

МОДЕЛИРОВАНИЕ АНАЛОГОВОГО ИНТЕРФЕЙСА ДЛЯ ДИСТАНЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Л.В.Кузьмич, Д.П.Орнатский, В.П.Квасников

Национальный авиационный университет, г. Киев, Украина, klv@nau.edu.ua

Аналоговый интерфейс для дистанционных измерений с помощью мультиплексора и резистивных тензодатчиков относится к области измерительной техники, а именно - к электрическим измерениям неэлектрических величин, в данном случае механических.

Известный аналоговый интерфейс для дистанционных измерений с помощью резистивных тензодатчиков [1], который содержит в своем составе последовательно соединенные элементы: измерительная цепь с резистивными тензодатчиками, измерительный усилитель и аналоговый преобразователь логотричного типа. Источником питания является источник постоянного напряжения, гальванически изолированное от земли.

Сигнал с выхода измерительной цепи передается на вход измерительного усилителя с помощью проводных линий связи. Несимметрия этих линий с учетом значительного входного сопротивления измерительного усилителя приводит к тому, что возникает разность потенциалов (напряжение помехи), которая может быть сравнима с полезным сигналом, который может быть искажен даже слабой помехой. Еще одним недостатком данного интерфейса является то, что данной схеме не учитывается изменение сопротивления тензодатчиков в процессе эксплуатации, что, в свою очередь, снижает точность измерения при автокоррекции.

Аналогово-цифровой интерфейс для дистанционных измерений [2] содержит последовательно соединенную измерительную цепь, в которую включен тензодатчик, вход которого связан с источником питания, измерительный усилитель, выполненный на операционных усилителях, включенных по двухкаскадной схеме, и аналого-цифровой преобразователь логотричного типа, причем входные и выходные линии связи измерительной цепи являются проволочными. Источник питания выполнен в виде источника постоянного тока без гальванической развязки, связанного с входом измерительной цепи через аналоговый демultipлексор, управляющий вход которого подключен к микроконтроллеру, входом связан с аналого-цифровым преобразователем, измерительная цепь выполнена в виде трех резистивных делителей тока, где один делитель образован резистивным тензодатчиком и подстроечным резистором, а два других - образцовыми резисторами, и в измерительном усилителе операционные усилители первого каскада включены по схеме инвертора тока.

Недостатком данной конструкции является наличие погрешностей, возникающих из-за коррелированных шумов операционных усилителей, и наведение на «общее» сопротивление в «земельном» контуре.

Поставленная задача решается тем, что аналоговый интерфейс для дистанционных измерений на базе резистивного тензодатчика содержит последовательно соединенные измерительную цепь, в которую включен тензодатчик, и вход которого соединен с источником питания через аналоговый демultipлексор, а выходы измерительной цепи через аналоговый мультиплексор подключены к входам измерительного усилителя с дифференциально-токовыми входами и первым и вторым выходами, выполнен на операционных усилителях, и двухканальный аналого - цифровой преобразователь с одновременной выборкой, причем входные и выходные линии связи измерительной цепи являются проволочными, согласно предложению источник питания выполнен в виде источника постоянного тока без гальванической развязки, связанного с входом измерительной цепи через аналоговый демultipлексор, управляющий вход которого подсоединен к микроконтроллеру, входом связанного с аналого-цифровым

преобразователем, первый вход которого подключен к первому выходу измерительного усилителя, а второй выход которого подключен ко второму входу АЦП, измерительная цепь выполнена в виде трех резистивных делителей тока, где один делитель образован резистивным тензодатчиком и подстроечным резистором, а два других - образцовыми резисторами, и в измерительном усилителе операционные усилители первого каскада выполнены по схеме инвертора тока.

На рис. 1 показана схема предложенного аналогового интерфейса для дистанционных измерений с помощью мультиплексора и резистивных тензодатчиков.

В качестве аналогового дифференциального мультиплексора используется интегральная микросхема типа MAX 307 фирмы MAXIM, которая имеет следующие технические характеристики:

Максимальное сопротивление в открытом состоянии 100 Ом;

Максимальный ток утечки 2 нА;

Максимальная разница между сопротивлениями параллельных каналов 50 Ом;

Время включения и выключения 0,2 мкс.

Данный мультиплексор обеспечивает коммутацию восьми дифференциальных входов.

В качестве операционных усилителей используется интегральная микросхема типа UA747 фирмы Texas Instruments, которая содержит два операционных усилителя общего применения типа mA741C. Основные характеристики (типичные значения):

Напряжение смещения нуля 2,0 мВ;

Дрейф напряжения смещения нуля не более 15 мкВ / 0С;

Максимальный входной ток смещения нуля 80 нА;

Коэффициент усиления дифференциального сигнала 200000.

Максимальная разность входных токов 30 нА

Входное сопротивление 2МОм

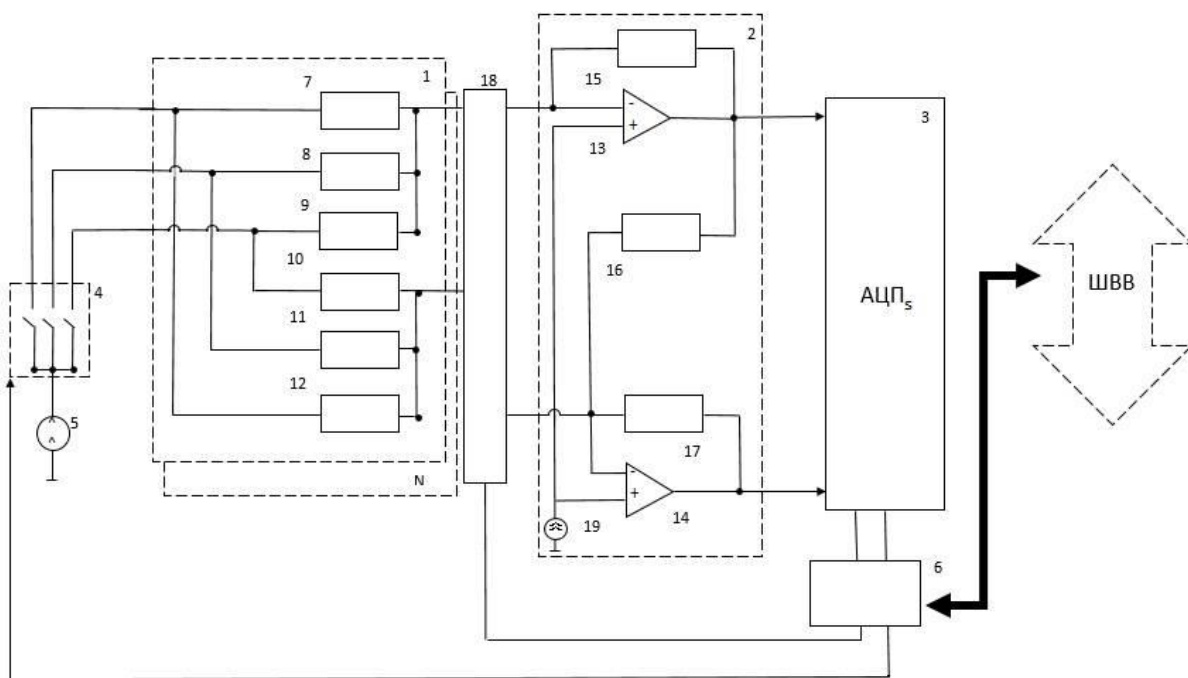


Рис. 1. Схема электрическая, функциональная аналогового интерфейса для дистанционных измерений с помощью мультиплексора и резистивных тензодатчиков:

1- измерительная цепь N-го количества; 2 - измерительный усилитель с дифференциально-токовыми входами; 3 - двухканальный аналого-цифровой преобразователь с одновременной выборкой; 4 - аналоговый демультиплексор с третьим состоянием; 5 - источник постоянного тока 6 - микроконтроллер; 7 - резистивный тензодатчик; 8 - 11 - образцовые резисторы; 12 - подстроечные резистор; 13 - 14 - операционные усилители с дифференциально-токовыми входами; 15 - 17 - резисторы; 18 - аналоговый дифференциальный мультиплексор;

19 - ЭДС, является эквивалентом коррелированных шумов и напряжения в «земельном» контуре через «общее» сопротивление.

Аналоговый интерфейс для дистанционных измерений с помощью мультиплексора и резистивных тензодатчиков работает следующим образом. Цикл измерения состоит из четырех рабочих тактов. В первом такте демультиплексор 4 находится в «третьем состоянии», то есть когда все ключи данного демультиплексора закрыты и ток инициализации I_0 не попадают в измерительную цепь 1. При этом результаты измерения выходных напряжений операционных усилителей ОУ1 и ОУ2 запоминаются в памяти компьютера под названием «U11» и «U12».

Во втором такте ключ К1 демультиплексора 4 замыкается, ключи К2 и К3 разомкнуты. В этом случае запоминаются результаты измерения операционных напряжений операционных усилителей ОУ1 и ОУ2 под названием «U21» и «U22».

В третьем такте замыкается ключ К2 к демультиплексора 4, а ключи К1 и К3 - разомкнуты. В таком случае результаты измерения операционных напряжений операционных усилителей ОУ1 и ОУ2 запоминаются под названием «U31» и «U32».

В четвертом такте ключи К1 и К2 разомкнуты, а ключ К3- замкнутый. В этом случае запоминаются результаты измерения операционных напряжений операционных усилителей ОУ1 и ОУ2 под названием «U41» и «U42».

Скорректированный результат измерения вычисляем по формуле:

$$\delta = \delta_{\text{ном}} \cdot \left[\frac{U_{22} - U_{12}}{U_{21} - U_{11}} - \frac{U_{42} - U_{12}}{U_{41} - U_{11}} \right] \cdot \left[\frac{U_{32} - U_{12}}{U_{31} - U_{11}} - \frac{U_{42} - U_{12}}{U_{41} - U_{11}} \right], \quad (1)$$

При этом, в отличие от классического метода образцовых мер [3], данный метод отличается «безрозрывностью» измерительного звена, позволяет компенсировать большее количество влияющих факторов, в частности коррелированных шумов операционных усилителей и шумов, обусловленных наличием общего контура заземления, сопротивления аналоговых коммутаторов. Например, в [4] приводится коррекция ошибок аналогового интерфейса для работы с тензодатчиками, существенным недостатком которой является существенное влияние сопротивления аналоговых коммутаторов, уменьшает эффективность подавления систематических составляющих погрешностей. Кроме этого, к недостаткам таких схем (использующие мостовые усилители) относится необходимость дополнительного каскада для ограничения полосы частот канала.

Для того, чтобы проверить эффективность предложенного способа по коррекции влияния различных влияющих факторов, получаем функцию преобразования для всего измерительного канала, воспользовавшись линейной функцией преобразования тензодатчика и моделируя влияние измеряемой величины определенными значениями сопротивлений тензодатчика:

Для проверки этого была создана модель, в которой использованы параметры реальных компонентов, а именно 8-канального аналогового дифференциального мультиплексора (тип MAX 307 фирмы MAXIM) и операционных усилителей ОУ1 и ОП2 общего пользования типа МА741.

Выходное сопротивление источника тока инициализации было избрано по параметрам источника тока в интегральном выполнении типа REF200 фирмы Burt- Brown 10 МОм в худшем случае.

На рис. 2 показано электрическую модель измерительного канала в программной среде Elektronik Workbench, где:

I_1 – источник тока инициализации ($I_0 = 1\text{mA}$)

R_1 – резистор, который моделирует выходное сопротивление источника тока I_1 .

K_1, K_2, K_3 – аналоговый демультиплексор, который переключает ток инициализации источника тока I_1 между образцовыми и измерительными резистивными поделщиками тока.

R_2, R_3 – делитель тока, который образуется резистором R_2 , меняется в зависимости от измеряемого давления в пределах от 7500 Ом до 7537,5 Ом, и образцовым резистором R_3 , равный начальному значению сопротивления тензодатчика, то есть 7500 Ом.

R_4, R_5 – делитель тока, который образуется резистором R_4 , равный максимальному сопротивлению тензодатчика ($R_4 = 7537,5$ Ом), и резистором R_5 , равной начальному значению сопротивления тензодатчика ($R_5 = 7500$ Ом).

R_6, R_7 – делитель тока, который имитирует нулевой разбаланс тензомоста ($R_6 = R_7 = 7500$ Ом).

R_8, R_9 – опоры параллельных каналов мультиплексора в замкнутом состоянии ключа дифференциального аналогового мультиплексора.

Для мультиплексора типа MAX 307 $R_8 = 95$ Ом, $R_9 = 100$ Ом.

R_{10}, R_{11}, C_1 – цепь, корректирующая коррелированную часть шумов на входе операционных усилителей в DA_1 и DA_2 , которая идентична цепи отрицательной обратной связи (R_{12}, R_{13}, C_2) инвертирующего сумматора на операционном усилителе DA_2 , также выполняет роль ограничителя полосы частот полезного сигнала на уровне 16 Гц.

$$C_1 = C_2 = 1 \text{ мкФ},$$

$$R_{10} = R_{11} = R_{12} = R_{13} = 10 \text{ кОм}$$

R_{14}, R_{15} – резисторы инвертора тока, выполненного на операционном усилителе DA_1 .

$$R_{14} = R_{15} = 1 \text{ кОм}.$$

Измерительный усилитель с дифференциально - токовыми входами состоит из инвертора тока (DA_1, R_{14}, R_{15}) и инвертирующего сумматора ($DA_2, R_{13}, C_2, R_{12}$). (DA_1, R_{14}, R_{15}).

E_1 – напряжение смещения нуля операционного усилителя DA_1 . $E_1 = +2$ мВ согласно технических характеристик МА 741.

E_2 – напряжение смещения нуля операционного усилителя DA_2 . $E_2 = +1,5$ мВ как наихудшее значение неидентичности напряжения смещения E_1 (порядка 20%).

E_3 – моделирование «синфазного» напряжения по земляному контуру. Принимаем $E_3 = 12$ мВ.

I_2, I_3 – токи смещения нуля операционного усилителя DA_2 . $I_2 = I_3 = 80$ нА согласно технических характеристик МА 741.

I_4 – разница токов смещения нуля операционного усилителя DA_2 . $I_4 = -30$ нА согласно технических характеристик МА 741.

I_5, I_6 – токи смещения нуля операционного усилителя DA_1 . $I_5 = I_6 = 100$ нА согласно технических характеристик МА 741.

I_7 – разница токов смещения нуля операционного усилителя DA_1 . $I_7 = +30$ нА как худший расбаланс по токах смещения.

При таких значениях аддитивных погрешностей операционных усилителей (максимально возможных) соотношение С / Ш на выходе измерительного усилителя будет составлять около 10 децибел. Это свидетельствует о том, что помеха имеет весомый вклад.

V_2 – вольтметр на выходе измерительного усилителя.

V_1 – вольтметр на выходе операционного усилителя DA_1 .

E_4, E_5 – источники напряжений для внедрения дифференцированного метода измерения выходных напряжений операционных усилителей соответственно DA_1 та DA_2 , что позволяет уменьшить влияние погрешности квантования.

Другие параметры операционных усилителей DA_1 и DA_2 были взяты из технических характеристик МА 741 по типовым значениям.

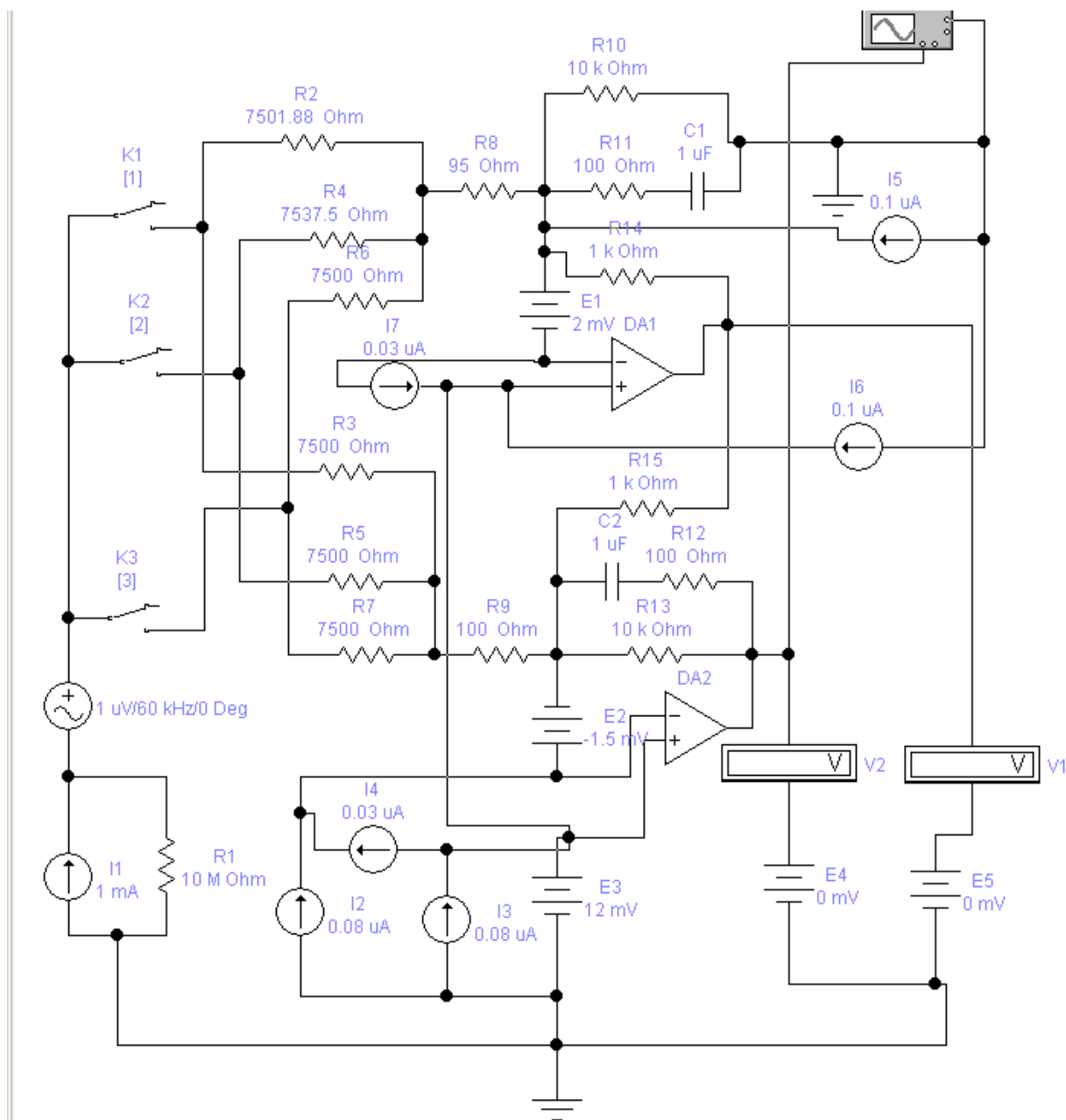


Рис.2. Электрическая модель измерительного канала в программной бреше Electronic Workbench.

В таблице 1 приведены результаты моделирования измерительного канала для 21 значения сопротивления резистивного полупроводникового тензодатчика высокотемпературного на основе карбида кремния при $k = 5$ и начальном сопротивлении датчика $R_{д0} = 7,5 \text{ кОм}$. Параметры ОУ1 выбраны следующими:

- ток смещения 100 нА;
- разница токов смещения + 30 нА;
- напряжение смещения нуля + 2 мВ;
- входное сопротивление 1 МОм.

Параметры ОП2 выбраны следующими:

- ток смещения 80 нА;
- разница токов смещения -30 нА;
- напряжение смещения нуля + 1,5 мВ;
- входное сопротивление 1 МОм.

Таблица 1.

Результаты моделирования измерительного канала

Рд, [Ом]	$\Delta\delta$	δ	U11, мВ	U12, мкВ	U21, мВ	U22, мВ	U31, мВ	U32, мВ	U41, мВ	U42, мВ
7500,000	0	0	13,2	0,2	-486,7	-1,928	-485,5	-25,9	-486,7	-1,928
7501,875	0,025	0,024686	13,2	0,2	-486,6	-3,114	-485,5	-25,9	-486,7	-1,928
7503,750	0,050	0,024816	13,2	0,2	-485,6	-3,114	-485,5	-25,9	-486,7	-1,928
7505,625	0,075	0,075022	13,2	0,2	-486,5	-5,532	-485,5	-25,9	-486,7	-1,928
7507,500	0,100	0,075022	13,2	0,2	-486,5	-5,532	-485,5	-25,9	-486,7	-1,928
7509,375	0,125	0,125025	13,2	0,2	-486,4	-7,933	-485,5	-25,9	-486,7	-1,928
7511,250	0,150	0,150042	13,2	0,2	-486,3	-9,133	-485,5	-25,9	-486,7	-1,928
7513,125	0,175	0,174964	13,2	0,2	-486,3	-10,33	-485,5	-25,9	-486,7	-1,928
7515,000	0,200	0,199996	13,2	0,2	-486,2	-11,53	-485,5	-25,9	-486,7	-1,928
7516,875	0,225	0,224985	13,2	0,2	-486,2	-12,73	-485,5	-25,9	-486,7	-1,928
7518,750	0,250	0,250033	13,2	0,2	-486,1	-13,93	-485,5	-25,9	-486,7	-1,928
7520,625	0,275	0,27509	13,2	0,2	-486,0	-15,13	-485,5	-25,9	-486,7	-1,928
7522,500	0,300	0,30009	13,2	0,2	-486,0	-16,33	-485,5	-25,9	-486,7	-1,928
7524,375	0,325	0,324954	13,2	0,2	-485,9	-17,52	-485,5	-25,9	-486,7	-1,928
7526,250	0,350	0,349958	13,2	0,2	-485,9	-18,72	-485,5	-25,9	-486,7	-1,928
7528,125	0,375	0,375045	13,2	0,2	-485,8	-19,92	-485,5	-25,9	-486,7	-1,928
7530,000	0,400	0,400143	13,2	0,2	-485,7	-21,12	-485,5	-25,9	-486,7	-1,928
7531,875	0,425	0,424949	13,2	0,2	-485,7	-22,31	-485,5	-25,9	-486,7	-1,928
7533,750	0,450	0,450062	13,2	0,2	-485,6	-23,51	-485,5	-25,9	-486,7	-1,928
7535,625	0,475	0,475081	13,2	0,2	-485,6	-24,71	-485,5	-25,9	-486,7	-1,928
7537,500	0,500	0,501877	13,2	0,2	-485,5	-25,99	-485,5	-25,9	-486,7	-1,927

Используя программную среду NUMERY, было определено регрессионное уравнение функции преобразования измерительного канала, что позволило определить систематические и случайные составляющие погрешности измерительного канала без учета погрешностей датчика.

Тогда регрессионное уравнение функции преобразования измерительного канала первого порядка будет иметь следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} y = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 \\ a_0 = -6,95 \cdot 10^{-6} \\ a_1 = 1,000163 \\ a_2 = 0,00007 \\ \sum \delta_{\text{неВ}}^2 = 9,48 \cdot 10^{-8} \end{array} \right. , \quad (2)$$

где y – выходной сигнал на выходе измерительного усилителя;

a_0, a_1, a_2 – коэффициенты регрессии;

x – текущее значение входной измеряемой величины;

$\sum \delta_{нев}^2$ – сумма квадратов невязок между текущим значением выходной величины и ее математическим ожиданием.

Из приведенного анализа результатов моделирования установлено, что доминировать будет случайная аддитивная составляющая погрешности. Поскольку при моделировании единственной случайной составляющей погрешности является погрешность квантования, то использование дифференциального метода измерения выходного напряжения существенно улучшит метрологические характеристики.

Список литературы :

1. Аш Дж. Датчики измерительных систем: в 2-х книгах. Кн.1. / пер. с франц. / [Текст] / Дж. Аш - М.: Мир, 1992. - 480 с
2. Патент на корисну модель № 109796, кл. G01R21/00, 2016, Бюл. №17.
3. Куликовский К.Л., Купер В.Я. Методы и средства измерений [Текст] / К.Л.Куликовский. - М.: Энергоатомиздат, 1986. – 448с.
4. Digital's Kompensation sverfahren zur Verbesserung von Messfuhlern. Erb. K., Fisher P. "Bulletin SEV/VSE", 1989, 80, №7, 8, 365-368.
5. National Instruments, SCXI Universal Strain Grade Input: SCXI-1540. - [Электронный ресурс] - Режим доступа: http://www.ni.com/pdf/products/us/4scxisc293_ETC_196.pdf.
6. SCXI-1126. User Manual. Eight-Channel Isolated Frequency Input Module for Signal Conditioning. National Instruments Corporation. 1998-2003.
7. 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/>
8. Классен К. Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике [Текст] / К. Б. Классен. - М.: Постмаркет, 2000. - 352 с.
9. Уикзер, Дж. Соединяемость: интеллектуальные датчики или интеллектуальные интерфейсы [Текст] / Дж. Уикзер // Датчики и системы. - 2002. - № 10. - С. 50-55.
10. 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.
11. 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.
12. Schroder, A. Evaluation of cost functions for FEA based transducer optimization [Text] / A. Schroder, J. Rautenberg, B. Henning // Physics Procedia. - 2010. - Vol. 3, Issue 1. - P. 1003-1009. doi: 10.1016/j.phpro.2010.01.129.