

УДК 621.384.3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕТВОРЮВАННЯ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИМ МОДУЛЕМ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ

Півторак Д. О., Цибульник С. О.

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ, Україна

E-mail: p.diana@i.ua

Імітатори датчиків стану середовища використовуються для налаштування та контролю працездатності систем автоматичного керування технічними процесами. У ряді випадків в якості імітатора потенціометричних датчиків зручно використовувати перетворювач напруга-опір з оптико-електронним вихідним модулем на основі керованого фоторезистора.

Розроблено оптико-електронний перетворювач напруги в опір, що має гальванічну розв'язку виходу і лінійну характеристику в заданому діапазоні зміни вихідного опору. Розроблений перетворювач дозволяє довільно задавати кутовий та вільний коефіцієнти лінійного рівняння, що описує функцію відгуку перетворювача, та коректно імітувати роботу потенціометричного датчика стану контрольованого параметра. Розроблено та виготовлено діючий макет перетворювача, проведено експериментальне визначення його функції відгуку для різних значень вільного коефіцієнта, напруги живлення та різних варіантів схемотехнічного виконання оптико-електронного модуля.

Принцип дії перетворювача ґрунтується на зміні опору фоторезисторів під впливом оптичного випромінювання, що йде від керованого джерела. Макет перетворювача складається з оптичного та електронного блоків. В оптичному блоці встановлені джерело оптичного випромінювання та два одночасно спрямовані на нього фоторезистори. Сигнал з одного фоторезистора є вихідним, а сигнал з другого фоторезистора аналізується схемою керування, яка через регулятор яскравості синхронно змінює освітленість на світлочутливих ділянках фоторезисторів відповідно до рівня напруги керуючого та корисуючого сигналів. Експериментально визначена функція відгуку перетворювача на початковій ділянці має нелінійність у зоні низьких вхідних напруг, що визначається, насамперед, обмеженням яскравості світіння лампи та залежить від схеми її вмикання. Зона нелінійності в досліджуваному перетворювачі може бути суттєво зменшена внаслідок збільшення величини напруги живлення. У межах заданого діапазону зміни вихідного опору прямолінійної ділянки функції відгуку, вихідний опір перетворювача лінійно пов'язаний з величиною вхідної напруги, за результатами експериментальних вимірів за нормальних лабораторних умов, похибка перетворення не перевищила 0,3 %.

Ключові слова: перетворювач; сигнал; опір; фоторезистор.

Вступ

Для коректної роботи систем автоматичного керування технологічними процесами потрібна об'єктивна інформація про параметри впливу, на які дана система повинна реагувати, змінюючи регульовані фізичні величини процесу. Ця інформація отримується за допомогою спеціальних датчиків, які перетворюють величину вимірюваного впливу (освітленість, вологість, температура тощо) у вигляд, який використовується конкретною системою автоматичного керування (струм, напруга, цифровий код тощо). У деяких технологічних процесах широко використовуються потенціометричні датчики, які перетворюють значення вхідних впливів (кут повороту, тиск, температура) на опір.

У свою чергу, сама система автоматичного керування потребує налаштування та періодичного контролю працездатності. Зазвичай для цього використовуються імітатори датчиків, що подають в систему сигнали, необхідні для налаштування або

контролю.

Для імітації роботи потенціометричних датчиків широко використовують потенціометри з рухомих контактом або цифрові потенціометри, недоліки яких описані в роботах [1, 2]. У них запропоновано в якості імітатора потенціометричного датчика використовувати перетворювач напруга-опір з оптико-електронним виходом. Запропонований перетворювач у заданих межах має лінійну функцію відгуку та гальванічну розв'язку виходу відносно інших елементів схеми.

Основою перетворювача є джерело оптичного випромінювання з дистанційно регульованими параметрами та фоторезистор, сигнал з якого надходить у систему автоматичного керування. З метою підвищення точності роботи перетворювача в схему перетворювача введено другий фоторезистор, який використовується для керування яскравістю джерела оптичного випромінювання [3].

Структурну схему перетворювача інформ-

ційного сигналу у вигляді напруги в опір показано на рис. 1.

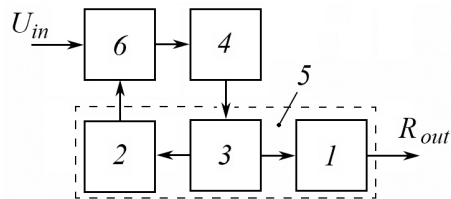


Рис. 1. Структурна схема перетворювача інформаційного сигналу у вигляді напруги в опір, де: 1 – вихідний фоторезистор, 2 – фоторезистор зворотного зв'язку, 3 – джерело оптичного випромінювання, 4 – регулятор яскравості; 5 – оптико-електронний блок; 6 – схема керування

Вихідним сигналом перетворювача є опір R_{out} , величина якого визначається величиною напруги на його вході U_{in} . Принцип дії перетворювача заснований на зміні опору фоторезистора 1 під дією оптичного випромінювання від джерела 3. У схемі використані два фоторезистори, що мають близькі характеристики: вимірювальний фоторезистор 1 і фоторезистор зворотного зв'язку 2. Фоторезистори встановлені таким чином, щоб джерело оптичного випромінювання 3 створювало на світлочутливих ділянках фоторезисторів однакову освітленість. Сигнал з фоторезистора 2 надходить у схему керування 6, в якій порівнюється із заданим значенням, що визначається величиною вхідної напруги U_{in} . Сигнал неузгодженості подається в регулятор яскравості 4, який змінює параметри світлового потоку джерела оптичного випромінювання 3, синхронно змінюючи тим самим освітленість на світлочутливих ділянках фоторезисторів 1 і 2 до моменту усунення неузгодженості.

У роботі [2] описані результати експериментальних досліджень макета даного перетворювача напруги в опір, отримані сімейства залежностей (функції відгуку перетворювача) для різних температур довкілля. Показано, що функція відгуку перетворювача в заданих межах зміни вихідного параметра є лінійною і описується рівнянням:

$$R_{out}(U_{in}) = a \cdot U_{in} + b,$$

де a і b – кутовий та вільний коефіцієнти лінійного рівняння.

Показано, що вільний коефіцієнт b у досліджуваному перетворювачі не враховується, що призводить до додаткових похибок перетворення. Разом з тим, даний коефіцієнт може бути легко врахований введенням у схему перетворювача корегувального вузла.

Крім того, в області низьких вхідних напруг функція відгуку досліджуваного в роботі [2] перетворювача має зону нечутливості, яку можна суттєво зменшити схемотехнічними змінами вузла

керування яскравістю джерела оптичного випромінювання.

Постановка задачі

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

Опис макету

Розробка та виготовлення макета оптико-електронного потенціометричного перетворювача напруги в опір зводилися до схемотехнічного вдосконалення макета, докладно описаного у статті [2].

Виходячи з параметрів реального температурного датчика, що моделюється розроблюваним перетворювачем, основною вимогою до макету, що проектується, було отримання лінійної залежності вихідного опору від вхідної напруги, що описується залежністю:

$$R_{out} = a \cdot U_{in} + b, \quad (1)$$

при можливій зміні вихідного опору в діапазоні $2,0 \text{ кОм} < R_{out} < 7,0 \text{ кОм}$ та вільного коефіцієнта b в межах $-1,0 \leq b \leq +0,3$.

Функціональну схему макета пропонованого перетворювача напруга-опір наведено на рис. 2.

Удосконалення полягає у введенні в схему перетворювача диференціального підсилювача 8, що спільно з потенціометром R_5 надає можливість вводити коригувальну поправку в функцію відгуку перетворювача. Крім того, поряд з наявним оптико-електронним модулем 11, для керування яскравістю лампи, в якому використана класична схема емітерного повторювача [4, 5], в макеті застосований оптико-електронний модуль 10, в якому лампа підключена в ланцюг колектора підсилювача зі спільним емітером [6, 7].

Фоторезистор зворотного зв'язку 2 (R_2) підключений до джерела живлення через стабілізатор струму 6. Резистор R_1 призначений для коригування струму, що протікає через фоторезистор I_{R_2} , водночас, напруга на фоторезисторі R_2 визначається виразом:

$$U_{R_2} = I_{R_2} \cdot R_2.$$

Напруга U_{R_2} надходить на прямий вхід диференціального підсилювача 8, що має одиничний коефіцієнт підсилення, на віднімаючий вхід якого подається напруга коригуючої поправки U_S , що знімається з рухомого контакту потенціометра R_5 . У цьому випадку напруга U_8 на виході диференціального підсилювача 8 (при коефіцієнті посилення, який дорівнює одиниці):

$$U_8 = U_{R_2} - U_S = I_{R_2} \cdot R_2 - U_S.$$

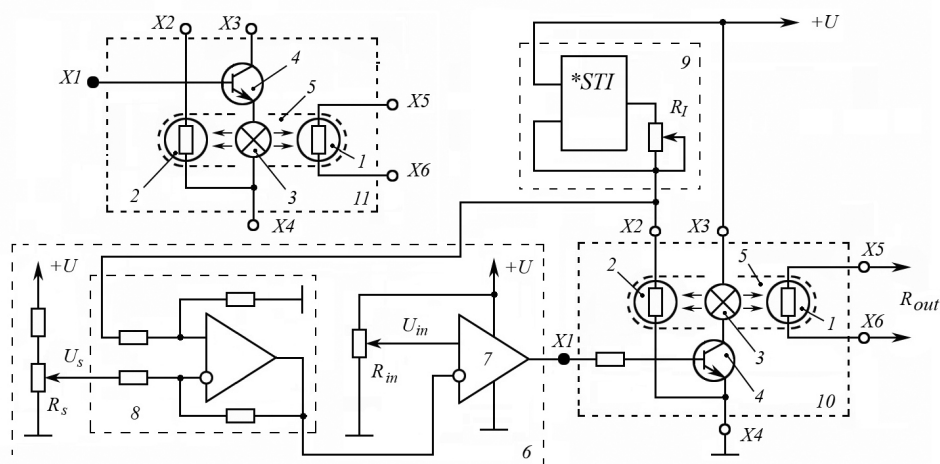


Рис. 2. Функціональна схема макета перетворювача напруги в опір, де: 1 – вимірювальний фоторезистор, 2 – фоторезистор зворотного зв'язку, 3 – джерело оптичного випромінювання (лампа розжарювання), 4 – регулятор яркості джерела оптичного випромінювання у вигляді біполярного транзистора, 5 – оптичний блок, 6 – схема керування, 7 – операційний підсилювач, 8 – диференціальний підсилювач, 9 – стабілізатор струму, 10 – оптико-електронний модуль на основі підсилювача зі спільним емітером, 11 – оптико-електронний модуль на основі емітерного повторювача

Дана напруга надходить на інвертуючий вхід операційного підсилювача 7, на якому вона порівнюється з вхідною керуючою напругою перетворювача U_m . Залежно від цієї різниці, відбувається керування параметрами транзистора 4, в результаті чого змінюється напруга на лампі 3. Якщо вхідна керуюча напруга виявляється менше напруги U_8 (що має місце при підвищеному значенні опору R_2), це призводить до підвищення напруги на виході операційного підсилювача, збільшення струму колектора транзистора 4 і, як наслідок, збільшення яркості лампи 3. Зміна яркості лампи призводить до зміни освітленості світлочутливих ділянок фоторезисторів 1 і 2 та, як наслідок, до одночасної зміни їх опорів до моменту виконання рівності:

$$I_{R2} \cdot R_2 - U_s \approx U_m,$$

а значення вихідного опору перетворювача визначатиметься виразом:

$$R_{out} = R_1 \approx R_2 \approx \frac{U_m}{I_{R2}} + \frac{U_s}{I_{R2}}.$$

Таким чином, запропонована модифікована схема перетворювача дозволяє отримати необхідне значення опору фоторезистора, що пропорційне значенню керуючої напруги. Водночас, внаслідок зміни коригуючої складової U_s з'являється можливість домогтися нульового або будь-якого необхідного значення вільного коефіцієнта лінійної частини функції відгуку перетворювача.

Вхідна керуюча напруга U_m та коригувальна

поправка U_s задавалися за допомогою багатооборотних потенціометрів, відповідно, R_m і R_s , встановлених безпосередньо на монтажній платі макета перетворювача. Крім того, у перетворювачі використана мікросхема LM224N (чотири операційні підсилювачі в одному корпусі) [8]. Ще один операційний підсилювач (на схемі не показаний) використовувався для масштабування керуючої напруги (для обліку кутового коефіцієнта a функції відгуку перетворювача (1)) і ще один – у схемі стабілізатора струму. Усі операційні підсилювачі включені за однополярною схемою живлення.

В оптичному блоці макета застосовані фоторезистори GL5537 [9], а в якості джерела оптичного випромінювання 3 використана літакова лампа розжарювання СМ 28-2-1 ВА7s/11, яркості світіння якої залежить від прикладеної напруги.

Для проведення експериментів використовувався оптичний блок, аналогічний описаному в [2]. Розкид параметрів попередньо відібраних фоторезисторів не перевищував 0,5 %.

На монтажній платі макета перетворювача встановлені роз'ємні з'єднувачі PZT, призначені для сполучення з оптичним блоком і підключення до контрольних точок вимірювальних приладів, що дозволяють проводити виміри таких параметрів, як напруга живлення $+U$, вхідна керуюча напруга U_m , напруга коригувальної поправки U_s , вихідний опір R_{out} , напруга на фоторезисторі 2, напруга на лампі 3, а також струм I_{R2} , що протікає через фоторезистор 2.

Виходячи з параметрів фоторезисторів та досвіду експлуатації перетворювача напруга-опір,

описаного в [2], для проведення всіх вимірів, струм через фоторезистор 2 обраний рівним $I_{R2} = 1,1 \text{ mA}$.

Фотографія монтажної плати макета перетворювача напруга опір показана на рис. 3.

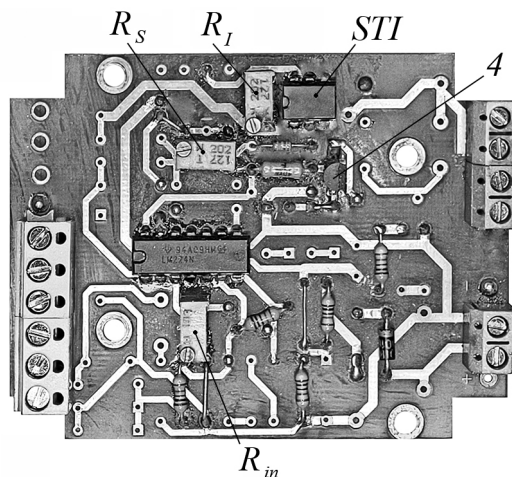


Рис. 3. Фотографія плати електронного блока макета

Експериментальні дослідження полягали у визначенні функції відгуку макета пропонованого перетворювача $R_{out}(U_{in})$ при різних значеннях коригувальної поправки U_s та напруги живлення $+U$ за нормальних лабораторних умов.

Графіки експериментально отриманих залежностей $R_{out}(U_{in})$ при крайніх заданих значеннях напруги коригувальної поправки $U_s = 0 \text{ B}$ та $U_s = 0,6 \text{ B}$ для перетворювача, який оснащений оптико-електронним модулем 10 (з підсилювачем зі спільним емітером), наведені на рис. 4.

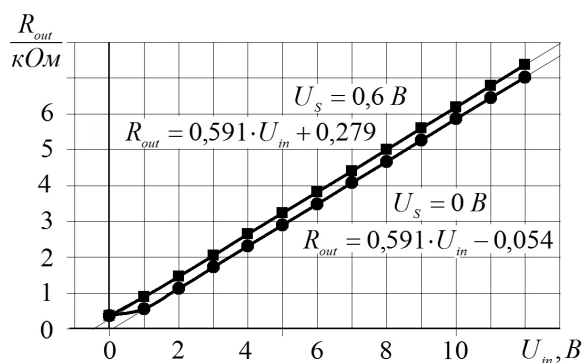


Рис. 4. Експериментально отримані функції відгуку перетворювача з оптико-електронним модулем 10 на базі підсилювача зі спільним емітером

Графіки демонструють лінійну залежність вихідного параметра перетворювача (опір R_{out}) від величини керуючої вхідної напруги U_{in} , водночас,

значення вільного коефіцієнта b визначається величиною напруги коригувальної поправки U_s .

Експериментально отримана залежність $b(U_s)$ представлена на рис. 5.

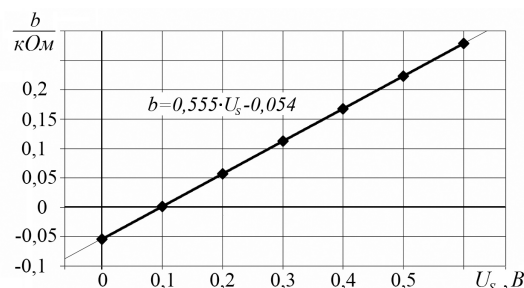


Рис. 5. Експериментально отримана залежність вільного коефіцієнта лінійного апроксимуючого виразу b від величини напруги коригувальної поправки U_s

Експериментально отримана залежність $b(U_s)$ у заданих межах зміни U_s апроксимується лінійним виразом $b = 0,555 \cdot U_s - 0,054$. Таким чином, вільний коефіцієнт b прийматиме нульове значення за величини $U_s \approx 0,1 \text{ B}$. У цьому випадку лінійна частина функції відгуку досліджуваного перетворювача описується виразом

$$R_{out} = a \cdot U_{in},$$

де $a = 0,591 \text{ mA}$.

На рис. 6 представлені графіки експериментально отриманих залежностей $R_{out}(U_{in})$ при $U_s = 0,1 \text{ B}$ для перетворювача, який оснащено оптико-електронним модулем 10 (з підсилювачем зі спільним емітером) і перетворювача з модулем 11 (з емітерним повторювачем) і напрузі живлення $U = 18 \text{ B}$, а на рис. 7 аналогічні залежності для напруги живлення $U = 12 \text{ B}$.

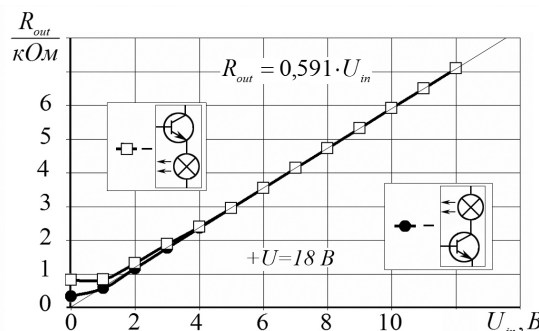


Рис. 6. Експериментально отримані функції відгуку перетворювача з оптико-електронним модулем 10 на базі підсилювача зі спільним емітером та з оптико-електронним модулем 11 на базі емітерного повторювача при напрузі живлення 18 вольт

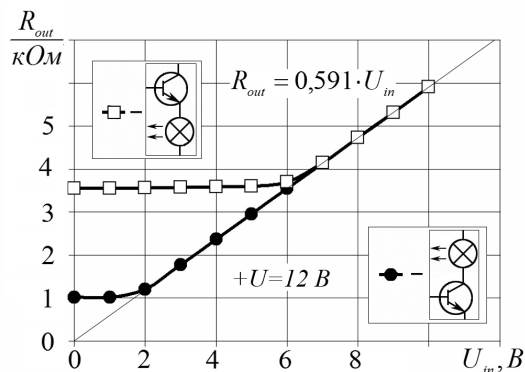


Рис. 7. Експериментально отримані функції відгуку перетворювача з оптико-електронним модулем 10 на базі підсилювача зі спільним емітером та з оптико-електронним модулем 11 на базі емітерного повторювача при напрузі живлення 12 вольт

Отримані залежності $R_{out}(U_{in})$ мають нелінійність в зоні низьких вхідних напруг, яка визначається, в першу чергу, обмеженням яскравості світіння лампи і залежить від схеми включення лампи. Зона нелінійності в досліджуваному перетворювачі може бути суттєво зменшена збільшенням величини напруги живлення. Отримані залежності свідчать про переваги використання перетворювача оптико-електронного модуля з підсилювачем зі спільним емітером перед використанням оптико-електронного модуля з емітерним повторювачем.

Похибка роботи макета перетворювача напруги в опір розраховувалася за формулою [10]:

$$\delta_{R_{out}}(U_{in}) = \frac{R_{out}^*(U_{in}) - R_{out}(U_{in})}{R_{out}^*(U_{in})} \cdot 100\%,$$

де $R_{out}^*(U_{in})$ - лінія тренда рівняння апроксимації лінійної ділянки функції відгуку перетворювача, яка розраховується за формулою

$$R_{out} = 0,591 \cdot U_{in},$$

$R_{out}(U_{in})$ - експериментально отримана залежність вихідного (вимірювального) фоторезистора 1 ($R_1 = R_{out}$) від вхідної керуючої напруги U_{in} .

Результати експериментальних досліджень макету перетворювача для перетворювача, який оснащено оптико-електронним модулем з підсилювачем зі спільним емітером, коригувальною поправкою $U_s = 0,1 B$ та напругою джерела живлення $U = 18 B$ наведені на рис. 8.

Похибка перетворення на лінійній ділянці функції відгуку в заданих межах зміни вихідного опору ($2,0 k\Omega < R_{out} < 7,0 k\Omega$) за результатами експериментальних вимірів за нормальних лабораторних умов не перевищила 0,3 %.

У подальшому планується оцінити вплив розкиду параметрів фоторезисторів та точності їх

встановлення відносно джерела оптичного випромінювання на похибки роботи перетворювача.

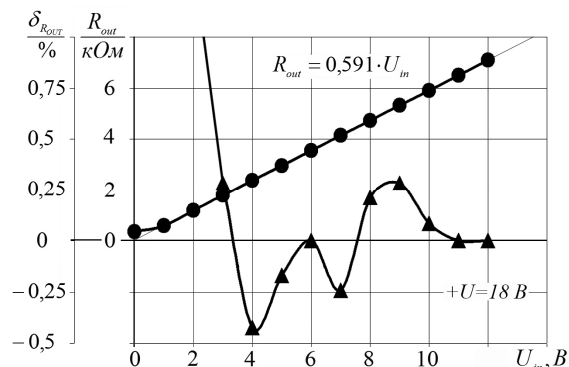


Рис. 8. Експериментально отримана функція відгуку досліджуваного перетворювача та залежність похибки перетворювача від величини вхідної напруги $\delta_{R_{out}}(U_{in})$

Висновки

Виготовлений макет перетворювача напруги в опір, в якому забезпечена можливість довільного вибору коефіцієнтів функції відгуку перетворювача, що дає можливість коректно імітувати потенціометричний датчик стану контрольованої системи.

Експериментально визначена функція відгуку перетворювача на початковій ділянці має нелінійність у зоні низьких вхідних напруг, яка визначається, насамперед, обмеженням яскравості світіння лампи та залежить від схеми включення лампи. Зона нелінійності в досліджуваному перетворювачі може бути суттєво зменшена збільшенням величини напруги живлення.

Отримані залежності свідчать про переваги використання у перетворювачі оптико-електронного модуля з підсилювачем зі спільним емітером перед використанням оптико-електронного модуля з емітерним повторювачем.

Література

- [1] 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. DOI: 10.31649/1997-9266-2021-159-6-9-13
- [2] Д. О. Півторак, О. М. Павловський, С. О. Цибульник, «Експериментальні дослідження перетворювача для системи автоматичного контролю», *Вісник КПІ. Серія приладобудування*, №63(1), с. 58-63. 2022. DOI: 10.20535/1970.63(1).2022.260643
- [3] 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.
- [4] P. Horowitz, W. Hill, *The Art of Electronics*, Cambridge: Cambridge University Press, 1980.

- [5] Л. П. Медяний, *Аналогова схемотехніка*, Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017.
- [6] Tietze U., Schenk Ch. *Halbleiter Schaltungstechnik*, Achte überarbeitete Auflage, Berlin: Springer, 2002.
- [7] В. О. Піддубний, І. О. Товкач, *Елементна база радіоелектронної апаратури: ч. 3. Багатоперехідні структури*, Київ, Україна: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021.
- [8] LM224N - Electronic Components Datasheet Search. [Online]. Available: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/17877/PHILIPS/LM224N.html>
- [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.

UDC 621.384.3

D. O. Pivtorak, S. O. Tsybulnyk*National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine***EXPERIMENTAL RESEARCH CHARACTERISTICS OF TRANSFORMATION BY THE OPTIC-ELECTRONIC MODULE OF THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM**

Simulators of environmental state sensors are used to set up and control the efficiency of automatic process control systems. In some cases, it is convenient to use a voltage-resistance converter with an optoelectronic output module based on a controlled photoresistor as a simulator of potentiometric sensors.

An optical-electronic voltage-to-resistance converter, which has a galvanic isolation of the output and has a linear characteristic in a given range of output resistance is developed. The developed converter allows to set the angular and free coefficients of the linear equation arbitrarily that describes the response function of the converter and correctly simulate the operation of a potentiometric state sensor of the controlled parameter. An operating model of the converter was developed and manufactured, experimentally determination of its response function for different values of the free coefficient, supply voltage and different options for the circuit design of the optoelectronic module was carried out.

The principle of operation of the converter is based on a change in the resistance of photoresistors under the influence of optical radiation coming from a controlled source. The model of the converter consists of optical and electronic blocks. The optical block consists of an optical radiation source and two photoresistors simultaneously directed at it. The signal from one photoresistor is the output, and the signal from the second photoresistor is analyzed by the control circuit, which synchronously changes the illumination on the light-sensitive areas of the photoresistors through the brightness controller in accordance with the voltage level of the control and corrective signals.

The experimentally determined response function of the converter in the initial section has a non-linearity in the zone of low input voltages, which is determined, foremost, by the limitation of the lamp brightness and depends on the scheme of its inclusion. The non-linearity zone in the researched converter can be significantly reduced by increasing the supply voltage. Within the given range of change of the output resistance of the rectilinear section of the response function, the output resistance of the converter is linearly related to the input voltage, according to the results of experimental measurements in natural laboratory conditions, the conversion error hasn't exceeded 0.3%.

Keywords: converter; signal; resistance; photoresistor.

*Надійшла до редакції
10 травня 2023 року*

*Рецензовано
25 травня 2023 року*



© 2023 Copyright for this paper by its authors.
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).