

УДК 535.247; 621.375.024; 621.317.7

Ямпольський А.Л.¹, асп.,
Макаренко О.В.¹, к.ф.-м.н., доц.,
Шарапа А.І.¹, інж.

Фотодіодний приймальний модуль з цифровим перемиканням діапазонів

¹Київський національний університет імені
Тараса Шевченка, 01601, м. Київ, вул.
Володимирська 64/13
e-mail: almarkar@univ.kiev.ua

A.L. Yampolskiy¹, PhD stud.,
O.V. Makarenko¹, PhD.,
A.I. Sharapa¹, Eng.

Photodiode receiver module with digital gain control

¹Taras Shevchenko National University of Kyiv,
01601, Kyiv, Volodymyrska st. 64/13
e-mail: almarkar@univ.kiev.ua

Розроблено трансімпедансний підсилювач постійного струму для фотодіода, величина підсилення задається зовнішніми управляючими TTL-сигналами і може змінюватися на 5 порядків. Придільено увагу питанням завадостійкості вимірювальної апаратури. Описуваний прилад дозволяє вимірювати потоки оптичного випромінювання, величина яких змінюється в динамічному діапазоні 96 дБ і може бути застосований для автоматизованих фізичних експериментів у фотометрії, спектроскопії, еліпсометрії, тощо.

Ключові слова: фотодіод, перетворювач струм-напруга, цифрове управління.

In this paper, a photodiode transimpedance amplifier with a controlled gain based on PGA103 chips was developed. To avoid distortion of the signal and to reduce the measurement error operational amplifier AD711 with low bias and leakage current was used. The scheme is very sensitive to internal mutual interference, is inclined to self-excitation and requires special arrangement and careful shielding. Therefore, appropriate circuitry solutions were adopted, such as separate cascade power supply, signal filtering, special stabilization of reference voltages, buffering of the control inputs of the amplifier. The device has three cascades: the first is a current-voltage converter with a conversion factor of 40 mV/nA, the next two are voltage amplifiers. Digital inputs allow you to set the total gain from x1 to x10000 (5 ranges). The device designed showed good linearity (nonlinearity of the response is 1.3% with an amplification of x10000, and in the remaining ranges it does not exceed 0.5%). Compensation of zero shifts by trimmer resistors is not fully achieved; it must also be done programmatically at the stage of processing the measured signal. For each range, the zero offset is different. The frequency range of the amplifier is from 0 to 85 Hz, this allows, if necessary, to modulate the optical radiation at a small frequency. The described photodetector module can be used in physical experiments, metrology or industrial tasks that require measuring light fluxes in a wide dynamic range.

Key words: photodiode, transimpedance amplifier, current-voltage converter, digital gain control.

Статтю представив д.ф.-м.н., проф. Макарець М. В.

Вступ

Вимірювання світлових потоків є актуальним завданням у багатьох галузях науки і техніки. Оптичне випромінювання несе в собі інформацію про середовище, яке його породило (зірка, розжарена деталь, люмінофор, тощо), або речовину чи об'єкт, із яким воно взаємодіяло (наприклад, відбилося від поверхні напівпровідника, тонкоплівкової структури, пройшло крізь розчин, розсіялось на частинках речовини або неоднорідностях середовища). Інформація може міститись у амплітуді, фазі та

поляризації світлової хвилі. Процедура вимірювання дозволяє виділити цю інформацію із світлового потоку і використати її для фізичних досліджень чи, скажімо, для управління технологічним процесом.

Технічна задача авторів (гоніополяриметрія розсіяного світла) передбачала вимірювання оптичних потоків, величина яких змінюється на кілька порядків і може наближатися до рівня, не набагато більшого за поріг чутливості людського ока. З огляду на особливості експериментальної установки та з міркувань стабільності приймача було вирішено відмовитися від типового підходу

використання фотоелектронного помножувача, а натомість застосувати систему реєстрації світлових потоків на основі фотодіода.

Згідно з [1], фотодіоди, будучи увімкнені в схему з операційним підсилювачем, дозволяють охопити сигнали, амплітуди яких лежать в межах 5 порядків.

У [2] теоретично показано, що динамічний діапазон фотодіода може сягати ~ 100 дБ (отримано з шумових характеристик фотодіода за ідеальних умов). Реально він був на 2 порядки менше внаслідок деградації фотодіодного масиву з часом. Але дана робота присвячена випробуванню нового експериментального типу діодів, технологія виготовлення яких ще не була відпрацьована, тому фотодіоди, що серійно випускаються промисловістю, повинні мати кращі характеристики.

Фотогальванічний режим короткого замикання фотодіода має ряд переваг [3]: не треба джерела напруги зміщення, відсутній темновий струм фотодіода, лінійна енергетична характеристика. Тому для розроблюваного підсилювача ми обрали саме цей режим роботи.

Великий власний коефіцієнт підсилення операційного підсилювача призводить до того, що його інвертуючий вхід є віртуальною землею. Така схема добре підходить для вимірювання струмів від десятків міліампер до часток пікоампера [4]. Максимальний струм обмежується вихідним струмом операційного підсилювача.

Нижня межа вимірюваного струму визначається вхідною наругою зміщення, вхідними струмами зміщення ОП та їх дрейфами. Вхідна шумова наруга операційного підсилювача передається на вихід з низьким коефіцієнтом підсилення $A = 1 + R_{33} R_D$ (для постійного струму) за рахунок великого опору діода R_D . Але ємність діода C_D модифікує зворотний зв'язок на високих частотах, додаючи підсилення. Враховуючи значні величини R_D та C_D , ефект може проявлятися вже на досить низьких частотах [5].

Великий вхідний опір призводить до утворення різких піків на передаточній характеристиці і навіть до самозбудження підсилювача [5,6]. В загальному випадку це явище усувають, вмикаючи паралельно R_{33} невеликий конденсатор (одиниці-десятки пФ). Часто достатньо буває паразитної ємності монтажу. Але слід пам'ятати, що при такій компенсації суттєво звужується смуга робочих частот трансімпедансного підсилювача.

Враховуючи необхідність забезпечення високого коефіцієнта підсилення схеми і вищеописані особливості перетворювача струм-напруга, автори прийняли рішення звужити смугу його пропускання до < 100 Гц. Таким чином, метою даної роботи є розробка і побудова трансімпедансного підсилювача постійного струму для фотодіода з можливістю програмно змінювати коефіцієнт підсилення в межах кількох порядків.

Конструкція підсилювача

В якості приймача був обраний фотодіод ФД-288Б, в першу чергу, завдяки своїм розмірам (діаметр чутливої площадки 11,3 мм). Спектральний діапазон у нього $\Delta\lambda = 0,3 \dots 1,1$ мкм, інтегральна струмова чутливість 0,24 А/Вт, максимум спектральної чутливості припадає на $\lambda_{max} = 0,81$ мкм [7] – такі параметри цілком задовольняють вимогам експериментальної установки.

Схема фотоприймального модуля містить три каскади. Перший – це перетворювач струм-напруга, побудований на прецизійному операційному підсилювачі AD711 (рис. 1). Резистор R_5 дозволяє зміщувати вихідну наругу каскаду в межах кількох мілівольт. Ланцюжок зворотного зв'язку містить 4 SMD-резистори типорозміру 1206, опором по 10 МОм кожен. Такі резистори були обрані через їх відносно невелику температурну нестабільність. Частота зрізу каскаду визначається опором та ємністю ланки зворотного зв'язку і складає 85 Гц.

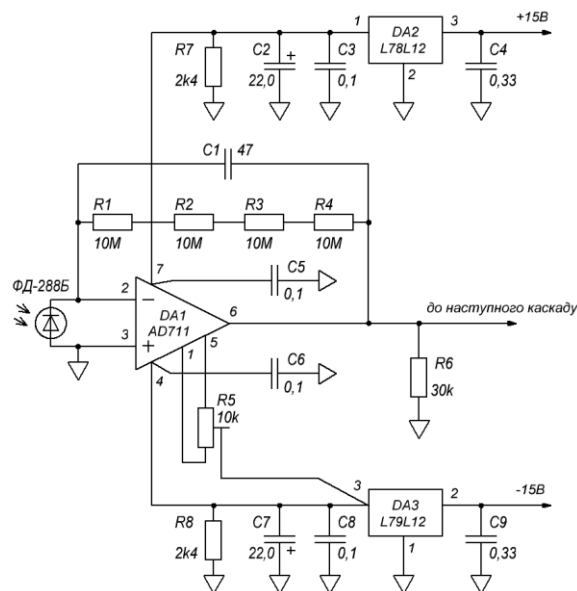


Рис. 1. Схема перетворювача струм-напруга

Другий та третій каскади однакові (рис. 2). Вони побудовані на спеціальній мікросхемі підсилювача з програмованим коефіцієнтом підсилення PGA103 фірми Burr-Brown. Подаючи цифрові сигнали з TTL-рівнями на управляючі входи A0 та A1, можна обирати одне із трьох підсилень: $\times 1$, $\times 10$, $\times 100$. Таким чином, два каскади дають підсилення до $\times 10000$. На вивід 3 подається опорна напруга, відносно якої здійснюється відлік сигналів. Джерело цієї напруги повинно мати дуже малий вихідний опір: навіть десяти долі ома спричинюють нелінійність величиною в десятки долі відсотка при підсиленні у 100 разів [8]. Таким джерелом є повторювач напруги на базі операційного підсилювача OP07 (також належить до прецизійних).

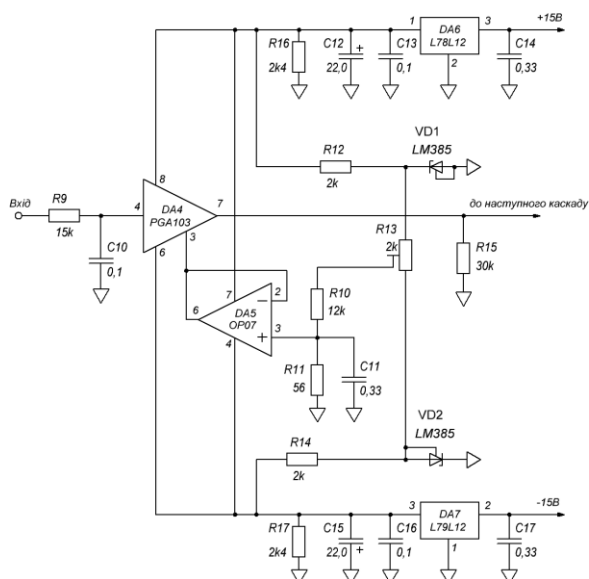


Рис. 2. Схема підсилювального каскаду на мікросхемі PGA103

Для задання опорних рівнів застосовано спеціальні мікросхеми так званих «програмованих стабілітронів» LM385. Їх вихідну напругу за необхідності можна змінювати подільником із двох резисторів. При включенні, показаному на рис. 2, напруга на LM385 складає 1,24 В.

Задавальні кола опорних рівнів спроектовані так, щоб мінімізувати їх опір, число елементів і, відповідно, чутливість до наводок. Через стабілітрони LM385 протікає струм 5,4 мА, а через підстроювальний резистор $R13$ – 1,24 мА. Схема розрахована таким чином, щоб забезпечити регулювання нуля в межах ± 5 мВ. Для додаткової стабільності до підстроювальних резисторів підключені конденсатори ємністю 0,33 мкФ.

Схема виявилась дуже критичною до компонування. Внаслідок невдалої топології друкованої плати у першій конструкції приладу спостерігалась генерація на частоті близько 200 кГц, яка починала суттєво проявлятися при підсиленнях $\times 1000$ і вище. Причини тому – близьке розташування двох мікросхем PGA і ряд паразитних ємностей між провідниками плати, через які вихід підсилювача взаємодіяв із входом.

При роботі в широкому динамічному діапазоні велике значення має врахування шумових характеристик елементів та впливу зовнішніх електромагнітних наводок.

Шуми у вигляді сигналів-завад, що приходять через зв'язки з джерелом живлення та заземлення, на практиці можуть бути важливіші, аніж внутрішні шуми. Шляхом правильного розташування й конструювання схеми ці завади можуть бути зменшені до несуттєвої величини [9].

Всередині приладу сигнали можуть досить легко проходити шляхом електростатичного зв'язку. Методи боротьби з цим – рознесення частин схеми у просторі, встановлення між ними електростатичних екранів, екранування кабелів, розміщення провідників упритул до земляних шин, а також зниження за можливістю повного опору входів [10].

Суттєвий вплив на роботу даного підсилювача чинять кондуктивні наводки. Кондуктивна наводка – це завада, що передається із сусідніх електричних кіл шляхом проходження електричного струму спільними провідниками, в основному, через спільні ділянки заземлення й живлення. Типовою причиною їх появи в системах промислової автоматизації є неправильне виконання заземлення [10]. Відзначимо також, що при передачі сигналу по кабелю між гальванічно зв'язаними приладами роль кондуктивних завад дуже значна.

З урахуванням вищесказаного, вирішили секціонувати схему та екранувати каскади. Для виключення кондуктивних наводок кожен каскад має власне стабілізоване живлення ± 12 В, а всі земляні провідники сходяться в одну точку. Це відзначено на схемах спеціальним символом аналогової землі. Один бік плати відведений для екраних та спільних провідників. Кожен каскад навантажений на резистор 30 кОм, а між ними увімкнені фільтри нижніх частот на 106 Гц (R9C10), які подавляють можливу високочастотну генерацію.

Подача зовнішніх управляючих сигналів організована через ключі на польових

транзисторах BSS123 для підвищення завадостійкості приладу. На рис. 3 показана схема такого ключа, а також їх увімкнення і таблиця кодів для керування підсиленням.

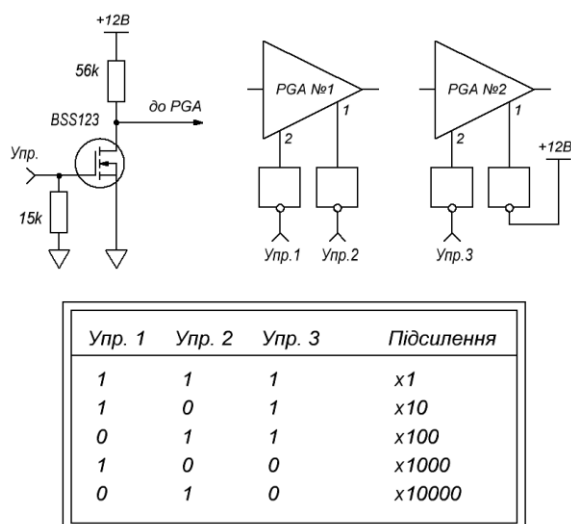


Рис. 3. Ключі цифрового управління підсиленням і таблиця відповідних кодів

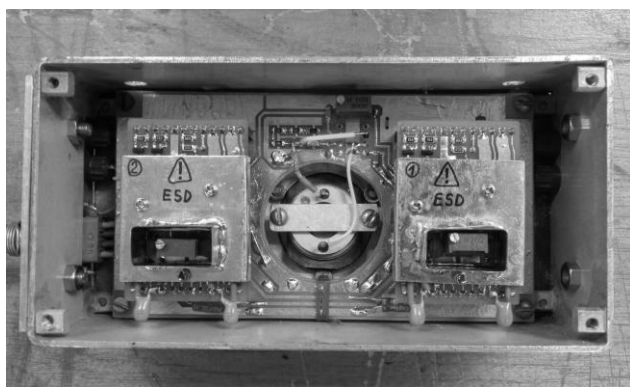


Рис. 4. Будова фотоприймального модуля.

Прилад скомпоновано за модульним принципом (рис. 4). Фотодіод з'єднується зі схемою короткими проводами. Підсилювальні PGA-каскади виконано у вигляді двох однотипних екранованих плат-вставок, які розміщуються на одній великій платі. На цій же платі знаходиться точка з'єднання земляних провідників. Усю схему вміщено в металевий корпус, який кріпиться на експериментальну установку. Живлення та сигнали надходять по кабелю через роз'єм типу РГ1Н-1-3.

Налаштування, робота і характеристики підсилювача

Виставлення нулів каскадів. Починаючи роботу з новим фотоприймальним модулем,

передусім потрібно виставити нулі кожного каскаду. Це можна зробити за допомогою вольтметра, включаючи його до проміжних контрольних точок і подаючи необхідні комбінації на управляючі входи. Мікросхема PGA103 видає напругу відносно того ж опорного рівня (вивід 3), відносно якого й сприймає її, тому в режимі x1 зсув нуля ні на що не впливає, вихідна напруга $U_{\text{вих}}$ буде в точності рівна вхідній $U_{\text{вх}}$. Цим можна скористатися при налаштуваннях.

Спочатку виконується компенсація зсуву нуля каскаду перетворювача струм-напруга. Якщо два наступних каскади при цьому працюватимуть в режимі повторювача, контрольний вольтметр можна вмикати на вихід приладу. Далі налаштовують наступні каскади. Згідно технічної документації на PGA103, для різних підсилень нулі можуть не співпадати. Тому для зменшення загальної похибки було прийнято рішення компенсувати зсуви нулів кожної PGA103 саме в режимі x100.

Після налаштувань ненульові значення вихідної напруги для кожного діапазону при затемненому фотодіоді варто записати для подальшої програмної корекції результатів вимірювань.

Перевірка лінійності. При проведенні гоніополяриметричних вимірювань в залежності від величини сигналу буде здійснюватись автоматичне перемикання діапазонів підсилення. Щоб можна було точно визначати співвідношення різних сигналів (важливо для еліпсометрії), повинна бути забезпечена «зшивка» діапазонів. Для цього варто перевірити лінійність підсилювача.

Найпростіший і найбільш правильний шлях для цього – скористатися джерелом випромінювання, інтенсивність якого можна змінювати за лінійним законом. Але за відсутністю такого джерела автори вирішили проконтролювати лінійність інакше.

На рис. 5 схематично показано принцип вимірювання при зміні в широкому динамічному діапазоні сигнальної напруги після першого каскаду-перетворювача $U_{\text{сигн}}$. Хай вона зменшується, тоді при досягненні вихідною напругою U_2 значення, в 10 разів менше початкового, вже можна вимірювати в наступному діапазоні – ця напруга не перевищить рівня насичення U_{max} . Для зашумлених сигналів можна ввести гістерезис величиною ΔU . Відповідно, робочі ділянки діапазонів наведено жирним.

Уявімо собі, що підсилювач нелінійний. Це означатиме, що графіки підсилення матимуть загин в області поблизу U_{max} , але в області невеликих вихідних напруг ($U_2 < \frac{1}{10} U_{max}$) їх ще можна вважати лінійними. Це означає, що контроль лінійності підсилень у різних діапазонах можна здійснити, порівнюючи вихідні напруги на спільних ділянках двох сусідніх діапазонів при однакових значеннях $U_{сигн}$.

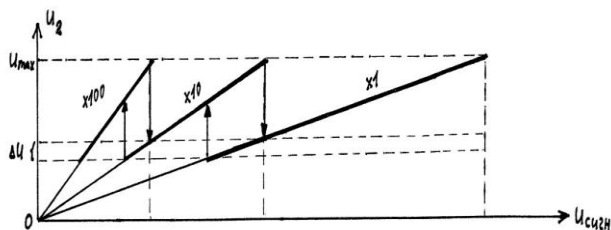


Рис. 5. Принцип перемикавання діапазонів.
Масштаби не дотримані

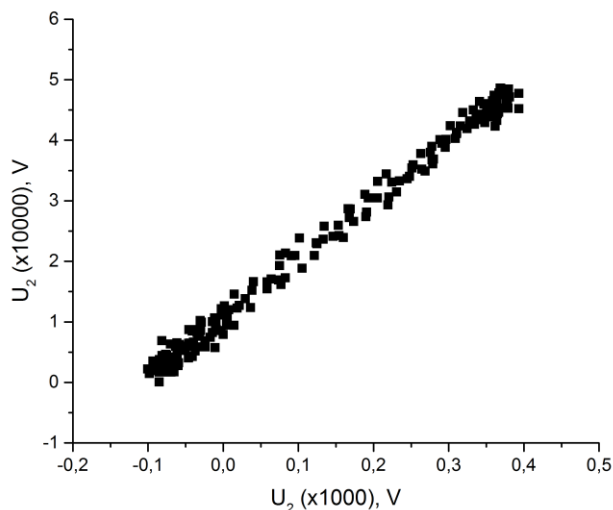


Рис. 6. Взаємна залежність вихідної напруги U_2 при підсиленнях $\times 10000$ та $\times 1000$ для перевірки лінійності діапазонів підсилювача

Розглянемо це на прикладі. Діапазон $\times 1$ – це режим повторювача, він лінійний апіорі. Встановимо таку інтенсивність джерела випромінювання, щоб у режимі $\times 10$ не було насичення підсилювача ($U_2 < U_{max}$). Для перевірки лінійності діапазону $\times 10$ будемо зменшувати цю інтенсивність і вимірювати сигнальні відгуки U_2 , порівнюючи їх з лінійними відгуками діапазону $\times 1$. Побудуємо залежність $U_{2 \times 10} U_{2 \times 1}$. По суті це параметрично задана

функція, яка повинна бути прямою з тангенсом кута нахилу 10.

Такі дослідження були проведені для чотирьох пар сусідніх діапазонів. Побудували залежності $U_{2 \times 10} U_{2 \times 1}$, $U_{2 \times 100} U_{2 \times 10}$, $U_{2 \times 1000} U_{2 \times 100}$ та $U_{2 \times 10000} U_{2 \times 1000}$. Остання, для прикладу, представлена на рис. 6. Ця залежність відповідає парі найчутливіших діапазонів і містить найбільше флуктуацій. Як бачимо, вона дуже близька до прямої.

Апроксимуючи дані залежності поліномами 2 степеня, одержали відносні нелінійності $\frac{\Delta U_2}{U_2 U_{max}}$ відповідно 0,002 (залежність $\times 1 \times 10$), 0,000 (залежність $\times 10 \times 100$), 0,004 (залежність $\times 100 \times 1000$) та 0,013 (залежність $\times 1000 \times 10000$). Відповідні тангенси кутів нахилу склали 10,00, 9,98, 9,97 та 9,81 – отже, маємо реальні значення коефіцієнтів підсилення, що дозволить іще точніше перерахувати результати вимірів. Як бачимо, лінійність підсилювача хороша.

Динамічний діапазон. Оцінімо динамічний діапазон нашого підсилювача, у розумінні приладу як цілого. Це є відношення максимально можливої сигнальної напруги до мінімальної, яку ще можна зареєструвати (фактично, до рівня шумів).

Максимальний сигнал буде у випадку, коли при одиничному підсиленні на виході буде $U_2 = 10$ В. Тобто $U_{сигн} = 10$ В = 10000 мВ.

При підсиленні у 10000 разів ширина шумової доріжки на виході складає 1,5 В. Це означає, що мінімальний рівень сигналу буде $U_{сигн} = 0,15$ мВ.

Таким чином, динамічний діапазон підсилювача

$$D = 20 \lg \frac{10000 \text{ мВ}}{0,15 \text{ мВ}} = 96,5 \text{ дБ}$$

Висновки

При побудові перетворювача струм-напруга важливо дотримуватись правил трасування слабкосигнальних кіл, зокрема, застосовувати охоронний контур на платі навколо входу. Висока струмова чутливість (40 В/мкА для першого каскаду) у поєднанні з великим підсиленням за напругою (до $\times 10000$) накладає високі вимоги до компоновки й екранування даного приладу.

Область робочих частот підсилювача лежить у межах 0...85 Гц. Це дозволяє працювати з постійними сигналами, а за необхідності промодулювати оптичний потік з невеликою

частотою. В розробленій схемі фізично підстроювальними резисторами можна встановити нулі з точністю близько 0,3 мВ. Подальшу компенсацію зсуву напруги слід виконувати програмно, на етапі обробки результатів вимірювань. Відносна нелінійність

підсилювача становить 1,3% при підсиленні $\times 10000$, а в решті діапазонів не перевищує 0,5%. За необхідності корекцію лінійності також можна здійснювати програмно.

Список використаної літератури

1. E. S. Voropai, V. I. Karas', and P. A. Torpachev, *Metrologiya*, No. 9, 31 (1985)
2. Yazawa, Y., Katoh, I. and Sonobe, S. (1990) Wide dynamic range photodiode arrays sensitive and stable to ultraviolet radiation. *Electron. Comm. Jpn.* Pt. II, 73: 1-10.
3. O.V. Slobodyaniuk, *Metodychni vkazivky do praktykumu «Osnovy radioelektroniky» dlya studentiv fizychnoho fakul'tetu* [Methodical instructions for the "Fundamentals of Radio Electronics" workshop for students of the Physics Department] // Ed. by O.V. Slobodyaniuk. – Kyiv, PrintLine Paleographic Centre, 2007, 120 p.
4. Peyton, Anthony J., Walsh, V. *Analog electronics with op amps: a source book of practical circuits*. Cambridge: Cambridge university press, 1993.
5. Borisevich K. OU dlya kontrolya fotodyodov [OpAmp for photodiode control]. *Radiomir*, 2008, 11, pp. 21-23, 12, pp. 19-20, 2009, 1, pp. 24-26 (Rus).
6. Graeme J. *Photodiode amplifiers: op amp solutions* / New York: McGraw-Hill – 1996.
7. Baranochnikov M.L. *Priyemniki i detektory izlucheniya. Spravochnik*. [Receivers and radiation detectors. Directory.]. Moscow, DMC Press, 2012, 640 p.
8. PGA 103 Programmable Gain Amplifier. / U.S.A: Burr-Brown Corporation, PDS-1208B, Nov. 1993. - 9 p.
9. Paul Horowitz and Winfield Hill, «The Art of Electronics», Cambridge University Press, 1980.
10. Denisenko V. *Zazemleniye v sistemakh promyshlennoy avtomatizatsii* [Grounding in industrial automation systems]. *Sovremennyye tekhnologii avtomatizatsii*. – 2006. – № 2. p. 94-99, №3. p. 76-92.

References

1. VOROPAI E. S., KARAS' V. I., TORPACHEV P. A. (1985) *Metrologiya*, N. 9, 31
2. YAZAWA, Y., KATOH, I. and SONOBE, S. (1990) Wide dynamic range photodiode arrays sensitive and stable to ultraviolet radiation. *Electron. Comm. Jpn.* Pt. II, 73: 1-10.
3. SLOBODYANIUK O.V. (2007), *Metodychni vkazivky do praktykumu «Osnovy radioelektroniky» dlya studentiv fizychnoho fakul'tetu* [Methodical instructions for the "Fundamentals of Radio Electronics" workshop for students of the Physics Department]. Ed. by O.V. Slobodyaniuk. Kyiv, PrintLine Paleographic Centre, 120 p.
4. PEYTON, ANTHONY J., WALSH, V. (1993) *Analog electronics with op amps: a source book of practical circuits*. Cambridge: Cambridge university press.
5. BORISEVICH K. (2008) OU dlya kontrolya fotodyodov [OpAmp for photodiode control]. *Radiomir*, 11, pp. 21-23, 12, pp. 19-20, 2009, 1, pp. 24-26.
6. GRAEME J. (1996) *Photodiode amplifiers: op amp solutions*. New York: McGraw-Hill.
7. BARANOCHNIKOV M.L. (2012) *Priyemniki i detektory izlucheniya. Spravochnik*. [Receivers and radiation detectors. Directory.]. Moscow, DMC Press, 640 p.
8. U.S.A. Burr-Brown Corporation. (1993) *PGA 103 Programmable Gain Amplifier*. PDS-1208B, 9 p.
9. PAUL HOROWITZ AND WINFIELD HILL (1980), «*The Art of Electronics*», Cambridge University Press.
10. DENISENKO V. (2006) *Zazemleniye v sistemakh promyshlennoy avtomatizatsii* [Grounding in industrial automation systems]. *Sovremennyye tekhnologii avtomatizatsii*. – № 2. p. 94-99, №3. p. 76-92.

Надійшла до редколегії 16.03.2018