

УДК 621.384.3

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧА  
ДЛЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ***Півторак Д. О., Павловський О. М., Цибульник С. О.**Національний технічний університет України**“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ, Україна**E-mail: [p\\_diana@i.ua](mailto:p_diana@i.ua)*

*При побудові автоматичних і автоматизованих систем керування технологічними процесами широко використовуються потенціометричні сенсори. У потенціометричних сенсорах вихідним сигналом є опір, значення якого залежать від величини вхідного сигналу. В якості вхідного сигналу, зазвичай використовується напруга, струм, цифровий код, кут обертання, переміщення або інший сигнал. На практиці часто виникає завдання імітації сигналу, що надходить з вбудованого потенціометричного сенсора. Для імітації сигналу вбудованого сенсора може бути використаний додатковий потенціометричний сенсор, що дозволяє задати необхідне значення опору за допомогою зміни будь-якого зовнішнього параметра.*

*Виготовлений діючий макет перетворювача напруги в опір, що дозволяє імітувати потенціометричний датчик стану контрольованої системи, проведено експериментальне визначення його передавальної характеристики за різних температур навколишнього середовища. В основу макета покладено двоканальну схему перетворення, що включає джерело оптичного випромінювання та оптично пов'язані з ним два фоторезистори. Один фоторезистор підключений до стабілізатора струму, а напруга на ньому аналізується схемою стеження, яка змінює яскравість джерела оптичного випромінювання з урахуванням значення керуючої напруги. Передавальна характеристика перетворювача на початковій ділянці має зону нечутливості, за якою слідує прямолінійна ділянка. У межах зони нечутливості зміна вхідної напруги не спричиняє зміни вихідного опору. Величина зони нечутливості обумовлюється максимальною напругою на лампі розжарювання, що визначає її яскравість, а також мінімально можливим опором освітленого використовуваного фоторезистора. У межах прямолінійної ділянки вихідний опір перетворювача лінійно пов'язаний з величиною вхідної напруги, похибка перетворення не перевищує 0,6 % за температури навколишнього середовища 20° С. При зменшенні температури до -20° С похибка перетворення зростає до 7 %, що обумовлено відмінностями у температурних похибках використовуваних у макеті фоторезисторів.*

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

**Вступ**

Системи автоматичного керування призначені для автоматичного підтримання або зміни у часі за призначеним алгоритмом заданих параметрів технологічного процесу залежно від певних умов [1]. Водночас, розрізняють регульовані фізичні величини технологічного процесу, на які впливає система автоматичного керування і задаючі впливи, на які система автоматичного керування повинна реагувати. Задаючі впливи вимірюються за допомогою спеціальних датчиків і перетворюються на вигляд, зручний для подальшого використання системою автоматичного керування. Зазвичай перетворення величин впливів (температура, тиск, зсув тощо) здійснюються до значень електричних величин (напруга, струм, опір, індуктивність тощо). У певних технологічних процесах широко використовуються датчики-перетворювачі інформаційних параметрів в опір (наприклад, терморезистори).

Надалі дані з датчиків опору використовуються для керування технологічним процесом (наприклад, керування турбіною). Водночас, для на-

лаштування та перевірки правильності роботи самої системи автоматичного керування виникає практичне завдання імітації роботи датчиків-перетворювачів.

За відсутності жорстких вимог до забезпечення гальванічної розв'язки (відсутності електричного контакту між виходами датчика та іншими елементами системи) для імітації датчика опору використаний потенціометр, що дозволяє задати необхідний опір на відповідному вході системи автоматичного керування [2, 3]. Однак, такі змінні резистори, як правило, мають рухомий контакт і не дозволяють задавати необхідний опір за допомогою напруги без додаткової системи стеження.

Цих недоліків позбавлені цифрові потенціометри [4], керовані цифровим кодом або напругою. Однак, використання цифрових потенціометрів на практиці не завжди може бути виправдане при обмеженому часі на розробку та виробництво системи через певну складність їх застосування та постачання комплектуючих. У цьому випадку для імітації датчика з вихідним параметром у вигляді опору може бути використаний перетворювач напруги в

опір з оптико-електронним вихідним вузлом, що забезпечує необхідну гальванічну розв'язку [5].

У найпростішому випадку, такий перетворювач складається з керованого джерела оптичного випромінювання і оптично сполученого з ним фоторезистора.

Для підвищення точності перетворення значення інформаційного сигналу в опір [3] пропонується використання двох ідентичних фоторезисторів, які оптично пов'язані з джерелом оптичного випромінювання. Принцип дії такого перетворювача докладно розглянуто у [5].

Функціональна схема перетворювача напруги опір показана на рис. 1.

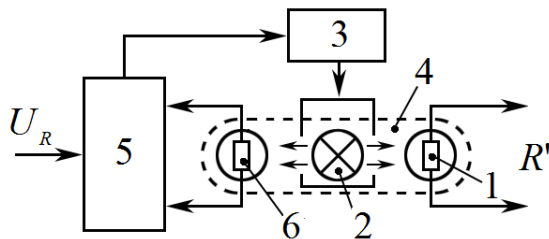


Рис. 1. Функціональна схема перетворювача напруги в опір: 1, 6 – фоторезистори; 2 – джерело оптичного випромінювання; 3 – модулятор оптичного випромінювання; 4 – оптичний блок; 5 – пристрій керування модулятором

Вхідним сигналом даного перетворювача є напруга  $U_R$ , вихідним – опір  $R'$ , що дорівнює опору фоторезистора 1.

Фоторезистори 1 та 6 оптично пов'язані з джерелом оптичного випромінювання 2 і виконані у вигляді оптичного блоку 4.

Опір фоторезисторів 1 і 6  $R_1$  і  $R_6$  залежить від значень низки зовнішніх чинників, основними з яких є освітленість їх чутливого майданчика  $E'_{FR1}$  і, відповідно,  $E'_{FR6}$  їх температура  $T_{R1}^0$  і  $T_{R6}^0$  [6]:

$$R_1 = R_1(E'_{FR1}, T_{R1}^0);$$

$$R_6 = R_6(E'_{FR6}, T_{R6}^0).$$

Водночас, освітленість чутливого майданчика фоторезисторів 1 і 6  $E'_{FR1}$  і  $E'_{FR6}$  залежить, у першу чергу, від яскравості джерела оптичного випромінювання 2  $L_{I2}$ , коефіцієнта пропускання середовища між джерелом оптичного випромінювання 2 і фоторезисторами 1  $\tau_1$  і 6  $\tau_6$ , відстані від випромінювача до чутливих майданчиків фоторезисторів  $l_{FR1}$  і  $l_{FR6}$ . Крім того, відмінності в освітленості чутливих елементів фоторезисторів будуть визначатися індикатрисою джерела оптичного випромінювання, і описуватися коефіцієнтами  $k_1$  і  $k_6$ :

$$E'_{FR1} = E'_{FR6}(L_{I2}, \tau_1, l_{FR1}, k_1);$$

$$E'_{FR6} = E'_{FR6}(L_{I2}, \tau_6, l_{FR6}, k_6).$$

Яскравість джерела оптичного випромінювання 2  $L_{I2}$  залежить від конструктивних особливостей побудови джерела, принципу його дії. При використанні джерела оптичного випромінювання лампи розжарювання, яскравість світіння визначається прикладеною напругою  $U_2$ , причому здебільшого спостерігається істотна зміна яскравості залежно від часу експлуатації  $t_2$

$$L_{I2} = L_{I2}(U_2, t_2).$$

У разі використання фоторезисторів з максимально близькими параметрами з установкою їх таким чином, щоб освітленість на їх чутливих майданчиках була практично однаковою і змінювалася пропорційно зміні яскравості світіння джерела оптичного випромінювання 2 ( $l_{FR1} = l_{FR6} = const, k_1 = k_6 = const, \tau_1 = \tau_2 = const$ ), значення опорів 1 і 6 будуть практично однаковими, що визначають вихідний опір перетворювача

$$R' = R_1 \approx R_6 = R_6(U_2, T_{R6}^0, t_2).$$

Таким чином, використання для побудови перетворювача керованого світловим потоком фоторезистора дозволяє побудувати імітатор вбудованого сигналу потенціометричного датчика системи керування, в якому забезпечена гальванічна розв'язка виходів від інших елементів системи. При цьому необхідне значення опору може бути задане шляхом зміни яскравості джерела оптичного випромінювання.

Опір фоторезистора 1 є вихідним сигналом перетворювача, а опір фоторезистора 6 вимірюється схемою стеження пристрою керування модулятором 5, яка, впливаючи на модулятор 3, змінює освітленість на фоторезисторах до досягнення опору заданої величини. Вибрана схема перетворювача інформаційного сигналу в опір для системи автоматичного контролю імовірно має низьку температурну похибку, оскільки зміна опору обох фоторезисторів, викликаних зміною температури навколишнього середовища, буде відбуватися синхронно і автоматично компенсуватися схемою стеження. Аналогічно системою стеження буде компенсовано температурні зміни яскравості джерела оптичного випромінювання.

Необхідність виготовлення макета перетворювача виникла у зв'язку з появою практичної задачі імітації температурного датчика (терморезистора), встановленого всередині промислового виробу, дані з якого використовувалися для керування режимами цього виробу. У свою чергу, імітація терморезистора була потрібна для оцінки правильності роботи самої системи керування, оцінки її стійкості та стійкості в умовах впливу зовнішніх механічних та кліматичних чинників.

### Постановка задачі

Метою даної статті є опис результатів експериментальних досліджень макета перетворювача інформаційного сигналу у вигляді напруги в опір, що дозволяє імітувати потенціометричні датчики стану контрольованої системи.

### Устрій макету

При розробці макету закладалися вимоги виготовлення потенціометричного перетворювача напруги в опір, що забезпечує лінійну зміну вихідного опору в межах  $R' \approx 3,5 - 6,5 \text{ кОм}$  залежно від вхідної напруги  $U_R$ .

За основу була обрана схема побудови перетворювача, запропонована в [5] і докладно описана в [3].

Функціональна схема макету пропонованого перетворювача напруга-опір наведена на рис. 2.

У макеті перетворювача як джерело оптичного випромінювання 2 використовується лампа розжарювання, яскравість світіння якої залежить від прикладеної напруги. Операційний підсилювач 9 разом зі стабілізатором струму 7 складають пристрій керування модулятором.

Після надходження у схему напруги  $+U$  від джерела живлення, напруга на фоторезисторі 6 стає рівною:

$$U_{R_6} = I_{ST} \cdot R_{R_6},$$

де  $U_{R_6}$  – напруга на фоторезисторі 6,  $I_{ST}$  – струм через фоторезистор 6, що задається стабілізатором струму 7.

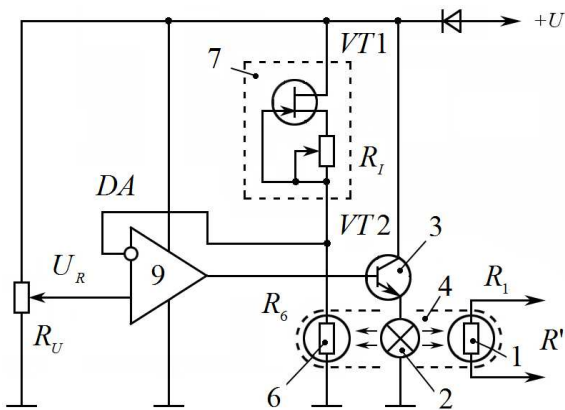


Рис. 2. Функціональна схема макета перетворювача напруги в опір: 1, 6 – фоторезистори; 2 – джерело оптичного випромінювання (лампа розжарювання); 3 – модулятор оптичного випромінювання у вигляді транзистора; 4 – оптичний блок; 7 – стабілізатор струму, 9 – операційний підсилювач

Дана напруга надходить на інвертуючий вхід операційного підсилювача 9, де порівнюється з вхідною керуючою напругою  $U_R$  на його прямому вході. У разі, якщо напруга  $U_{R_6} > U_R$ , напруга на виході операційного підсилювача 9 збільшиться,

збільшивши тим струм, що протікає через транзистор 3 і напруга на джерелі оптичного випромінювання 2 і, як наслідок, його яскравість. Збільшення яскравості джерела оптичного випромінювання 2 призведе до збільшення освітленості чутливих майданчиків фоторезисторів 1 та 6 та зменшення їх опору. У свою чергу це призведе до зниження напруги  $U_{R_6}$  до моменту виконання рівності  $U_{R_6} \approx U_R$ .

Таким чином, запропонована схема перетворювача дозволяє отримати необхідне значення опору фоторезистора, пропорційне значенню керуючої напруги відповідно до залежності:

$$R' = R_1 = R_6 = \frac{U_R}{I_{ST}}.$$

У зв'язку з відносно вузьким діапазоном зміни вихідного опору датчика, який повинен імітувати виготовлений макет, в якості стабілізатора струму обрана найпростіша схема на польовому транзисторі VT1 [7]. Разом з тим, для можливості експериментального дослідження перетворювача в ширшому діапазоні зміни вихідного опору, до схеми додано змінний резистор  $R_1$ , що дозволяє здійснювати регулювання струму через фоторезистор 6 з метою підтримки його на заданому рівні.

Для зміни вхідної напруги  $U_R$  використовувався багатооборотний змінний резистор  $R_U$ . У схемі використано однополярне живлення операційного підсилювача 9. Транзистор VT2 включений за схемою емітерного повторювача [8], як навантаження якого підключена лампа розжарювання 2.

Для проведення експериментів обрані недорогі фоторезистори GL5537 [9], а в якості джерела оптичного випромінювання лампа розжарювання з номінальною напругою 24 В. Лампа розжарювання та оптично пов'язані з нею фоторезистори виконані у вигляді окремого оптичного блоку у світлонепроникному кожусі. Перед монтажем елементів проводився попередній підбір пари фоторезисторів з максимально схожими характеристиками. Розкид характеристик фоторезисторів не перевищував 0,5 %.

Обидва фоторезистори встановлені з двох боків колби лампи на однаковій відстані від неї. Зовнішній вигляд оптичного блоку зі знятим світлонепроникним кожухом показано на рис. 3, зовнішній електронний блок макета – на рис. 4.

Для підключення до плати електронного блоку джерела живлення та оптичного блоку, на ній встановлені клемні роз'єми типу PZT. На аналогічні роз'єми так само виведені контрольні точки для підключення вимірювальних приладів, що дозволяють контролювати вхідну напругу  $U_R$ , струм через фоторезистор 6  $I_{ST}$ , напругу на фоторезисторі 6, напругу на лампі розжарювання 2 і опір фоторезистора 1.

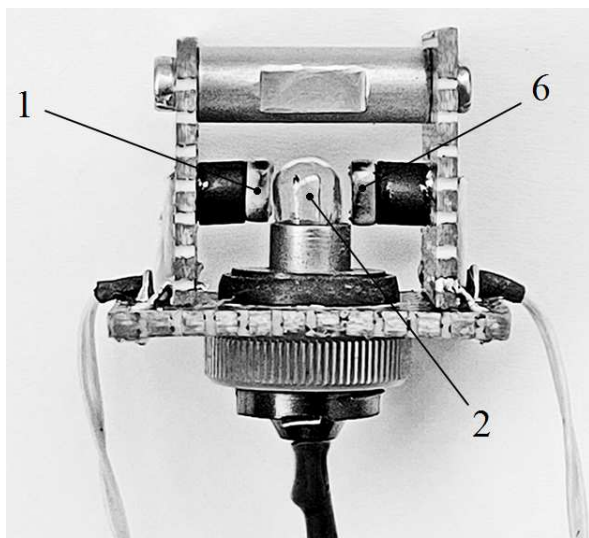


Рис. 3. Фотографія оптичного блоку перетворювача: 1, 6 – фоторезистори; 2 – лампа розжарювання

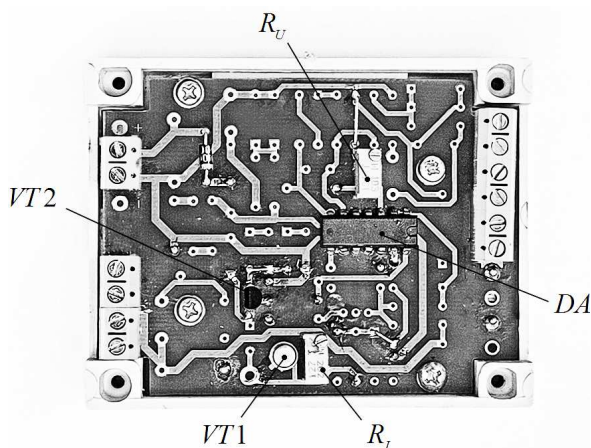


Рис. 4. Фотографія плати електронного блоку макета

Для вибору номіналів елементів макету визначена світлова характеристика фоторезистора 6  $R_6(E_{FR6})$  представлена на рис. 5. Відмінності характеристик  $R_6(E_{FR6})$  і  $R_1(E_{FR1})$  не перевищили 0,5% у всьому діапазоні зміни освітленості при температурі навколишнього середовища  $T^0 = 20^\circ C$ . Для зняття світлової характеристики використовувався фотометричний шар діаметром 300 мм з вбудованою кільцевою лампою підсвічування, що має колірну температуру  $2700^\circ K$  і десять ступенів зміни яскравості. Для вимірювання освітленості у вікні фотометричної кулі використовувався люксметр *MS6610 Mastech*. Для вимірювання температури навколишнього середовища, опору фоторезисторів та інших електричних параметрів елементів макету застосовувалися універсальні вимірювальні прилади *M890G* та *MV-61 Mastech*.

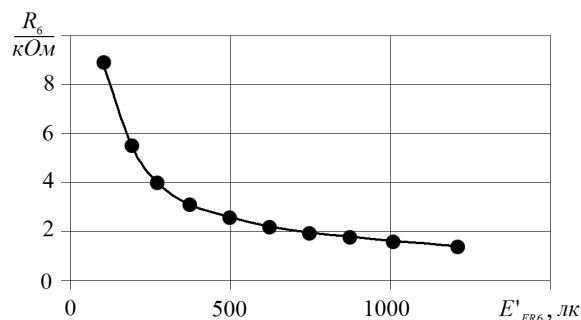


Рис. 5. Експериментально визначена світлова характеристика використаних в макеті фоторезисторів

Залежність опору фоторезисторів оптичного блоку від напруги на лампі розжарювання показано на рис. 6. Для максимального збігу залежностей  $R_1(U_2)$  та  $R_6(U_2)$  виникла необхідність додаткового регулювання положення лампи розжарювання відносно фоторезисторів 1 і 6.

Подальші експериментальні дослідження зводилися до визначення залежності  $R_1(U_R)$  за температури навколишнього середовища в районі оптичного блоку  $T^0 = 20^\circ C$  та температури  $T^0 = -20^\circ C$ .

Отримані залежності  $R_1(U_R)$  мали явно виражену зону нечутливості, в межах якої зміна вхідної напруги не спричиняла зміну вихідного опору і лінійну ділянку, на якій значення вихідного опір змінювалося практично лінійно залежно від величини вхідної напруги.

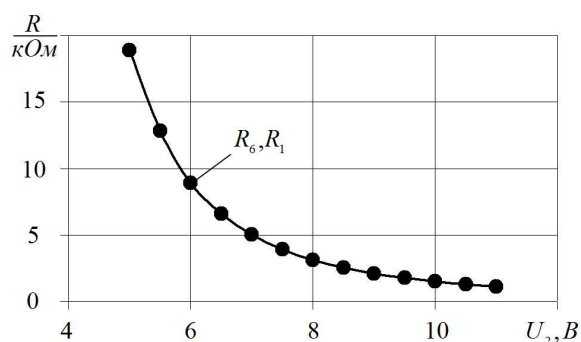


Рис. 6. Експериментально отримана залежність опору фоторезисторів оптичного блоку від напруги на лампі розжарювання

У межах лінійної ділянки проводилася апроксимація експериментально отриманих даних лінійним виразом виду  $R_1^* = a \cdot U_R$  і  $R_1^* = a \cdot U_R + b$ , де  $a$  та  $b$  – коефіцієнти апроксимації.

У подальшому розраховувалася похибка перетворення для різних значень  $U_R$  [10]:

$$\delta = \frac{R_1^* - R_1}{R_1^*} 100 \% .$$

Результати експериментальних досліджень макета перетворювача для апроксимації в межах прямолінійної ділянки виразом виду  $R_1^* = a \cdot U_R$  (за умови  $R_1^*(0) = 0$ ) представлені на рис. 7, а апроксимації в межах прямолінійної ділянки виразом виду  $R_1^* = a \cdot U_R + b$  – на рис. 8.

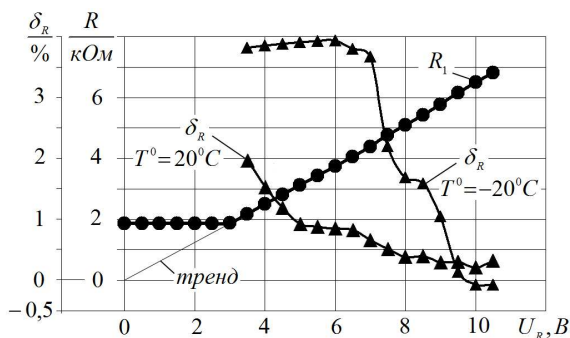


Рис. 7. Експериментально отримані залежності вихідного опору перетворювача від величини вхідної напруги  $R_1(U_R)$  та похибки перетворення  $\delta(U_R)$  щодо рівняння апроксимації  $R_1 = 0,6492 \cdot U_R$  за різної температури

Мінімальна похибка перетворення (трохи більше 0,6 %) має місце при апроксимації прямолінійної ділянки передавальної характеристики рівнянням виду  $R_1^* = a \cdot U_R + b$ , де  $a = 0,6561$ ,  $b = -0,0538$ .

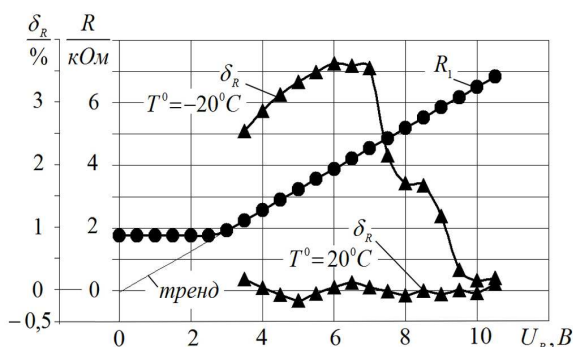


Рис. 8. Залежності вихідного опору перетворювача від величини вхідної напруги  $R_1(U_R)$  та похибки перетворення  $\delta(U_R)$  щодо рівняння апроксимації  $R_1 = 0,6561 \cdot U_R - 0,0538$  за різної температури

Надалі планується оцінити вплив розкиду параметрів фоторезисторів на точність роботи перетворювача, визначити схемотехнічні шляхи її підвищення, а також розглянути інші схеми керування джерелом оптичного випромінювання, що дозволяють розширити динамічний діапазон перетворювача.

## Висновки

Отже, проведені дослідження довели наступне.

1. Виготовлений макет перетворювача напруги в опір, що дозволяє імітувати потенціометричний датчик стану контрольованої системи.

2. Передавальна характеристика перетворювача на початковій ділянці має зону нечутливості, за якою слідує лінійна ділянка. У межах зони нечутливості зміна вхідної напруги не спричиняє зміни вихідного опору. Величина зони нечутливості обумовлюється максимальною напругою на лампі розжарювання, що визначає її яскравість, а також мінімально можливим опором освітленого використовуваного фоторезистора.

3. У межах прямолінійної ділянки вихідний опір перетворювача лінійно пов'язаний з величиною вхідної напруги, похибка перетворення не перевищує 0,6 % за температури навколишнього середовища 20° С. При зниженні температури до -20° С похибка перетворення зростає до 7 %, що обумовлено відмінностями в температурних похибках використовуваних у макеті фоторезисторів.

4. Якість роботи перетворювача визначається, насамперед, відмінністю характеристик використовуваних фоторезисторів.

## Література

- [1] М. Г. Попович, О. В. Ковальчук, *Теорія автоматичного керування*: підручник, Київ, Україна: Либідь, 2007.
- [2] А. С. Ишков, А. И. Цыганков, «Повышение качества и надежности прецизионных потенциометров», *Труды Международного симпозиума «Надежность и качество»*, том 2, с. 136-138, 2016.
- [3] Д. О. Півторак, О. М. Павловський, І. М. Платов, «Перетворювач інформаційного сигналу в опір для системи автоматичного контролю», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 6 (159), с. 9-13, 2021.
- [4] Digital Potentiometer Family Selection Guide. AD5207 - 2-channel 256-position digital potentiometer – datasheet (Technical report). Analog Devices, 2001. [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5207.pdf>
- [5] О. М. Павловський, Д. О. Півторак, І. М. Платов, «Потенціометричний датчик автоматичної системи керування», *Патент України G05B 19/07 (2006.1), G01L 5/163 (2020.01) №148640*, 01.09.2021.
- [6] Т. П. Юртаева, А. В. Рудин, Д. А. Сабурова, В. Ю. Серсков, О. М. Денисова, А. Е. Журина, «Исследование температурной зависимости полупроводниковых фоторезисторов», *Международный научно-исследовательский журнал*, № 12 (78), часть 1, с. 57-62, 2018.
- [7] P. Horowitz, W. Hill, *The Art of Electronics*, Cambridge: Cambridge University Press, 1980.

- [8] Tietze U., Schenk Ch. *Halbleiter Schaltungstechnik*, Achte überarbeitete Auflage, Berlin: Springer, 2002
- [9] LTD. GL55 Series Photoresistor – datasheet (Technical report). Senba Optical and Electronic Co., [Online]. Available: <https://blackchip.com.ua/image/catalog/pdf/fotoreistor/GL55.pdf>
- [10] Д. Л. Лавренова, В. М. Хлистов, *Основи метрології та електричних вимірювань*: навч. посіб, Київ, Україна: НТУУ «КПІ», 2016.

**D. O. Pivtorak, O. M. Pavlovsky, S. O. Tsybulnyk**

*National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine*  
**EXPERIMENTAL STUDIES OF INFORMATION SIGNAL-TO-RESISTANCE CONVERTER FOR AUTOMATIC CONTROL SYSTEM**

Potentiometric sensors are widely used in the construction of automatic and automated process control systems. In potentiometric sensors, resistance is the output signal and its magnitudes depend on the magnitude of the input signal. voltage, current, digital code, angle of rotation, displacement or other signal is usually used as the input signal. In practice, the task of simulating of the signal which coming from the built-in potentiometric sensor is often appeared. An additional potentiometric sensor can be used to simulate the signal of the built-in sensor that allows setting the required resistance magnitude by changing any external parameter.

The model of the voltage-to-resistance converter is made. This model allows simulating the potentiometric state sensor of the controlled system. The experimental determination of its transfer characteristic at different ambient temperatures is carried out. This model is based on a two-channel conversion circuit, which includes a source of optical radiation and two photoresistors optically connected to it. One of photoresistors is connected to a current stabilizer, while the voltage on it is analyzed by a tracking circuit that changes the brightness of the optical radiation source according to the magnitude of the control voltage. The transfer characteristic of the converter in the initial section has an insensitivity zone, following by a rectilinear section. Within the insensitivity zone, a change in input voltage does not change the output resistance. The magnitude of the insensitivity zone is determined by the maximum voltage on the incandescent lamp that determines its brightness, as well as the minimum possible resistance of the using illuminated photoresistor. Within the rectilinear section, the output resistance of the converter is linearly related to the magnitude of the input voltage. The conversion error does not exceed 0.6 % at an ambient temperature of 20° C. When the temperature decreases to -20° C, the conversion error increases to 7 %, which is due to differences in temperature errors of the photoresistors using in the model.

**Keywords:** converter; signal; resistance; photoresistor.

*Надійшла до редакції  
25 квітня 2022 року*

*Рецензовано  
16 травня 2022 року*

УДК 621.121

## ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ВИТРАТИ ЗІ СКЛАДНОЮ ТРАЄКТОРІЄЮ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПРОМЕНЮ

*Писарець А. В., Драчук О. О.*

*Національний технічний університет України*

*«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна*

*E-mail: [anna.v@ukr.net](mailto:anna.v@ukr.net), [lesyaartemenko@gmail.com](mailto:lesyaartemenko@gmail.com)*

*Для вимірювання витрат паливно-енергетичних ресурсів застосовуються різні методи, що зумовлюють широку номенклатуру вимірювальних приладів. Через забезпечення високої точності вимірювання, широкого діапазону вимірюваних витрат, відсутність додаткових витрат напору и простоту конструкції, широкого застосування у вимірювальній практиці набувають прилади, що базуються на ультразвукових методах вимірювання. Такі прилади легко інтегруються до автоматизованих систем збору і передачі інформації. Суттєвою*