

## ВДОСКОНАЛЕННЯ ДВОПРОВІДНИХ ТЕРМОРЕЗИСТИВНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З КОМУТАЦІЙНИМ ІНВЕРТУВАННЯМ ЗРАЗКОВИХ СТРУМІВ

© Бойко Оксана, 2017

Львівський національний медичний університет ім. Данила Галицького, кафедра медичної інформатики,  
вул. Пекарська, 69, 79010, Львів, Україна

*Вдосконалено метод компенсації впливу опорів ліній зв'язку в двопровідних терморезистивних перетворювачах на основі комутаційного інвертування зразкового вимірювального струму. Для збільшення швидкодії та зменшення впливу перехідних комутаційних процесів застосовано аналогові запам'ятовувальні пристрої на входах ліній зв'язку. Розроблено структурну і принципову схеми терморезистивного перетворювача. Проаналізовано залежності коефіцієнта послаблення впливу опорів ліній зв'язку від похибки зразкових струмів. Коефіцієнт послаблення впливу опорів ліній зв'язку за відносної похибки зразкових струмів 0,01 становить 34 дБ і збільшується зі зменшенням відносної похибки. У разі вибору транзисторів комутатора і джерел зразкових струмів з метрологічними характеристиками, які забезпечують необхідну точність вимірювання температури, вплив зміни опору ліній зв'язку в діапазоні 0–30 Ом повністю компенсується. Встановлено, що похибка нелінійності функції перетворення в діапазоні 0–200 °С не перевищує 0,1 °С.*  
**Ключові слова:** терморезистивний перетворювач, температура, метод комутаційного інвертування.

*Усовершенствован метод компенсации влияния сопротивлений линий связи в двухпроводных терморезистивных преобразователях на основе коммутационного инвертирования образцового измерительного тока. Для увеличения быстродействия и уменьшения влияния переходных коммутационных процессов применены аналоговые запоминающие устройства на входах линий связи. Разработаны структурная и принципиальная схемы терморезистивного преобразователя. Проанализирована зависимость коэффициента ослабления влияния сопротивлений линий связи от погрешности образцовых токов. Коэффициент ослабления влияния сопротивлений линий связи при относительной погрешности образцовых токов 0,01 составляет 34 дБ и увеличивается с уменьшением относительной погрешности. При выборе транзисторов коммутатора и источников образцовых токов с метрологическими характеристиками, которые обеспечивают необходимую точность измерения температуры, влияние изменения сопротивления линий связи в диапазоне 0–30 Ом полностью компенсируется. Установлено, что погрешность нелинейности функции преобразования в диапазоне 0–200 °С не превышает 0,1 °С.*  
**Ключевые слова:** терморезистивный преобразователь, температура, метод коммутационного инвертирования.

*The improved method of compensation the influence of the lead wire resistance for two-wire resistance temperature detectors (RTDs) on the basis of commutation inverting of the reference measuring currents is proposed. For the averaging of signals generated as a result of commutation inverting of reference measuring currents, predominantly low-pass filters are used. Their usage limits the speed of temperature measurement. In order to increase the speed and reduce the impact of transient switching processes, the analogue memory devices at the inputs of the lead wires were used instead of the low-pass filters.*

*The schematic and principle diagrams of the thermoresistive transducer have been developed. In this case, the primary resistance transducer additionally comprises a diode switch and the standard resistor which are constructively located on the output contacts of the RTD. To compensate the initial value of the RTD resistance, the value of the standard resistor is chosen to be equal to the initial value of the RTD resistance. To reduce the effect of voltage difference on diodes on the accuracy of temperature measurement, a transistor pair with normalized voltage values of the base-emitter is used. To simplify the switching device, the reference current source of one polarity is continuously connected to the input of the lead wire, and the source of the reference current of the opposite polarity – is connected to the lead wire by a diode switch on two diodes. Accordingly, the reference current of one polarity passes through the RTD, and the*

*opposite polarity – through the standard resistor. The passage of the pulse measuring current through the RTD allows increasing its value, which improves the sensitivity of converting the RTD resistance into the voltage. The influence of the error of the reference measuring currents formation on the transfer function of a thermoresistive transducer and the compensation of the influence of the lead wires' resistance have been analyzed. With a relative error of the reference currents of 0.01, the relaxation factor of the lead wires resistance is equal to 34 dB and increases with a decrease in a relative error.*

*Research of the principle electric circuit of a two-wire thermoresistive transducer was carried out by computer simulation. The developed model completely reproduces all functional transformations of the developed principle electric circuit. The research was carried out for a copper 100 Ohm (Cu100) RTD. The research of the influence of non-identity of transistor switches of a primary thermoresistive transducer and the errors of the reference measuring currents formation was carried out.*

*When commutation transistors and sources of reference currents with metrological characteristics that provide the required accuracy of temperature measurement are chosen, the effect of the change in resistance of the lead wires within the range 0.. 30 ohms is completely compensated. It was found that the error of the non-linearity of the transformation function within the range 0...20 °C does not exceed 0.1 °C.*

*As a result of the study of influence of a discharge time constant of analogue memory devices, a choice of optimal values of the frequency of a clock generator and the values of parameters of the analogue memory device elements was conducted.*

**Key words:** *thermoresistive transducer, temperature, method of commutation inverting.*

**Вступ.** Для вимірювання і контролю температури на промислових об'єктах широко використовуються терморезистивні перетворювачі, які характеризуються високою точністю і стабільністю [1–3]. Опір ліній зв'язку в двопровідних схемах терморезистивних перетворювачів створює адитивну складову похибки перетворення температури на напругу. Так, у випадку двопровідного під'єднання платиного терморезистивного перетворювача (Pt-100 RTD) додаткова похибка через вплив опорів ліній зв'язку з опором 1 Ом спричиняє додаткову похибку 2,5 °С, а за опору ліній 5 Ом – 12 °С. На практиці, особливо у разі віддалених вимірювань, коли первинний терморезистивний перетворювач і вторинний вимірювальний перетворювач розміщені на значних відстанях, опір ліній зв'язку може становити навіть десятки Ом [4]. На похибку також впливають зміни опору ліній зв'язку, спричинені коливаннями температури довкілля [5]. Для зменшення впливу опорів ліній зв'язку застосовують трипровідне і чотирипровідне під'єднання [6–7]. Чотирипровідне під'єднання забезпечує найвищу точність, але є найменш економічним, і часто виникають труднощі з прокладанням додаткових ліній зв'язку, особливо на атомних станціях, коли для прокладання додаткових ліній необхідні величезні капіталовкладення.

Для компенсації впливу опорів ліній зв'язку на точність перетворення у двопровідних терморезистивних

перетворювачах застосовують метод комутаційного інвертування [8–9]. У відомих схемах на основі методу комутаційного інвертування для усереднення вихідних сигналів використовують фільтри низьких частот, що обмежує швидкодію. На точність перетворення при цьому впливає точність формування часових інтервалів комутації зразкових струмів.

**Метою статті** є вдосконалення структур двопровідних терморезистивних перетворювачів температури на напругу з комутаційним інвертуванням зразкових струмів.

**Розроблення двопровідного терморезистивного перетворювача на основі методу комутаційного інвертування з додатковими аналоговими запам'ятовувальними пристроями.** Підвищення швидкодії терморезистивних перетворювачів можливе у разі заміни фільтрів низьких частот аналоговими запам'ятовувальними пристроями. Запропоновану структурну схему терморезистивного перетворювача наведено на рис. 1.

Первинний терморезистивний перетворювач (ПТП)  $R_t$  додатково містить діодний комутатор на діодах VD1, VD2 і зразковий резистор  $R_0$ , конструктивно розміщені на контактних елементах ПТП. Зразковий резистор призначений для компенсації початкового опору ПТП. Первинний терморезистивний перетворювач  $R_t$  через лінії зв'язку  $R_{L1}$ ,  $R_{L2}$  під'єднаний до перетворювача

опору на напругу. Перетворювач опорів на напругу містить джерела зразкового струму  $I_{0+}$ ,  $I_{0-}$ , ключ  $K1$ , тактовий генератор керування ключем ТГ, аналогові запам'ятовувальні пристрої напруги додатної та від'ємної полярності АЗП1, АЗП2 і вихідний суматор напруг  $\Sigma$ .

Джерело зразкового струму  $I_{0-}$  постійно під'єднане до лінії зв'язку  $R_{L1}$ , відповідно, якщо розімкнений ключ  $K1$ , на вході лінії формується напруга

$$U_- = I_{0-}(R_{L1} + R_{L2} + R_t) - \Delta U_{d1}, \quad 0 \leq t \leq \frac{T}{2}, \quad (1)$$

де  $I_{0-}$  – значення зразкового струму від'ємної полярності;  $\Delta U_{d1}$  – значення напруги на діоді VD1;  $T$  – значення періоду вихідних імпульсів ТГ.

Під час формування додатного вихідного імпульсу ТГ відбувається замикання ключа  $K1$  і через лінії зв'язку проходить зразковий струм додатного джерела  $I_{0+}$ .

Відповідно на вході лінії зв'язку  $R_{L1}$  формується напруга

$$U_+ = (I_{0+} + I_{0-})(R_{L1} + R_{L2} + R_0) + \Delta U_{d2}, \quad \frac{T}{2} \leq t \leq T, \quad (2)$$

де  $\Delta U_{d2}$  – значення напруги на діоді VD2.

Напругу на вході лінії зв'язку додатної полярності запам'ятовує АЗП1, а від'ємної полярності – АЗП2.

Вихідні напруги АЗП1 і АЗП2 надходять на суматор, на виході якого напруга дорівнює

$$U_{вих} = U_+ + U_-. \quad (3)$$

За умови  $|I_{0+}|=2|I_{0-}|$  і  $\Delta U_{d1}=\Delta U_{d2}$  отримаємо:

$$U_{вих} = I_{0-}(R_t - R_0). \quad (4)$$

У такому разі вплив опорів ліній зв'язку повністю компенсується.

Точність формування вихідної напруги залежить від точності формування зразкових струмів і від різниці напруг на діодах VD1 і VD2. Несиметричність вихідних імпульсів тактового генератора на точність вихідної напруги не впливає.

У разі відхилення значень зразкових струмів від номінального значення вплив опорів ліній зв'язку компенсується не повністю виникає похибка, абсолютне значення якої визначається з виразу

$$\Delta U_{R_L} = (R_{L1} + R_{L2})(2\delta_- I_{0-} - \delta_+ I_{0+}), \quad (5)$$

де  $\delta_+$ ,  $\delta_-$  – відносна похибка зразкового струму додатної та від'ємної полярностей відповідно.

За умови  $|I_{0+}|=2|I_{0-}|=I_{0n}$  отримаємо:

$$\Delta U_{R_L} = 2I_{0n}(R_{L1} + R_{L2})d_{max} \quad (6)$$

де  $d_{max}$  – максимально допустиме значення відносної похибки зразкових струмів.

Максимальне значення еквівалентної похибки від впливу опорів ліній зв'язку в Ом дорівнює

$$\Delta R_{max} = \frac{\Delta U_{R_L}}{I_{0n}} = 2(R_{L1} + R_{L2})d_{max} \quad (7)$$

Для оцінювання ефективності цього методу доцільно ввести коефіцієнт послаблення впливу опорів ліній зв'язку [9], значення якого знаходять з виразу:

$$K_n = 20 \lg \frac{R_{L1} + R_{L2}}{\Delta R_{max}} = 20 \lg \frac{1}{2d_{max}}. \quad (8)$$

На рис. 2 наведено графічну залежність коефіцієнта послаблення впливу опорів ліній зв'язку від максимально допустимих значень похибки зразкових струмів.

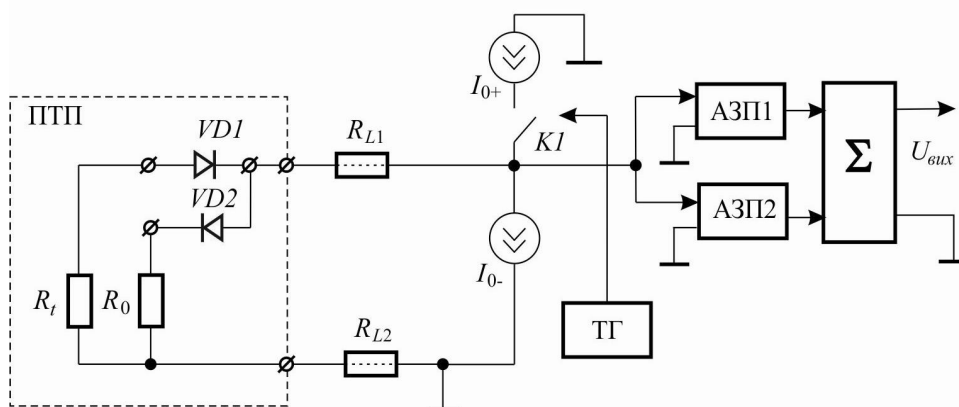


Рис. 1. Структурна схема двопровідного терморезистивного перетворювача з аналоговими запам'ятовувальними пристроями

Fig. 1. The schematic diagram of two-wire resistive temperature transducers with analogue memory devices

Рис. 2. Графічна залежність коефіцієнта послаблення впливу опорів ліній зв'язку від максимально допустимих значень похибки формування зразкових струмів

Fig. 2. The plot of the relationship the relaxation factor of the lead wires resistance vs. the maximum possible error of the reference measuring currents formation

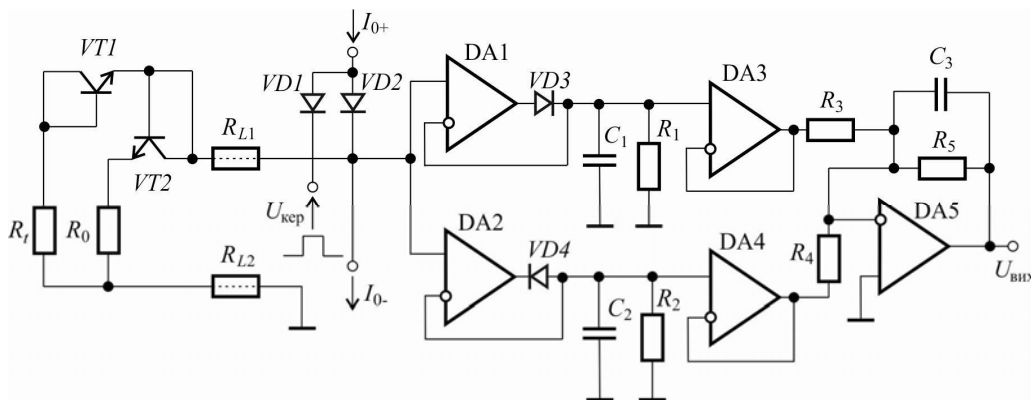
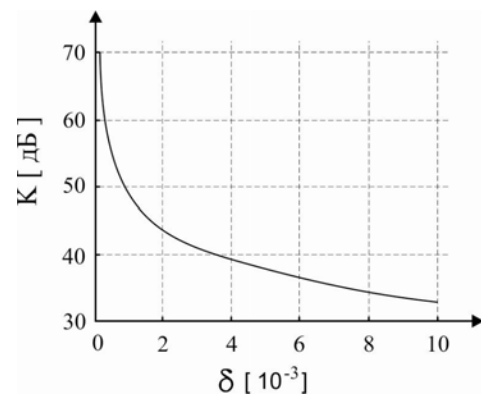


Рис. 3. Принципова схема двопровідного терморезистивного перетворювача з компенсацією впливу опорів ліній зв'язку

Fig. 3. The principle electric circuit of a two-wire thermoresistive transducer with compensation the influence of the lead wire resistance

З аналізу графічної залежності бачимо, що коефіцієнт послаблення впливу опорів ліній зв'язку за відносної похибки зразкових струмів 0,01 становить 34 дБ і збільшується зі зменшенням відносної похибки.

**Проектування принципової схеми двопровідного терморезистивного перетворювача з компенсацією впливу опорів ліній зв'язку.** Одними із основних вузлів структурної схеми терморезистивного перетворювача є аналогові запам'ятовувальні пристрої. АЗП напруги додатної полярності виконано на операційних підсилювачах DA1 і DA3, а АЗП напруги від'ємної полярності – на операційних підсилювачах DA2 і DA4. На рис. 3 наведена спроектована принципова схема двопровідного терморезистивного перетворювача.

Для отримання додатної вихідної напруги стабілізатор зразкового струму від'ємної полярності постійно під'єднаний до лінії зв'язку, а стабілізатор зразкового струму додатної полярності під'єднується

до лінії зв'язку діодним комутатором на діодах VD1, VD2.

Керування діодним комутатором здійснюється керуючими імпульсами  $U_{кер}$ , які надходять на діод VD1.

Діодний комутатор ПТП виконаний на n-p-n транзисторах VT1, VT2. Використання транзисторної пари, для якої нормується різниця напруг база-емітер, забезпечує зменшення впливу нерівності напруг на комутаторі.

За від'ємного сигналу керування  $U_{кер}$  через ПТП проходить зразковий струм від'ємної полярності, а напруга на входах лінії зв'язку описується виразом

$$U_{ex-} = I_{0-}(R_{L1} + R_{L2} + R_i) - \Delta U_{VT1}, \quad 0 \leq t \leq \frac{T}{2}, \quad (9)$$

де  $\Delta U_{VT1}$  – напруга база-емітер транзистора VT1; T – період сигналів керування.

За додатного сигналу керування  $U_{кер}$  через лінії зв'язку і зразковий резистор  $R_0$  проходить різниця струмів додатної та від'ємної полярностей. Відповідно на вході лінії зв'язку формується напруга

$$U_{ex+} = (I_{0+} + I_{0-})(R_{L1} + R_{L2} + R_0) + \Delta U_{VT2}, \quad \frac{T}{2} \leq t \leq T, \quad (10)$$

де  $\Delta U_{VT2}$  – напруга база-емітер транзистора VT2.

Вхідні напруги на лінії зв'язку запам'ятовуються на конденсаторах  $C_1, C_2$ , розміщених у колах від'ємного зв'язку операційних підсилювачів DA1 і DA2. Напруга додатної полярності запам'ятовується на конденсаторі  $C_1$ , а від'ємної полярності – на конденсаторі  $C_2$ .

Напруги конденсаторів  $C_1$  і  $C_2$  через повторювачі на ОП DA3 і DA4 надходять на суматор на операційному підсилювачі DA5 і резисторах  $R_3, R_4$  і  $R_5$ . Вихідна напруга ОП DA5 описується виразом

$$U_{вих} = \left( \frac{U_{ex+}}{R_3} + \frac{U_{ex-}}{R_4} \right) R_5. \quad (11)$$

Після відповідної підстановки, якщо виконуються умови  $R_3=R_4=R$ ,  $\Delta U_{VT1} = \Delta U_{VT2}$ ,  $I_{0+}=2|I_{0-}|$ , отримаємо

$$U_{вих} = -I_{0-}(R_t - R_0)k, \quad (12)$$

де  $k = \frac{R_5}{R}$  – коефіцієнт підсилення вихідного підсилювача.

Вибором значення коефіцієнта підсилення вихідного підсилювача  $k$  досягається числова рівність значень вихідної напруги і вимірюваної температури.

Нерівність напруг  $\Delta U_{VT1} = \Delta U_{VT2}$  створює адитивну похибку, яку компенсуємо зміщенням нульового рівня ОП DA5.

**Дослідження двопровідного терморезистивного перетворювача.** Дослідження принципової електричної схеми двопровідного терморезистивного перетворювача здійснювалось методом комп'ютерного моделювання. Схему функціональної моделі наведено на рис. 4.

Функцію тактового генератора двополярних імпульсів виконує генератор однополярних імпульсів, під'єднаний до від'ємного джерела живлення.

Елементи аналогової пам'яті й усереднення повністю відповідають принципівій електричній схемі (рис. 3). Для компенсації зміщення нульового рівня вихідного підсилювача і загальної адитивної похибки перетворювача використано джерело зразкової напруги постійного струму, під'єднане до неінвертувального входу вихідного підсилювача DA5.

Для вимірювання вихідної напруги застосовано мілівольтметр, під'єднаний до виходу вихідного підсилювача. Для вимірювання абсолютної похибки вихідного сигналу застосовано послідовно з'єднані джерело зразкової напруги і мікрвольтметр.

Зразкове джерело формує значення напруги, яке дорівнює еквівалентному номінальному значенню вимірюваної температури. Дослідження проведено для мідного ПТП з номінальним значенням опору 100 Ом. Калібрування вихідної напруги здійснюється резистором у колі зворотного зв'язку вихідного підсилювача.

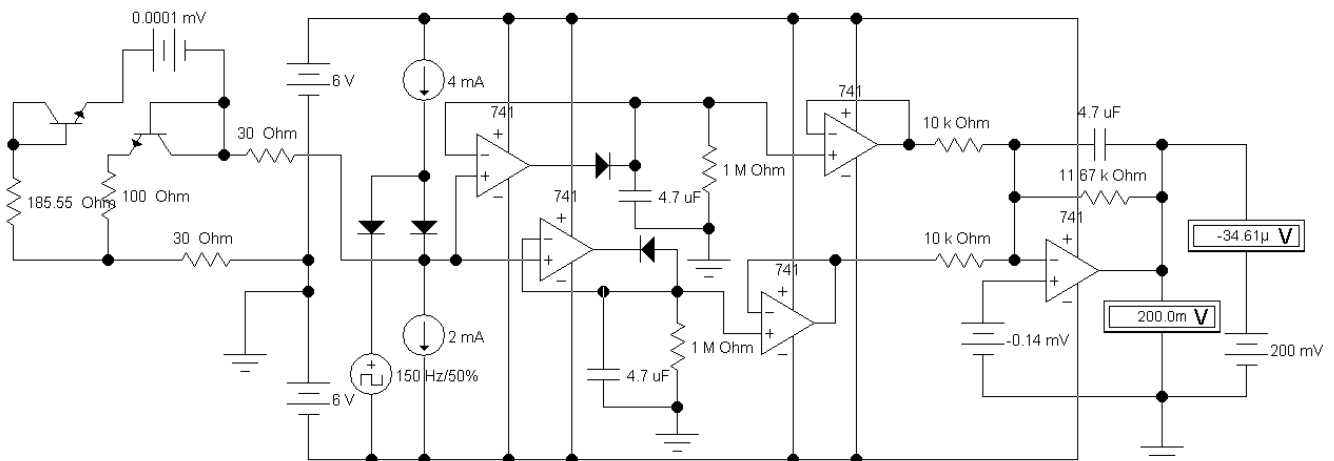
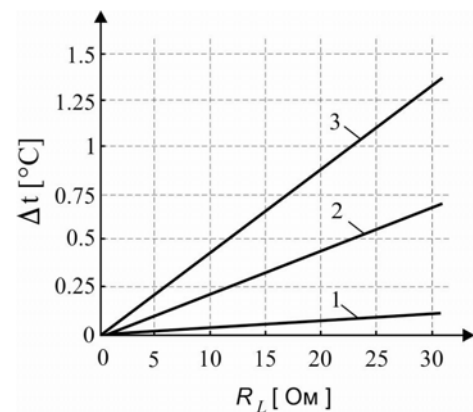


Рис. 4. Схема дослідження двопровідного терморезистивного перетворювача

Fig. 4. The simulation model of the two-wire thermoresistive transducer

Рис. 5. Графічні залежності похибки вимірювання температури від зміни опору ліній зв'язку для: 1 –  $\delta_{\max}=0,01$ ; 2 –  $\delta_{\max}=0,005$ ; 3 –  $\delta_{\max}=0,001$

Fig. 5. The plot of the relationship temperature measurement error vs. the influence of the lead wire resistance for: 1 –  $\delta_{\max}=0,01$ ; 2 –  $\delta_{\max}=0,005$ ; 3 –  $\delta_{\max}=0,001$



Для дослідження впливу неідентичності транзисторних ключів використано додаткове джерело напруги постійного струму, ввімкнене між емітером першого транзистора і базою другого транзистора. Неідентичність транзисторних ключів спричиняє адитивну похибку вимірювання, яка не залежить від опору ліній зв'язку. Адитивна похибка обернено пропорційна до вимірювального струму. У разі різниці напруг транзисторних ключів 1 мВ адитивна похибка за вимірювального струму 1 мА дорівнює 2,3 °С, а за струму 2 мА – 1,16 °С. За різниці напруг транзисторних ключів 0,1 мВ адитивна похибка за вимірювального струму 1 мА дорівнює 0,23 °С, а за струму 2 мА – 0,12 °С. За нормованих значень різниці напруг транзисторних ключів <10 мкВ цією похибкою можна нехтувати. Встановлено, що похибка нелінійності функції перетворення у діапазоні 0...200 °С не перевищує 0,1 °С.

Точність компенсації впливу опорів ліній зв'язку залежить насамперед від похибок формування зразкових струмів.

На рис. 5 наведено графічні залежності похибки вимірювання температури від зміни опору ліній зв'язку для різних значень похибок формування зразкових струмів.

Для забезпечення точності вимірювання температури 0,2 °С точність формування зразкових струмів не повинна перевищувати 0,2 %. За такої точності формування зразкових струмів впливом опору ліній зв'язку в діапазоні 0...30 Ом можна нехтувати.

**Висновки.** Запропонований метод комутаційного інвертування зразкового вимірювального струму з аналоговими запам'ятовувальними пристроями дає змогу підвищити швидкодію і повністю компенсувати вплив опорів ліній зв'язку в діапазоні 0...30 Ом на похибку вимірювання температури. Перехідні процеси в момент комутації зразкових струмів на похибку і швидкодію вимірювання не впливають.

У разі оптимального вибору частоти комутації зразкових струмів значення ємності ліній зв'язку і постійної часу розряду аналогових запам'ятовувальних пристроїв на точність вимірювання не впливають.

На точність компенсації впливу опору ліній впливає передусім різниця струмів додатної та від'ємної полярностей. Однак зміна значень зразкових струмів у межах допустимих похибок на точність компенсації впливу опорів ліній зв'язку практично не впливає.

1. Darrell H. Evaluating Thin Film RTD Stability / Hyde Darrell // *Sensors*. – 1997. – P. 79. 2. Svelto C. Compact and accurate digital thermometer based on Anderson's loop and Pt-100 sensor / C. Svelto, G. Galzerano, E. Bava // *Measurement*. – 2001. – Vol. 29 – 287–292. 3. Бойко О. Аналогова лінеаризація характеристик терморезистивного перетворювача формуванням компенсаційного струму / О. Бойко // *Технічні вістію* – 2016ю – № 1(43), 2(44). – С. 43–45. 4. Pradhan S. An improved lead compensation technique for three – wire resistance temperature detectors / S. Pradhan, S. Sen // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* – 1999 – Vol. 48. – P. 903–905. 5. Sen S. K. An improved lead wire compensation technique for conventional four wire resistance temperature detectors (RTDs) / S. K. Sen, T. K. Pan, P. Ghosal // *Measurement*. – 2011. – Vol. 44 – P. 842–846. 6. Hotra O. Temperature measuring device based on thin film thermoresistors / O. Hotra, O. Boyko // *Prace Instytutu Elektrotechniki / Proceedings of Electrotechnical Institute* – 2012. – Nr. 260. – S. 207–218. 7. Maiti T.K. A Novel Lead-Wire-Resistance Compensation Technique Using Two-Wire Resistance Temperature Detector / T.K. Maiti // *IEEE Sensors Journal*. – 2006. – Vol. 6, No. 6. – P. 1454–1458. 8. Метрологія та вимірювальна техніка: підручник / Є. С. Поліщук, М. М. Дорожовець, В. О. Ялук [та ін.] за ред. Є. С. Поліщука. – Львів: Бескид-Біт, 2003. – 544 с. 9. Бойко О. В. Компенсація впливу опорів ліній зв'язку в двопровідних терморезистивних перетворювачах / О. В. Бойко, Р. О. Матвіїв, О. П. Чабан // *Методи та прилади контролю якості*. – 2015. – № 1 (34). – С. 83–89.