

**Півторак Д.О.**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Цибульник С.О.**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Павловський О.М.**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ІНФОРМАЦІЙНОГО СИГНАЛУ В ОПІР ДЛЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ

*Для імітації потенціометричного датчика системи автоматичного керування технологічними процесами запропоновано використовувати модифікований оптико-електронний перетворювач напруги в опір, який має гальванічну розв'язку виходу і має лінійну характеристику в заданому діапазоні зміни вихідного опору. Принцип дії перетворювача заснований на зміні опору фоторезисторів під впливом оптичного випромінювання, що йде від керованого джерела. В оптичному блоці перетворювача встановлено джерело оптичного випромінювання і два одночасно спрямованих на нього фоторезистори. Сигнал з одного фоторезистора є вихідним, а сигнал із другого фоторезистора аналізується схемою керування, яка через регулятор яскравості синхронно змінює освітленість на світлочутливих майданчиках фоторезисторів залежно від рівня керуючої напруги і коригувальної поправки. Використання фоторезисторів з характеристиками, які відрізняються, а також за відмінностей у їхньому встановленні відносно джерела оптичного випромінювання, призводить до порушення лінійності функції відгуку перетворювача й істотного зниження точності його роботи. У статті отримано залежності, що описують взаємозв'язок параметрів фоторезисторів, які мають розкид характеристик і відмінності в їхньому встановленні відносно джерела оптичного випромінювання, що підтверджено експериментально. В роботі показано, що модифікація відомого оптико-електронного перетворювача шляхом введення коригувальної поправки на схемотехнічному рівні, дає змогу підвищити точність перетворення. Отримано вираз для функції відгуку модифікованого перетворювача напруга-опір. Похибка перетворення в результаті введення коригувальної поправки за результатами експериментальних досліджень не перевищує 1,6 %. Показано, що похибка перетворення в цьому випадку визначається, насамперед, точністю введення коригувальної поправки.*

**Ключові слова:** перетворювач, опір, сигнал, фоторезистор.

**Постановка проблеми.** Принцип дії систем автоматичного керування технологічними процесами ґрунтується на вимірюванні значень поточних параметрів і характеристик, обробці та збереженні отриманої інформації згідно із закладеною програмою з подальшою видачею керівних сигналів на виконавчі механізми для підтримання заданих параметрів. Вимірювання параметрів здійснюється за допомогою датчиків, які перетворюють величину впливу на вигляд, зручний для подальшого опрацювання в системі автоматичного керування [1, с. 15]. Одним із різновидів датчиків, що широко використовуються, є потенціометричні, що перетворюють величину вимірюваного параметра (наприклад, температуру) на величину опору [2, с. 12].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** З метою періодичного контролю працездатності

системи автоматичного керування технологічним процесом замість датчиків підключаються їхні імітатори, що подають у систему необхідні для контролю сигнали. Як імітатори потенціометричних датчиків широко використовують контактні або цифрові потенціометри, що мають низку недоліків, зазначених у роботах [3, с. 10; 4, с. 58; 4, с. 104]. У цих же роботах як імітатор потенціометричного датчика запропоновано використовувати оптико-електронний перетворювач напруга-опір, що має лінійну функцію відгуку і має фоторезисторний вихід, який забезпечує хорошу гальванічну розв'язку.

Основою перетворювача є джерело оптичного випромінювання з дистанційно регульованими параметрами та двома фоторезисторами, один з яких використовується для керування яскравістю джерела оптичного випромінювання, а сиг-

нал з другого зчитується системою автоматичного керування під час її налаштування або контролю працездатності.

Структурну схему оптико-електронного перетворювача інформаційного сигналу в опір показано на рис. 1.

Вихідним сигналом оптико-електронного перетворювача є опір  $R_{OUT}$ , величина якого лінійно залежить від значення вхідного інформаційного сигналу – величини напруги на його вході  $U_{IN}$ . У перетворювачі використано два фоторезистори, вихідний фоторезистор 1 і фоторезистор зворотного зв'язку 2, встановлені на однаковій відстані від джерела оптичного випромінювання, що дає змогу створити на світлочутливих майданчиках фоторезисторів однакову освітленість. Робота перетворювача ґрунтується на синхронній зміні опору фоторезисторів, один з яких використовується для керування яскравістю джерела оптичного випромінювання [5, с. 105].

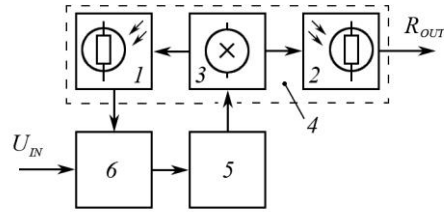
У роботі [4, с. 60] описано результати експериментальних досліджень макета даного перетворювача напруга в опір, отримано сімейства залежностей (функції відгуку перетворювача) для різних температур навколишнього середовища. Показано, що функція відгуку перетворювача в заданих межах зміни вихідного параметра є лінійною.

У роботах наголошується, що для його точної роботи, у перетворювачі мають бути використані однотипні фоторезистори, що мають однакові характеристики, встановлені на однаковій відстані та під прямим кутом до джерела оптичного випромінювання. Водночас, питання впливу розкиду параметрів фоторезисторів та коректності їхнього встановлення відносно джерела оптичного випромінювання на точність роботи оптико-електронного перетворювача інформаційного сигналу у вигляді напруги в опір, не розглянуто.

**Постановка завдання.** Метою статті є опис результатів досліджень впливу параметрів фоторезисторів і коректності їхнього встановлення відносно джерела оптичного випромінювання на точність роботи перетворювача.

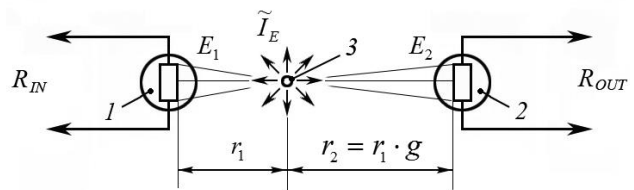
**Виклад основного матеріалу.** Основою побудови перетворювача інформаційного сигналу (величини напруги  $U_{IN}$ ) в опір  $R_{OUT}$  є кероване джерело випромінювання 3 і два спрямовані на нього фоторезистори – вихідний фоторезистор 2 і фоторезистор зворотного зв'язку 1 (рис. 2).

Джерело оптичного випромінювання 3 (розглядається як точкове джерело) має регульовану силу



**Рис. 1. Структурна схема перетворювача інформаційного сигналу у вигляді напруги в опір:**

- 1 – фоторезистор зворотного зв'язку;
- 2 – вихідний фоторезистор, 3 – джерело оптичного випромінювання, 4 – оптико-електронний блок;
- 5 – регулятор яскравості; 6 – схема керування



**Рис. 2. Розміщення фоторезисторів відносно джерела оптичного випромінювання:**

- 1 – фоторезистор зворотного зв'язку,
- 2 – вихідний фоторезистор, 3 – джерело оптичного випромінювання

світла  $\tilde{I}_E$ . На нього спрямовані фоторезистори 1 і 2, розташовані, відповідно, на відстані  $r_1$  і  $r_2$  від джерела випромінювання 3, світлочутливі майданчики яких розташовані під деякими кутами  $\phi_1$  і  $\phi_2$  по відношенню до джерела випромінювання. Джерело випромінювання 3 створює на світлочутливих майданчиках фоторезисторів 1 і 2 освітленість, яка визначається залежностями [6, с. 31]:

$$E_1 = \frac{\tilde{I}_E}{r_1^2} \cdot \cos \phi_1;$$

$$E_2 = \frac{\tilde{I}_E}{r_2^2} \cdot \cos \phi_2 = \frac{\tilde{I}_E}{(g \cdot r_1)^2} \cdot \cos \phi_2,$$

де  $g = \frac{r_2}{r_1}$ .

Тобто, освітленості світлочутливих майданчиків фоторезисторів 1 і 2 пов'язані між собою залежністю:

$$E_2 = \frac{E_1}{g^2} \cdot \frac{\cos \phi_2}{\cos \phi_1}. \quad (1)$$

При однаковому встановленні фоторезисторів відносно джерела оптичного випромінювання ( $\phi_1 = \phi_2, r_1 = r_2$ ), величина освітленості їхніх світлочутливих майданчиків буде однаковою.

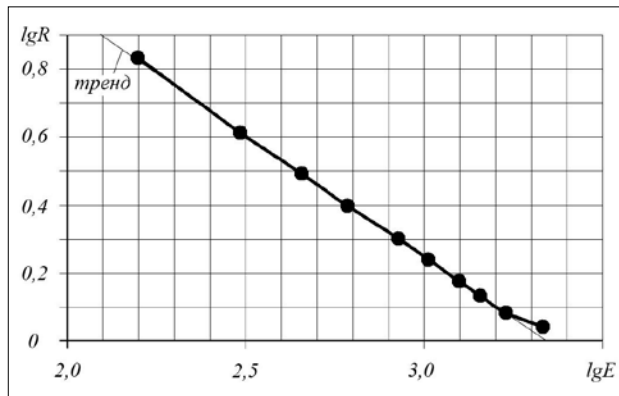


Рис. 3. Функція відгуку використовуваного в макеті фоторезистора GL5537, лінія тренда  
 $\lg R = 2,3958 - 0,716 \cdot \lg E$

В оптичному блоці макета застосовано фоторезистори GL5537 [7], експериментально виміряну характеристику  $\lg R (\lg E)$  одного з яких, подану в логарифмічній формі, показано на рис. 3.

Функція відгуку фоторезистора  $\lg R (\lg E)$  має лінійну ділянку, у межах якої може бути описана рівнянням:

$$\lg R = \lg R_T - \alpha \cdot \lg E, \quad (2)$$

де  $R$  – опір фоторезистора,  $R_T$  – темновий опір фоторезистора,  $E$  – освітленість світлочувливої майданчика фоторезистора,  $\alpha$  – тангенс кута нахилу лінійної ділянки залежності  $\lg R (\lg E)$ .

Вираз (2) може бути записано в лінійному вигляді:

$$R = \frac{R_T}{E^\alpha}.$$

Таким чином, при активному джерелі оптичного випромінювання, опори фоторезисторів визначатимуться співвідношеннями

$$R_1 = \frac{R_{T1}}{E_1^{\alpha_1}},$$

звідки

$$E_1 = \left( \frac{R_{T1}}{R_1} \right)^{\frac{1}{\alpha_1}}. \quad (3)$$

У свою чергу, вираз для  $R_2$  з урахуванням (1) і (3) може бути записано у вигляді:

$$R_2 = \frac{R_{T2}}{E_2^{\alpha_2}} = \frac{R_{T2}}{E_1^{\alpha_2}} \cdot \left( \frac{\cos \phi_1}{\cos \phi_2} \cdot g^2 \right)^{\alpha_2},$$

$$R_2 = \frac{R_{T2} \cdot g^{2 \cdot \alpha_2} \cdot \cos^{\alpha_2} \phi_1}{\left( \frac{R_{T1}}{R_1} \right)^{\frac{\alpha_2}{\alpha_1}} \cdot \cos^{\alpha_2} \phi_2} = R_1^{\frac{\alpha_2}{\alpha_1}} \cdot \frac{R_{T2}}{R_{T1}^{\frac{\alpha_2}{\alpha_1}}} \cdot \left( \frac{\cos \phi_1}{\cos \phi_2} \cdot g^2 \right)^{\alpha_2}. \quad (4)$$

Таким чином, у разі використання фоторезисторів з близькими характеристиками ( $R_{T1} = R_{T2}$ ,  $\alpha_1 = \alpha_2$ ) та їхнього однакового встановлення відносно джерела оптичного випромінювання ( $\phi_1 = \phi_2$ ,  $r_1 = r_2$ ), опори фоторезисторів  $R_1$  і  $R_2$  дорівнюватимуть, що дає змогу, задаючи опір  $R_1$  шляхом зміни яскравості джерела оптичного випромінювання, отримати аналогічну зміну опору  $R_2$ .

У загальному випадку, взаємозв'язок величин опору зворотного зв'язку  $R_1$  і вихідного опору  $R_2$  описується виразом (4), який для зручності подальшого використання може бути записано у вигляді:

$$R_2 = \eta \cdot R_1^{\frac{\alpha_2}{\alpha_1}},$$

де

$$\eta = \frac{R_{T2}}{R_{T1}^{\frac{\alpha_2}{\alpha_1}}} \cdot \left( \frac{\cos \phi_1}{\cos \phi_2} \cdot g^2 \right)^{\alpha_2} = const. \quad (5)$$

Для проведення експериментальних досліджень використано макет перетворювача напруги в опір, детально описаний в [4, с. 60]. Для експериментального визначення взаємозв'язку величин опорів фоторезисторів  $R_1$  і  $R_2$ , а також для оцінювання впливу розкиду параметрів фоторезисторів і коректності їхнього встановлення відносно джерела оптичного випромінювання на точність роботи перетворювача, виготовлено новий оптико-електронний блок. В оптико-електронному блоці передбачено можливість оперативної заміни, переміщення та повороту фоторезистора  $R_2$  (для зміни в процесі досліджень значень  $R_{T2}$ ,  $\alpha_2$ ,  $\phi_2$ ,  $g$ ). Вигляд монтажної плати оптичного блока без світлозахисного корпусу показано на рис. 4.

На рис. 5 показано одну з безлічі експериментально отриманих залежностей  $R_2 (R_1)$  у разі використання фоторезисторів з різними

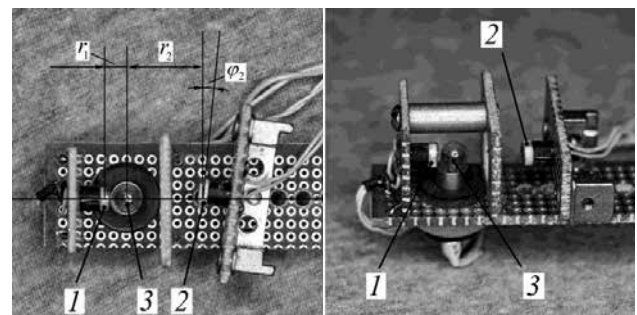


Рис. 4. Фотографія монтажної плати оптико-електронного блока без світлозахисного корпусу:  
 1 – фоторезистор зворотного зв'язку  $R_1$ ;  
 2 – вихідний фоторезистор  $R_2$ ; 3 – джерело оптичного випромінювання (лампа розжарювання)

характеристиками та їхнім різним встановленням відносно джерела оптичного випромінювання.

Експериментально отримана залежність добре апроксимується виразом (5), при цьому рівняння лінії тренду можна записати у вигляді  $R_2 = 12,173 \cdot R_1^{1,2995}$ , за похибки апроксимації, що не перевищує 1,5 %.

За допомогою макета перетворювача, описаного в [4, с. 60], оснащеного новим оптико-електронним блоком, проведено оцінювання впливу розкиду параметрів фоторезисторів і коректності їхнього встановлення відносно джерела оптичного випромінювання на точність роботи перетворювача. Одну з експериментально отриманих функцій відгуку перетворювача показано на рис. 6. На тому ж рисунку показано похибки перетворення  $\delta_{R_{OUT}}$  без використання в схемі додаткових коригувальних елементів. Похибку обчислювали відносно лінійного опису функції відгуку перетворювача, що описується рівнянням (6) [5, с. 108; 8, с. 18].

Таким чином, використання фоторезисторів з різними характеристиками та їх різним встановленням відносно джерела оптичного випромінювання в перетворювачі напруга-опір, описаному в [4, с. 60], може призвести до суттєвих похибок перетворення, для запобігання чого в електронному тракті повинна вводитися додаткова коригувальна поправка.

Передавальна функція перетворювача напруга-опір, що розглядається, з урахуванням того, що фоторезистор оптико-електронного блоку  $R_2$  є одночасно і вихідним фоторезистором усього перетворювача  $R_{OUT}$ , повинна бути лінійною і мати вигляд:

$$R_{OUT} = R_2 = k \cdot U_{IN}, \quad (6)$$

де  $U_{IN}$  – вхідна керівна напруга.

Для реалізації цього, система керування повинна забезпечувати зміну величини опору вимірювального фоторезистора відповідно до залежності:

$$R_1 = \left( \frac{k \cdot U_{IN}}{\eta} \right)^{\frac{\alpha_1}{\alpha_2}},$$

або

$$U_1 \cdot I_1 = \left( \frac{k \cdot U_{IN}}{\eta} \right)^{\frac{\alpha_1}{\alpha_2}}, \quad (7)$$

де  $U_1$  – напруга на фоторезисторі  $R_1$ ;  $I_1$  – струм, що протікає через фоторезистор  $R_1$ .

У разі забезпечення стабільності струму, що протікає через фоторезистор  $R_1$ , вираз (7) може бути записано у вигляді:

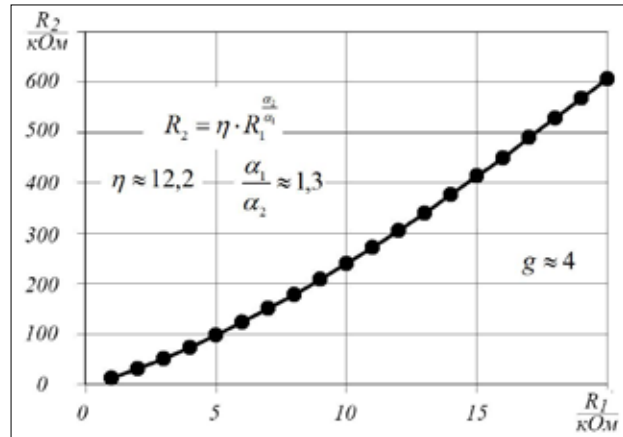


Рис. 5. Експериментально виміряна залежність  $R_2 (R_1)$

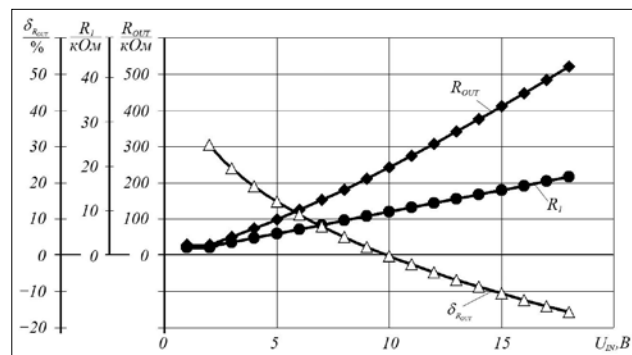


Рис. 6. Експериментально виміряна функція відгуку оптико-електронного перетворювача  $R_{OUT}(U_{IN})$  без додаткових коригувальних елементів

$$U_1 = \xi \cdot U_{IN}^\beta,$$

де  $\beta = \frac{\alpha_1}{\alpha_2}$ ,

$$\xi = \frac{R_{T1} \cdot \left( \frac{k}{R_{T2}} \right)^{\frac{\alpha_1}{\alpha_2}}}{I_1 \cdot \left( \frac{\cos \phi_1}{\cos \phi_2} \cdot g^2 \right)^{\alpha_1}} = const. \quad (8)$$

Таким чином, система керування має контролювати падіння напруги на фоторезисторі  $R_1$  та змінювати яскравість джерела оптичного випромінювання до моменту виконання умови (8).

На рис. 7 показано функціональну схему перетворювача напруга-опір, у якому скомпенсовано похибки, спричинені використанням фоторезисторів з характеристиками, що відрізняються, та різним встановленням відносно джерела оптичного випромінювання.

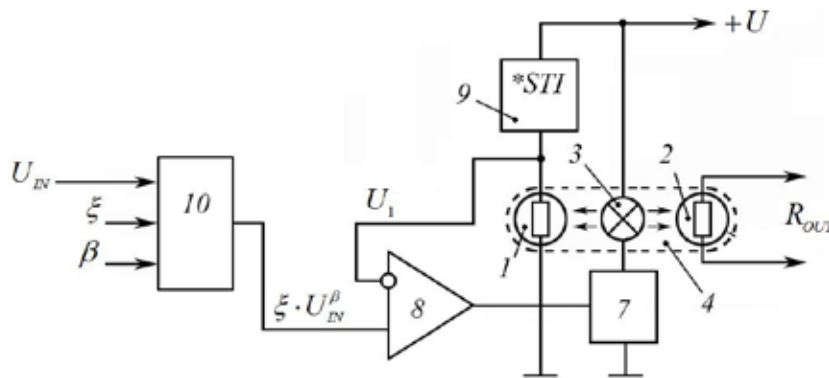


Рис. 7. Функціональна схема перетворювача напруга-опір з коригувальними елементами:

1 – фоторезистор зворотного зв’язку; 2 – вихідний фоторезистор; 3 – джерело оптичного випромінювання (лампа розжарювання); 4 – оптико-електронний блок; 7 – регулятор яскравості (у макеті використано біполярний транзистор); 8 – диференціальний підсилювач; 9 – стабілізатор струму; 10 – аналоговий обчислювач

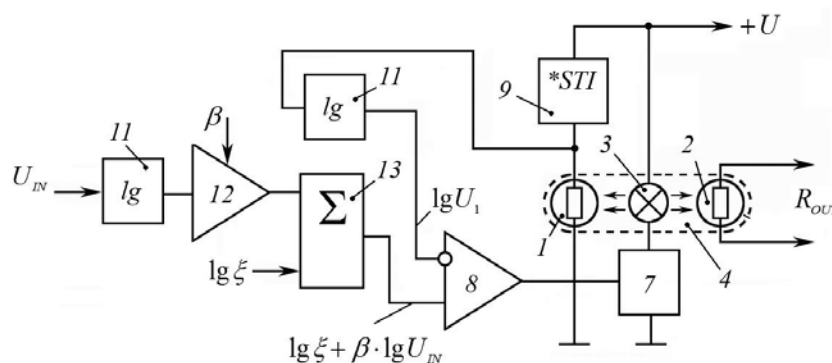


Рис. 8. Функціональна схема перетворювача напруга-опір із розв’язанням рівняння в логарифмічному вигляді:

1 – фоторезистор зворотного зв’язку; 2 – вихідний фоторезистор; 3 – джерело оптичного випромінювання (лампа розжарювання); 4 – оптико-електронний блок; 7 – регулятор яскравості; 8 – диференціальний підсилювач; 9 – стабілізатор струму; 11 – логарифмічний підсилювач; 12 – підсилювач із регульованим коефіцієнтом підсилення; 13 – підсилювач, що підсумовує

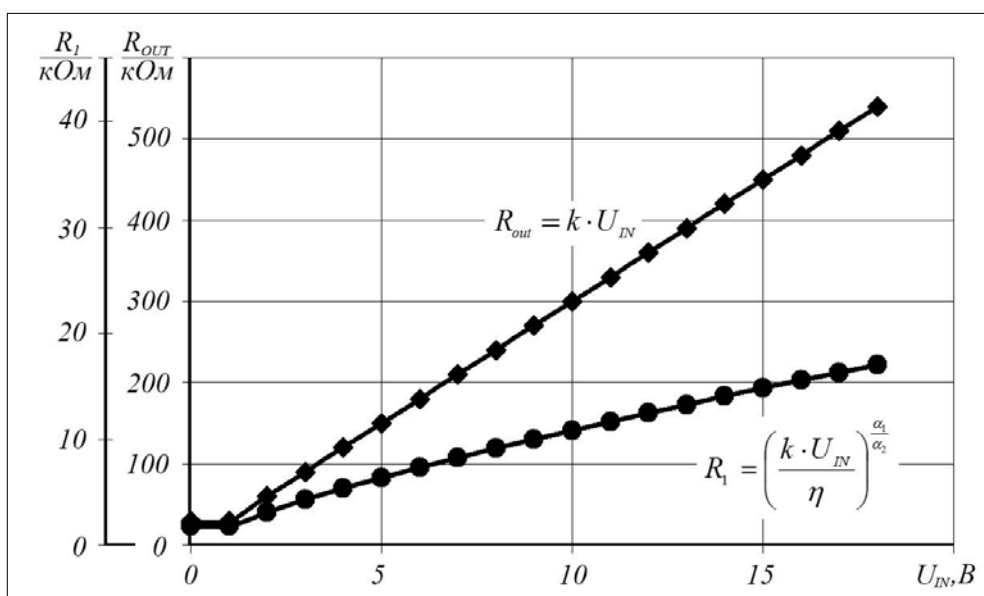


Рис. 9. Функція відгуку перетворювача напруги в опір із коригувальною поправкою

Для спрощення практичної реалізації залежності (8), вираз може бути записано в логарифмічному вигляді:

$$\lg U_1 = \lg \xi + \beta \cdot \lg U_{IN}. \quad (9)$$

Функціональну схему перетворювача напруга-опір, у якому розв'язується рівняння (9) у логарифмічному вигляді, показано на рис. 8.

Графіки, показані на рис. 9, ілюструють роботу оптико-електронного перетворювача інформаційного сигналу (напруги) в опір із введенням коригувальної поправки, що забезпечує лінійність функції відгуку перетворювача. Похибка перетворення, яка визначається насамперед точністю введення коригувальної поправки, отримана в результаті експериментальних досліджень, не перевищила 1,6 %.

Надалі планується експериментально дослідити ефективність застосування різних варіантів автоматичного обліку коригувальних поправок.

**Висновки.** У даному дослідженні:

1. Проведено оцінку впливу розкиду параметрів фоторезисторів і коректності їхнього встановлення відносно джерела оптичного випромінювання на точність роботи оптико-електронного перетворювача інформаційного сигналу у вигляді напруги в опір, призначеного для імітації потенціометричного датчика стану контрольованої системи. Показано, що використання вихідного фоторезистора з різними характеристиками та їх

різним встановленням відносно джерела оптичного випромінювання в перетворювачі напруга-опір може призвести до суттєвих похибок перетворення.

2. Для експериментального визначення взаємозв'язку величин опорів фоторезисторів, а також для оцінювання впливу розкиду параметрів фоторезисторів і коректності їхнього встановлення відносно джерела оптичного випромінювання на точність роботи перетворювача, до діючого макету перетворювача напруги в опір виготовлено оптико-електронний блок, в якому передбачено можливість оперативної заміни, переміщення і повороту вихідного фоторезистора.

3. Експериментально визначено взаємозв'язок параметрів фоторезисторів, що мають розкид характеристик і відмінності в їх установці відносно джерела оптичного випромінювання.

4. Експериментально показано, що введення поправки на схемотехнічному рівні дає змогу підвищити точність перетворювача в разі застосування в них фоторезисторів, які мають розкид параметрів і відмінності в їхньому встановленні відносно джерела оптичного випромінювання. Похибка перетворення в результаті введення коригувальної поправки за результатами експериментальних досліджень не перевищує 1,6 %. Показано, що похибка перетворення в цьому випадку визначається, насамперед, точністю введення коригувальної поправки.

#### Список літератури:

1. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування : підручник, Київ : Либідь, 2007. 656 с.
2. Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О., Крашельницький В.В. Мехатроніка : підручник, Київ : НУБіП України, 2020. 404 с.
3. Півторак Д.О., Павловський О.М., Платов І.М. Перетворювач інформаційного сигналу в опір для системи автоматичного контролю. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2021. № 6 (159). С. 9–13. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-159-6-9-13>
4. Півторак Д.О., Павловський О.М., Цибульник С.О. Експериментальні дослідження перетворювача для системи автоматичного контролю. *Вісник КПІ. Серія приладобудування*. 2022. № 63 (1). С. 58–63. [https://doi.org/10.20535/1970.63\(1\).2022.260643](https://doi.org/10.20535/1970.63(1).2022.260643)
5. Півторак Д.О., Цибульник С.О. Експериментальні дослідження характеристик перетворення оптико-електронним модулем системи автоматичного контролю. *Вісник КПІ. Серія приладобудування*. 2023. № 65 (1). С. 104–109. [https://doi.org/10.20535/1970.65\(1\).2023.283451](https://doi.org/10.20535/1970.65(1).2023.283451)
6. Кушлик Р.В., Яковлев В. Ф., Куценко Ю. М., Лисиченко М. Л., Кунденко М. П., Федюшко Ю. М. Електричне освітлення та опромінення : навч. посіб. Харків : ТОВ «Планетапрінт», 2016. 332 с.
7. LTD. GL55 Series Photoresistor – datasheet (Technical report). Senba Optical and Electronic Co., [Online]. Available: <https://blackchip.com.ua/image/catalog/pdf/fotore sustor/GL55.pdf>
8. Лавренова Д.Л., Хлистов В.М. Основи метрології та електричних вимірювань : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 123 с.

**Pivtorak D.O., Tsybulnyk S.O., Pavlovskii O.M. OPTIC-ELECTRONIC CONVERTER OF INFORMATION SIGNAL INTO RESISTANCE FOR AUTOMATIC CONTROL SYSTEM**

*To simulate the potentiometric sensor of the automatic process control system, it is proposed to use a modified optic-electronic voltage-to-resistance converter, which has a galvanic isolation of the output and a linear characteristic within a given range of output resistance change. The principle of operation of the converter is based on the change in the resistance of photoresistors under the influence of optical radiation coming from the controlled source. The optical unit of the converter contains an optical radiation source and two photoresistors simultaneously directed at it. The signal from one photoresistor is the output signal, and the signal from the second photoresistor is analysed by the control circuit, which, through the brightness regulator, synchronously changes the illumination on the photosensitive areas of the photoresistors depending on the level of the control voltage and the corrective adjustment. The use of photoresistors with different characteristics, as well as differences in their installation relative to the optical radiation source, leads to a violation of the linearity of the converter response function and a significant decrease in the accuracy of its operation. The dependences describing the relationship between the parameters of photoresistors having a scatter of characteristics and differences in their installation relative to the source of optical radiation, confirmed experimentally, are obtained in the paper. It is shown that modification of the known optic-electronic converter by introducing a correction at the circuit level allows to increase the conversion accuracy. An expression for the response function of the modified voltage-to-resistance converter is obtained. The conversion error as a result of the introduction of the corrective adjustment, according to the results of experimental studies, does not exceed 1.6 %. It is shown that the conversion error in this case is determined, first of all, by the accuracy of the introduction of the corrective adjustment.*

**Key words:** *transducer, resistance, signal, photoresistor.*