимірювальної техніки.

В основу пропозиції поставлена задача підвищити заводо захищеність та точність вимірювань.

Аналоговий інтерфейс для дистанційних вимірювань за допомогою резистивних тензодатчиків містить послідовно з'єднаний вимірювальний ланцюг, у який включено тензодатчик та вхід якого зв'язаний з джерелом живлення, вимірювальний підсилювач, виконаний на операційних підсилювачах, включених за двокаскадною схемою, та аналого-цифровий перетворювач логотричного типу, причому вхідні та вихідні лінії зв'язку вимірювального ланцюга є дротовими.

Новим є те, що джерело живлення виконане у вигляді джерела постійного струму без гальванічної розв'язки, пов'язаного зі входом вимірювального ланцюга через аналоговий мультиплексор, керуючий вхід якого під'єднаний до мікроконтролера, входом пов'язаного з аналого-цифровим перетворювачем, вимірювальний ланцюг виконаний у вигляді трьох резистивних подільників струму, де один подільник утворений резистивним тензодатчиком та підстроювальним резистором, а дві інші – зразковими резисторами, і у вимірювальному підсилювачі операційні підсилювачі першого каскаду включені за інвертуючою схемою.

Основний текст статті. Для підвищення заводо захищеності та точності вимірювань аналого-цифровий інтерфейс для дистанційних вимірювань, на базі резистивного тензодатчика повинен містити послідовно з'єднані вимірювальний ланцюг, у який включено тензодатчик, та вхід якого з'єднаний джерелом живлення, вимірювальний підсилювач, виконаний на операційних підсилювачах, що включені за двокаскадною схемою, та аналого-цифровий перетворювач логотричного типу, причому вхідні та вихідні лінії зв'язку вимірювального ланцюга є дротовими, згідно з пропозицією джерело живлення виконане у вигляді джерела постійного струму без гальванічної розв'язки, пов'язаного зі входом вимірювального ланцюга через аналоговий мультиплексор, керуючий вхід якого під'єднаний до мікроконтролера, входом пов'язаного з аналого-цифровим перетворювачем, вимірювальний ланцюг виконаний у вигляді трьох резистивних подільників струму, де один подільник утворений резистивним тензодатчиком та підстроювальним резистором, а два інші – зразковими резисторами, і у вимірювальному підсилювачі операційні підсилювачі першого каскаду виконані за інвертуючою схемою.

Резистивні тензодатчики перетворюють у зміну свого опору деформацію, яка практично є рівною деформації об'єкта у місці закріплення датчика. Ці датчики є пасивними і для їх збудження (ініціалізації) використовують джерело живлення, підключене до вимірювального ланцюга, який містить тензодатчики.

Відомий аналоговий інтерфейс для дистанційних вимірювань за допомогою резистивних тензодатчиків, обрано в якості прототипу [9], який містить у своєму складі послідовно з'єднані вимірювальний ланцюг з резистивними тензодатчиками, вимірювальний підсилювач та аналоговий перетворювач логотричного типу. Джерелом живлення є джерело постійної напруги, гальванічного ізольоване від землі. Вимірювальний ланцюг виконаний як неврівноважена мостова схема з двома тензорезисторами та двома підстроювальними резисторами у своїх плечах.

Мостова схема працює з виходом по напрузі (з режимом холостого ходу у вимірювальній діагоналі). Вимірювальний підсилювач виконаний двокаскадним, на операційних підсилювачах. Перший каскад підсилює диференціальний сигнал з вимірювального ланцюга і виконаний за схемою неінвертуючого підсилювача на двох пов'язаних між собою операційних підсилювачах. Другий каскад, виконаний як диференціальний підсилювач на операційному підсилювачі, придушує синфазний сигнал [8].

Сигнал з виходу вимірювального ланцюга передається на вхід вимірювального підсилювача за допомогою дротових ліній зв'язку. Несиметрія цих ліній з урахуванням значного вхідного опору вимірювального підсилювача призводить до того, що виникає різниця потенціалів (напруга завади) яка може буди порівняною з сигналом розбалансу

мостової схеми вимірювального ланцюга, що передається, тобто з корисним сигналом. І навіть слабка завада може суттєво його (корисний сигнал) спотворити [10].

Ще одним недоліком прототипу є те, що для калібрування використовують метод шунтування [8]. З часом тензодатчики змінюють свій опір (старіють), що схемою не враховується, і це теж знижує точність вимірювання [11].

Запропонована схема електрична функціональна запропонованого аналогового інтерфейса для дистанційних вимірювань за допомогою резистивних тензодатчиків на рисунок 1.

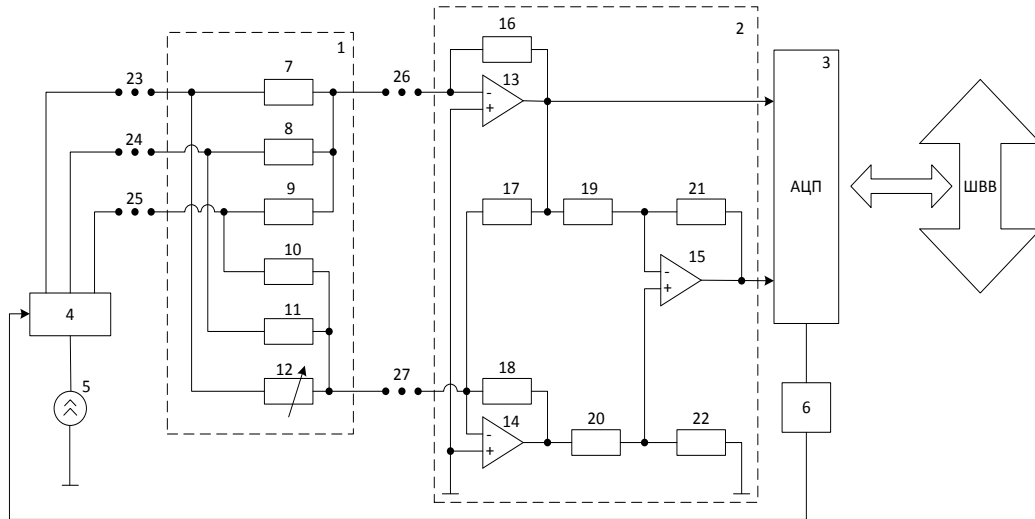


Рисунок 1. Схема електрична функціональна аналогового інтерфейса для дистанційних вимірювань з допомогою резистивних тензодатчиків

Рисунок 1. Схема электрическая функциональная аналогового интерфейса для дистанционного измерения с помощью резистивных тензодатчиков

Figure 1. Schematic of the electrical functional analog interface for remote measurement using resistive strain gauges

1 – вимірювальний ланцюг; 2 – вимірювальний підсилювач; 3 – аналого-цифровий перетворювач логаметричного типу; 4 – аналоговий мультиплексор; 5 – джерело постійного струму (без гальванічної розв'язки); 6 – мікроконтролер; 7 – резистивний тензодатчик; 8 ÷ 11 – зразкові резистори; 12 – підстроювальний резистор; 13 ÷ 15 – операційні підсилювачі; 16 ÷ 22 – резистори; 23 ÷ 27 – дротові лінії зв'язку.

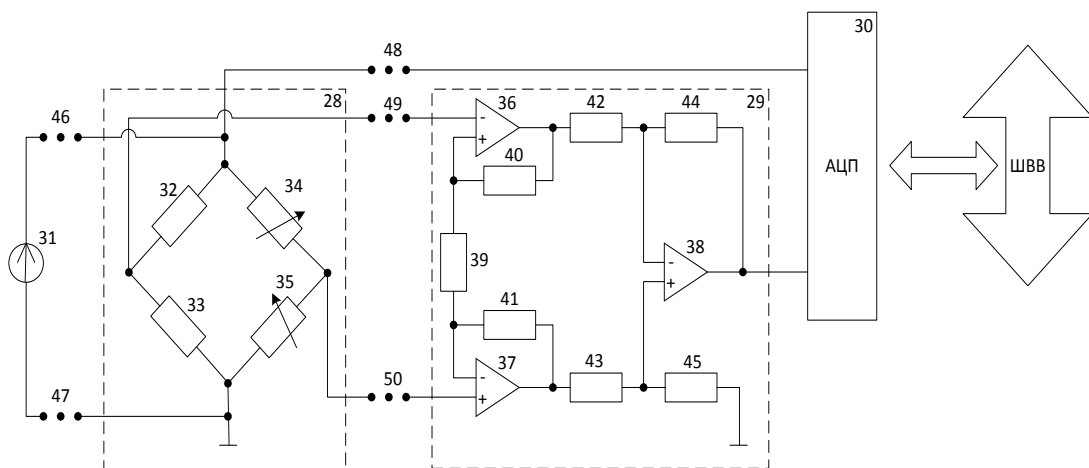


Рисунок 2. Схема електрична функціональна аналогового інтерфейса-прототипа

Рисунок 2. Схема электрическая функциональная аналогового интерфейса-прототипа

Figure 2. The electrical functional diagram of the analog prototype interface

28 – вимірювальний ланцюг; 29 – вимірювальний підсилювач; 30 – аналого-цифровий перетворювач логаметричного типу; 31 – джерело постійної напруги, гальванічне ізольоване від землі; 32, 33 – резистивні тензодатчики; 34, 35 – підстроювальні резистори; 36, 37, 38 – операційні підсилювачі; 39 ÷ 45 – резистори; 46 ÷ 50 – дротові лінії зв'язку

Аналоговий перетворювач логотричного типу 3 разом з аналоговим мультиплексором 4 та джерелом постійного струму 5 можуть бути виконані на одній платі і може бути використана, плата PCI/202 фірми ICP DAS (Південна Корея).

Робочий цикл аналогового інтерфейса проходить наступним чином. Джерело 5 генерує постійний струм I_0 який через аналоговий мультиплексор 4 по дротовій лінії зв'язку 23 поступає на вхід вимірювального ланцюга 1.

В результаті розподілу струму I_0 за допомогою подільника струму, утвореного резистивним тензодатчиком 7 та підстроювальним резистором 12, формується два струми. Один з них струм I_1 , поступає на вхід вимірювального підсилювача 2 по дротовій лінії зв'язку 26, другий струм I_2 , - по дротовій лінії зв'язку 27.

При цьому

$$I_1 = I_0 \cdot \frac{R_{12} + r_{27}}{R_7 + R_{12} + r_{26} + r_{27}},$$

$$I_2 = I_0 \cdot \frac{R_7 + r_{26}}{R_7 + R_{12} + r_{26} + r_{27}},$$

де R_7 та R_{12} – опори відповідно резистивного тензодатчика 7 та підстроювального резистора 12; r_{26} та r_{27} – опори відповідно дротових ліній зв'язку 26 та 27.

Під впливом вимірювальної механічної величини R_d буде змінюватись від свого номінального значення R_d на величину ΔR_d . Відносна зміна опору $R_7 - \delta$ буде тоді $\Delta R_d / R_d$. Таким чином опір R_7 можна позначити як

$$R_7 = R_d(1 + \delta).$$

Вихідна напруга на операційному підсилювачі 13 – U_{13} з опором R_{16} у ланцюгу зворотного зв'язку буде

$$U_{13} = I_1 \cdot R_{16}.$$

А вихідна напруга на операційному підсилювачі 14 – U_{14} з опором R_{18} у ланцюгу зворотного зв'язку з урахуванням того, що $R_{16} = R_{17}$, буде

$$U_{14} = (I_1 - I_2) \cdot R_{18}.$$

Вихідна напруга другого каскада вимірювального підсилювача 6, тобто вихідна напруга операційного підсилювача 15 – U_{15} буде

$$U_{15} = U_{14} - U_{13}. \quad (1)$$

На вхід аналого-цифрового перетворювача логотричного типу 3 поступають напруги U_{15} та U_{13} і АЦП 3 формує вихідний код $N_{\text{ацп}}$ відповідно відношенню U_{15}/U_{13} , тобто з урахування (1)

$$U_{15}/U_{13} = \frac{U_{15}}{U_{13}} = \frac{U_{14}}{U_{13}} - 1. \quad (2)$$

Підставивши у співвідношення (2) значення величин через параметри схеми, отримаємо

$$1 + N_{\text{ацп}} = \frac{(I_1 - I_2) R_{18}}{I_1 \cdot R_{16}} = \frac{R_{18}}{R_{16}} \left(I - \frac{I_2}{I_1} \right).$$

При цьому

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{R_{12} + r_{27}}{R_7 + r_{26}}.$$

Для усунення впливу опорів r_{26} та r_{27} відповідних дротових ліній зв'язку 26 та 27, а також систематичних адитивної та мультиплікативної похибки вимірювального каналу у схемі у схемі реалізована безрозривна корекція методом зразкових мір – використані два резистивні подільники (відповідно зразкові резистори 8, 11 та 9, 10) у вимірювальному ланцюгу 1.

Подільники на зразкових резисторах 8, 11 та відповідно 9, 10 мають відомий коефіцієнт поділу. Перехід від подільника, утвореного парою резисторів 7, 12 (один з яких – резистивний тензодатчик) до подільника, утвореного парою резисторів 8, 11 і потім до подільника, утвореного парою резисторів 9, 10, виконується за допомогою аналогового мультиплікатора 4.

В результаті трьох послідовних вимірів отримаємо три вихідні коди АЦП 3 – відповідно N_I , N_{II} та N_{III} .

Для отримання скоригованого результату $N_{\text{скор}}$ мікроконтролер 6 співвідношення

$$N_{\text{скор}} = \frac{N_I - N_{II}}{N_{III} - N_{II}} \cdot \delta_n^* = \delta \cdot \left(\frac{\delta_n^*}{\delta_n} \right), \quad (3)$$

де δ_n – номінальне відносне відхилення опору тензодатчика (R_7) від свого номінального значення; δ_n^* – номінальне відносне відхилення опору тензодатчика (R_7) від свого номінального значення, яке зберігається в пам'яті мікроконтролера 6.

Йому відповідає код N_I

$$\delta_n = \frac{R_8 - R_{11}}{R_{11}}.$$

де δ_0 – нульове відносне відхилення опору тензодатчика (R_7) від його номінального значення. Йому відповідає код N_{II}

$$\delta_0 = \frac{R_9 - R_{10}}{R_{10}} = 0,$$

де $R_9 = R_{10}$.

Із виразу (3) ми бачимо, що результат вимірювання у даному випадку вільний від впливу систематичних складових похибки вимірювального каналу, що підвищує точність вимірювань.

Заключна частина. Додатковим позитивним результатом є покращення техніко-економічних показників, так як замість джерела постійної напруги з гальванічною розв'язкою використане джерело постійного струму без гальванічної розв'язки.

Аналоговий інтерфейс для дистанційних вимірювань за допомогою резистивних тензодатчиків містить послідовно з'єднаний вимірювальний ланцюг, у який включено тензодатчик та вхід якого зв'язаний з джерелом живлення, вимірювальний підсилювач, виконаний на операційних підсилювачах, включених за двокаскадною схемою, та аналого-цифровий перетворювач логметричного типу, причому вхідні та вихідні лінії зв'язку вимірювального ланцюга є дротовими.

Новим є те, що джерело живлення виконане у вигляді джерела постійного струму без гальванічної розв'язки, пов'язаного зі входом вимірювального ланцюга через аналоговий мультиплексор, керуючий вхід якого під'єднаний до мікроконтролера, входом пов'язаного з аналого-цифровим перетворювачем, вимірювальний ланцюг виконаний у вигляді трьох резистивних подільників струму, де один подільник утворений резистивним тензодатчиком та підстроювальним резистором, а дві інші – зразковими резисторами, і у вимірювальному підсилювачі операційні підсилювачі першого каскаду включені за інвертуючою схемою.

Список використаних джерел

1. Garrett, P. Оптимизация интерфейса для электронной вычислительной машины и преобразователей [Текст] / P. Garrett // Экспресс-информация, серия Контрольно-измерительная техника, ВИНТИ. – 1978. – № 2. – С. 1–8.
2. Классен, К. Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике [Текст] / К. Б. Классен. – М.: Постмаркет, 2000. – 352 с.
3. Цапенко, М. П. Измерительные информационные системы: Структуры и алгоритмы, системотехническое проектирование [Текст] : уч. пос. для вузов; 2-е изд., перераб. и доп. / М. П. Цапенко. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 440 с.
4. Уикзер, Дж. Соединяемость: интеллектуальные датчики или интеллектуальные интерфейсы [Текст] / Дж. Уикзер // Датчики и системы. – 2002. – № 10. – С. 50–55.
5. Rus, G. Optimized damage detection of steel plates from noisy impact test [Text] / G. Rus, S. Y. Lee, S. Y. Chang, S. C. Wooh // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 2006. – Vol. 68, Issue 7. – P. 707–727. doi: 10.1002/nme.1720.
6. Harada, T. Droplet generation using a torsional Langevin-type transducer and a micropore plate [Text] / T. Harada, N. Ishikawa, T. Kanda, K. Suzumori, Y. Yamada, K. Sotowa // Sensors and Actuators A: Physical. – 2009. – Vol. 155, Issue 1. – P. 168–174. doi: 10.1016/j.sna.2009.08.007.
7. Schröder, A. Evaluation of cost functions for FEA based transducer optimization [Text] / A. Schröder, J. Rautenberg, B. Henning // Physics Procedia. – 2010. – Vol. 3, Issue 1. – P. 1003–1009. doi: 10.1016/j.phpro.2010.01.129.
8. National Instruments, SCXI Universal Strain Grade Input: SCXI-1540. – [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.ni.com/pdf/products/us/4scxisc293_ETC_196.pdf.
9. Аш Ж. Датчики измерительных систем: в 2-х книгах. Кн. 1. / пер. с франц. / Ж. Аш – М.: Мир, 1992. – 480 с.
10. Левшина Е. С. Электрические измерения физических величин: Измерительные преобразователи: учебное пособие для вузов / Е. С. Левшина, П. В. Новицкий. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
11. Пригоровский Н. И. Измерение механических величин электрическими методами / Н. И. Пригоровский. – М.: ГНТИ Машлит, 1952. – 337 с.
12. Li, J. Modeling characterization and optimization design for PZT transducer used in Near Field Acoustic Levitation [Text] / J. Li, P. Liu, H. Ding, W. Cao // Sensors and Actuators A: Physical. – 2011. – Vol. 171, Issue 2. – P. 260–265. doi: 10.1016/j.sna.2011.06.020
13. МИ 2168-91. ГСИ. Системы измерительные информационные. Методика расчета метрологических характеристик измерительных каналов по метрологическим характеристикам линейных аналоговых компонентов [Текст] / Львов, 1991.
14. Журавин, Л. Г. Расчет метрологических характеристик при проектировании средств измерений [Текст]: уч. пос. / Л. Г. Журавин, Е. И. Семенов, Г. П. Шлыков; под ред. Г. П. Шлыкова. – Пенза: Пенз. политехн. ин-т, 1988. – 80 с.
15. Барнс, Дж. Электронное конструирование: Методы борьбы с помехами [Текст] / Дж. Барнс; пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 238 с.
16. Field Wiring and Noise Considerations for Analog Signals [Electronic resource] / Publish Date: Mar 11, 2014. – Available at: <http://www.ni.com/white-paper/3344/en/>