

DOI 10.31891/2307-5732-2018-267-6(2)-121-125
УДК 621.382

О.В. ОСАДЧУК, О.О. СЕЛЕЦЬКА, Л.В. КРИЛИК
Вінницький національний технічний університет

МІКРОЕЛЕКТРОННИЙ ОПТИЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ КОНЦЕНТРАЦІЇ ГАЗУ

Розроблено мікроелектронний оптичний перетворювач концентрації газу на основі напівпровідникової структури з від'ємним опором з фоточутливим елементом фоторезистором. Розроблено математичну модель перетворювача концентрації газу, на основі якої отримано аналітичні залежності для функції перетворення та рівняння чутливості. Експериментальні дослідження підтвердили адекватність розробленої моделі перетворювача та показали, що в діапазоні вимірювання концентрації метану від 250 до 5000 ppm чутливість дорівнює 64–10 Гц/ppm.

Ключові слова: перетворювач концентрації газу, абсорбційна спектроскопія, функція перетворення, рівняння чутливості

A.V. OSADCHUK, O.O. SELETSKA, L.V. KRYLIK
Vinnytsia National Technical University

MICROELECTRONIC OPTICAL TRANSDUCER OF GAS CONCENTRATION

This paper presents a microelectronic optical transducer of gas concentration with frequency output signal. The developed microelectronic optical transducer of gas concentration uses the semiconductor structure based on bipolar and field-effect transistors and photo resistor as a photo sensible element and can be applied in absorption spectroscopy method for measuring of methane concentration. The proposed optical transducer allows to increase the sensitivity of measurement of gas concentration. The aim of the studying is to determine the transfer function and equation of sensitivity for description the operation of the microelectronic transducer. The formula for impedance of the transistor structure has been determined by solving equations Kirchhoff, composed using equivalent circuit of the optical transducer of gas concentration. Characteristics, which describe dependencies of reactive and active component of the impedance converter oscillator on gas concentration, have been obtained by computer simulation using the Matlab numerical computing environment. The mathematical model of the microelectronic optical transducer of gas concentration composed of bipolar and field-effect transistors and photo resistor has been developed. It describes the dependence of impedance of the transistors structure on gas concentration. The model considers the impact of illumination, which passes through cuvette with gas, on the elements of nonlinear equivalent circuits of transducer based on transistor's structure with negative resistance. The analytical dependencies of transfer function and the equation of sensitivity are received using this model. Sensitivity of the microelectronic transducer of gas concentration changes from 64 Hz/ppm to 10 Hz/ppm with increase in the gas concentration from 250 ppm to 5000 ppm. Simulation results were proved by the experimental data. Accuracy of developed mathematical model is $\pm 5\%$.

Keywords: transducer of gas concentration, absorption spectroscopy, the transfer function, the equation of sensitivity

Вступ

Перетворювачі концентрації газів отримали широке застосування в системах контролю концентрації шкідливих газів у промисловому виробництві, побуті, екологічного моніторингу навколишнього середовища. Серед найпоширеніших методів визначення концентрації газів особливе місце займають оптичні методи, серед яких найбільш перспективним є метод адсорбційної спектроскопії, що володіє низьким порогом чутливості ($< 1 \text{ мкг/м}^3$) та високою селективністю [1]. Метод адсорбційної спектроскопії оснований на явищі селективного поглинання газами випромінювання і лежить в основі функціонування багатьох приладів. Селективне поглинання пояснюється тим, що частота випромінювання є резонансною для молекул заданого газу. При поглинанні світла атоми та молекули речовин переходять у новий збуджений стан. В даний час існує велика кількість газоаналізаторів для широкого спектра газів. Так, в роботах [2, 3] наведені параметри газоаналізаторів, робота яких заснована на селективному поглинанні газами вуглеводневої групи випромінювання інфрачервоного діапазону з довжиною хвилі 2–5 мкм. Недоліком аналізаторів [2, 3] є невисока чутливість при виявленні горючих газів. Цей недолік викликаний в основному малими розмірами контрольованого обсягу (малою відстанню випромінювач-приймач). Ще одним недоліком є складність оптичних систем проходження робочого і опорного променів, а також наявність двох приймачів при реєстрації цих променів, шумові характеристики яких можуть бути близькі, але ніколи не збігаються. Останній недолік важливий при реєстрації мікроконцентрацій токсичних газів. Вирішити ці завдання можна, зокрема, за рахунок використання в схемі засобу вимірювання оптичного частотного перетворювача, який дозволяє перетворювати інтенсивність випромінювання, що поглинається приймачем у вихідний сигнал відповідної частоти. Таке перетворення забезпечує високу завадостійкість (отже, і точність) вимірювання концентрації газів. Крім того, оптичні перетворювачі з частотним вихідним сигналом мають високу чутливість до вимірюваних параметрів, малу масу і габарити, конструктивну і технологічну сумісність з інформаційними технологіями для сприймання, обробки, і зберігання інформації [4]. Це, в свою чергу, доводить їх перевагу над існуючими оптичними сенсорами [5].

Для вивчення властивостей оптичного перетворювача концентрації газу необхідно розробити математичну модель, за допомогою якої отримують залежності, активної та реактивної складових повного

опору структури, чутливості, залежності частоти генерації від концентрації газу, виконати експериментальні дослідження, які б підтвердили справедливості теоретичних положень.

Метою роботи є визначення функції перетворення та рівняння чутливості перетворювачів на основі еквівалентної схеми шляхом розв'язування складених рівнянь Кірхгофа.

Теоретичні та експериментальні дослідження

Метод абсорбційної спектроскопії оснований на властивостях газу поглинати промені в суворо визначених для кожного газу ділянках спектру завдяки наявності коливально-обертальних смуг поглинання [6]. Величина інтенсивності ослабленого випромінювання I , що пройшло через вимірювальну кювету з газом, який аналізується, може бути визначена за законом Бугера-Ламберта-Бера

$$I = I_0 \exp(-k \cdot C \cdot l),$$

де I_0 – величина потоку випромінювання на вході у вимірювальну кювету, k – коефіцієнт поглинання газу, що аналізується і залежить від ступеня узгодження спектрів поглинання газу, спектральної характеристики джерела інфрачервоного випромінювання і спектральної чутливості приймача інфрачервоного випромінювання; C – концентрація газу, що аналізується; l – довжина вимірювальної кювети.

Можливий спосіб визначення концентрації газу з використанням пристрою, зображеного на рис. 1.

Зміна інтенсивності світлового потоку, що випромінюється світлодіодом інфрачервоного спектру та реєструється фоторезистором R_f , на який нанесено інтерференційний фільтр для виділення контрольної смуги з довжиною хвилі, яка відповідає довжині максимально інтенсивної смуги поглинання контрольованого газу.

Автогенераторний перетворювач утворюється ємнісною складовою повного диференційного опору на електродах колектор біполярного транзистора $VT1$ та затвор польового транзистора $VT2$ та індуктивністю L . Обмежувальний конденсатор C запобігає проходженню змінного струму через джерело напруги $U_{жс}$. Діод VD забезпечує живлення біполярного транзистора $VT1$ та польового транзистора $VT2$. Від'ємний опір, який виникає на електродах колектор біполярного транзистора $VT1$ та затвор польового транзистора $VT2$ призводить до виникнення електричних коливаний в контурі. При зміні інтенсивності випромінювання, що пройшло через кювету, змінюється опір фоторезистора і, відповідно, змінюється ємнісна складова повного опору на електродах – колектор біполярного транзистора та затвор польового транзистора, що викликає ефективну зміну частоти генерації коливального контуру. Для визначення повного опору автогенератора складено еквівалентну схему за змінним струмом (рис. 2).

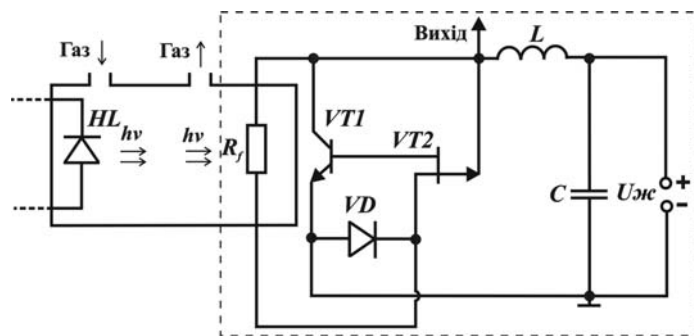


Рис. 1. Електрична схема мікроелектронного оптичного перетворювача концентрації газу

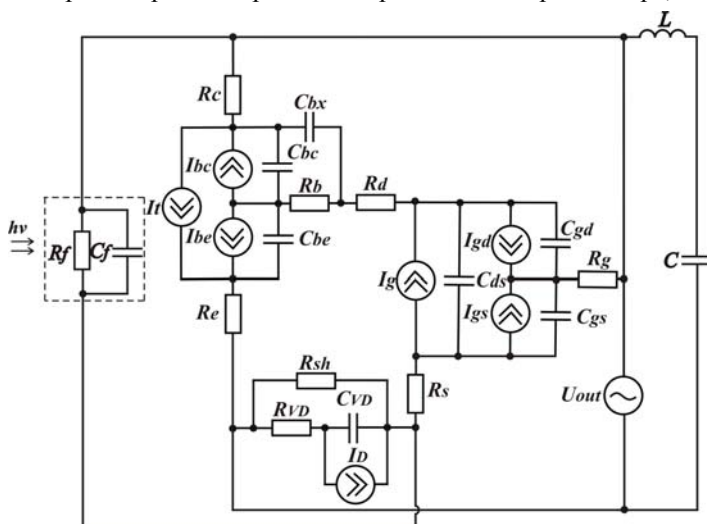


Рис. 2. Еквівалентна схема мікроелектронного оптичного перетворювача концентрації газу за змінним струмом

колектора транзистора $VT1$; R_{gd} – об'ємний опір затвору польового транзистора $VT2$; R_s – об'ємний опір витоку польового транзистора $VT2$; R_d – об'ємний опір стоку польового транзистора $VT2$; C_{gs} – ємність затвор-витік польового транзистора $VT2$; R_{VD} та C_{VD} – відповідно опір та ємність р-п переходу діоду VD ;

R_{sh} – шунтувальний опір діоду VD ; C_{gd} – ємність затвор-стік польового транзистора $VT2$; C_{ds} – ємність стік-витік польового транзистора $VT2$; C – ємність конденсатора C ; L – індуктивність зовнішньої індуктивності L . Струми I_{be} , I_{bc} , I_t , що входять до складу еквівалентної схеми біполярного транзистора $VT1$, I_g , I_{gd} , I_{gs} , що входять до складу еквівалентної схеми польового транзистора $VT2$ та I_D , що входить до складу еквівалентної схеми діода, описані в роботі [7].

Перетворена еквівалентна схема, що використовується для розрахунків, показана на рис. 3.

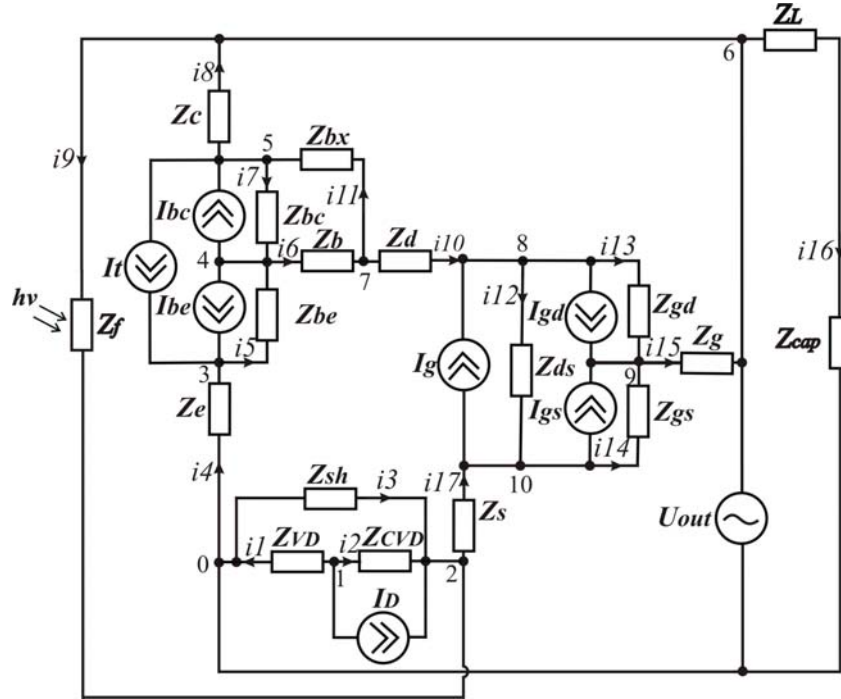


Рис. 3. Перетворена еквівалентна схема оптичного перетворювача концентрації газу за змінним струмом

Для еквівалентної схеми на рис. 3 складено систему рівнянь Кірхгофа за змінним струмом:

$$\begin{cases}
 -\varphi_1(Y_1 + Y_2) + \varphi_2 Y_2 = I_D; \\
 \varphi_1 Y_2 - \varphi_2(Y_2 + Y_3 + Y_9 + Y_{17}) + \varphi_{10} Y_{17} + \varphi_{16} Y_9 = -I_D; \\
 -\varphi_3(Y_4 + Y_5) + \varphi_4 Y_5 = -(I_t + I_{be}); \\
 \varphi_3 Y_5 - \varphi_4(Y_5 + Y_6 + Y_7) + \varphi_5 Y_7 + \varphi_7 Y_6 = I_{bc} + I_{be}; \\
 \varphi_4 Y_7 - \varphi_5(Y_7 + Y_8 + Y_{11}) + \varphi_7 Y_{11} = I_t + I_{be} - U_{out} Y_8; \\
 \varphi_2 Y_9 + \varphi_5 Y_8 + \varphi_9 Y_{15} = U_{out}(Y_8 + Y_9 + Y_{15} + Y_{16}); \\
 \varphi_4 Y_6 + \varphi_5 Y_{11} - \varphi_7(Y_{10} + Y_{11} + Y_{16}) + \varphi_8 Y_{10} = 0; \\
 \varphi_7 Y_{10} - \varphi_8(Y_{10} + Y_{12} + Y_{13}) + \varphi_9 Y_{13} + \varphi_{10} Y_{12} = I_{gd} - I_g; \\
 \varphi_8 Y_{13} - \varphi_9(Y_{13} + Y_{14} + Y_{15}) + \varphi_{10} Y_{14} = -(I_{gd} + I_{gs}) - U_{out} Y_{15}; \\
 \varphi_2 Y_{17} + \varphi_8 Y_{12} + \varphi_9 Y_{14} - \varphi_{10}(Y_{12} + Y_{14} + Y_{17}) = I_{gd} + I_g.
 \end{cases} \tag{1}$$

Провідності гілок еквівалентної схеми (рис. 3) визначаються за формулами:

$$\begin{aligned}
 Y_1 = 1/Z_{VD}; \quad Y_2 = 1/Z_{CVD}; \quad Y_3 = 1/Z_{sh}; \quad Y_4 = 1/Z_e; \quad Y_5 = 1/Z_{be}; \quad Y_6 = 1/Z_b; \quad Y_7 = 1/Z_{bc}; \quad Y_8 = 1/Z_c; \\
 Y_9 = 1/Z_f; \quad Y_{10} = 1/Z_d; \quad Y_{11} = 1/Z_{bx}; \quad Y_{12} = 1/Z_{ds}; \quad Y_{13} = 1/Z_{gd}; \quad Y_{14} = 1/Z_{gs}; \quad Y_{15} = 1/Z_g; \\
 Y_{17} = 1/Z_s \quad Y_{16} = 1/(Z_L + Z_{cap}).
 \end{aligned}$$

Опори еквівалентної схеми (рис. 3) визначаються наступним чином:

$$\begin{aligned}
 Z_{VD} = R_{VD}; \quad Z_{CVD} = -j/(\omega \cdot C_{CVD}); \quad Z_{sh} = R_{sh}; \quad Z_e = R_e; \quad Z_c = R_c; \quad Z_b = R_b; \quad Z_{bc} = -j/(\omega \cdot C_{bc}); \\
 Z_{be} = -j/(\omega \cdot C_{be}); \quad Z_{bx} = -j/(\omega \cdot C_{bx}); \quad Z_f = R_f / (1 + \omega^2 \cdot R_f^2 \cdot C_f^2) - j\omega R_f^2 C_f / (1 + \omega^2 R_f^2 C_f^2); \\
 Z_d = R_d; \quad Z_{gd} = -j/(\omega \cdot C_{gd}); \quad Z_g = R_g; \quad Z_s = R_s; \quad Z_{gs} = -j/(\omega \cdot C_{gs}); \quad Z_L = j\omega L; \\
 Z_{cap} = -j/(\omega \cdot C); \quad Z_{ds} = -j/(\omega \cdot C_{ds}).
 \end{aligned}$$

Для визначення функції перетворення необхідно на основі розв'язку системи рівнянь Кірхгофа (1) знайти залежність частоти генерації від концентрації газу [8]. Функція перетворення в цьому випадку буде мати вигляд:

$$F = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{A + \sqrt{A^2 + 4LC_{bx}(C_f R_f(C))^2}}{2LC_{bx}(C_f R_f(C))^2}}, \quad (2)$$

де $A = (C_f R_f(C))^2 + R_f^2(C)C_f - C_{bx} - LC_{bx}$.

Графічні залежність частоти генерації від концентрації газу (метану) для різних значень напруги живлення, розраховані за формулою (2) в порівнянні з експериментальним їх визначенням показані на рис. 4. З графіка видно, що із зменшенням концентрації газу спостерігається зменшення частоти генерації. Розбіжність теоретичної та експериментальної складової не перевищує $\pm 5\%$.

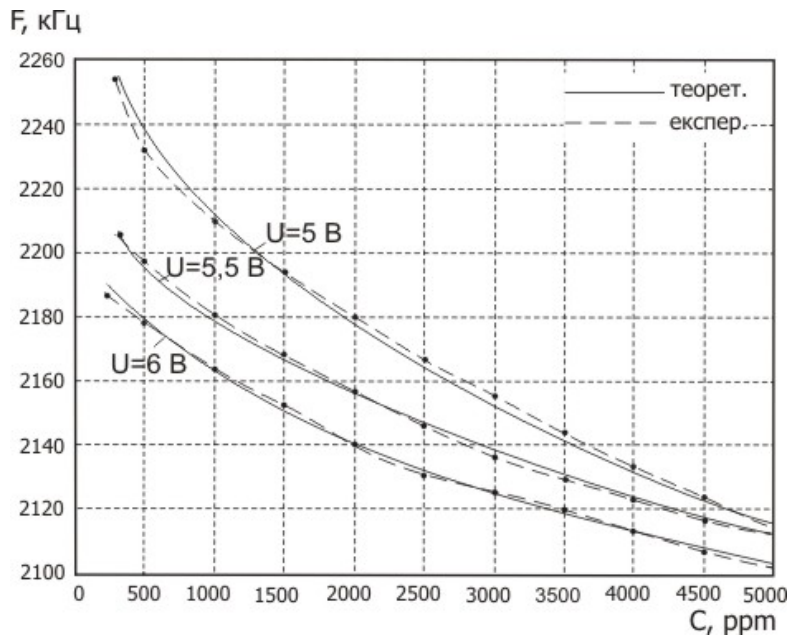


Рис. 4. Теоретичні та експериментальні залежності частоти генерації від зміни концентрації газу для різних значень $U_{ж}$

Чутливість перетворювача визначається на основі формули (2) та описується рівнянням:

$$S = \frac{1}{8} \left(\frac{2C_f^2 R_f(C) \frac{\partial R_f(C)}{\partial C} + 2B_1 \frac{\partial R_f(C)}{\partial C} + \frac{1}{2} \frac{4B_3 C_f^2 R_f(C) \frac{\partial R_f(C)}{\partial C} + 2B_1 \frac{\partial R_f(C)}{\partial C}}{\sqrt{B_2}} + 8LB_1 \frac{(B_3 + \sqrt{B_2}) \frac{\partial R_f(C)}{\partial C}}{LC_{bx} R_f^3(C) C_f^3} \right) \cdot \frac{\pi \sqrt{B_3 + \sqrt{B_2}}}{\sqrt{LC_{bx} R_f^2(C) C_f^2}}$$

де $B_1 = B_3^2 + 4LC_{bx} C_f^2 R_f^2(C)$; $B_2 = R_f(C) C_f C_{bx}$; $B_3 = (C_f R_f(C))^2 + R_f^2(C) C_f C_{bx} - LC_{bx}$.

На рис. 5 показана залежність чутливості частотного перетворювача від зміни концентрації газу.

З рис. 5 видно, що чутливість розробленого частотного перетворювача концентрації газу $64 \div 10$ Гц/ррм. Максимальну чутливість частотний перетворювач має в режимі в робочій точці автогенератора, коли напруга живлення дорівнює 5 В.

Висновки

Розроблена математична модель оптичного частотного перетворювача концентрації газу на основі автогенератора утвореного біполярним та польовим транзисторами з фоторезистором в якості фоточутливого елементу. На основі математичної моделі отримано аналітичні вирази для функції перетворення та рівняння чутливості. Теоретичні та експериментальні залежності показали, що чутливість розробленого оптичного перетворювача концентрації газу складає $64 \div 10$ Гц/ррм.

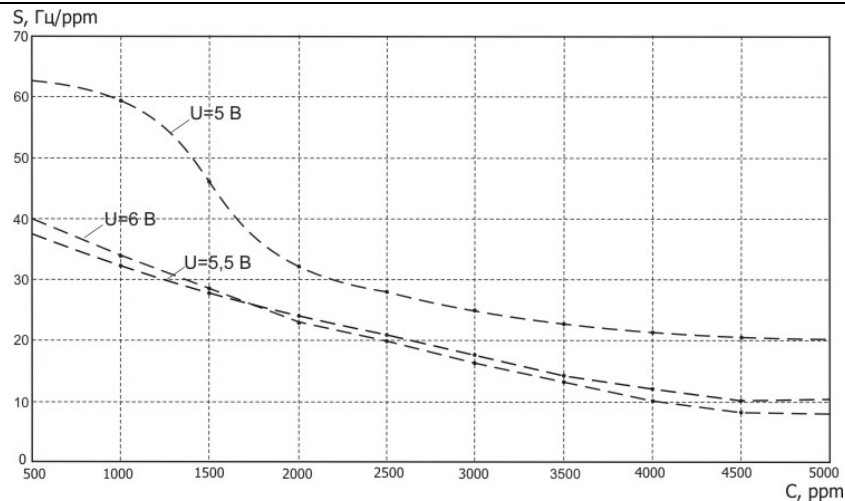


Рис. 5. Залежність чутливості частотного перетворювача від зміни концентрації газу

Література

1. Осадчук В. С. Методи вимірювання концентрації газів / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Д. П. Дудник // Вісник Хмельницького національного університету. – 2011. – № 6. – С. 55–58.
2. Завадовский А. Г. Малогабаритный лазерный локатор утечек метана / А. Г. Завадовский, И. И. Плюснин, С. Н. Сысоев // Датчики и системы (Челябинский ОУНБ). – 2007. – № 4.
3. Y. Shimose, T. Okamoto, A. Maruyama, M. Aizawa, H. Nagai, Remote sensing of methane gas by differential absorption measurement using a wavelength tunable DFB LD, IEEE Photonics Technology Letters. 1991. Volume: 3 Issue: 1. pp.86–87.
4. V. S. Osadchuk, A.V. Osadchuk, “Radiomeasuring Microelectronic Transducers of Physical Quantities”, IEEE, Proceedings of the International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 21–23 May 2015.
5. Kwang-Jow Gan, Kuan-Yu Chun, Wen-Kuan Yeh. Design of Dynamic Frequency Divider using Negative Differential Resistance Circuit. International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication. 2015. Volume: 3 Issue: 8. pp.5224–5228.
6. Алексеев В. А. Опыт создания переносных многокомпонентных газоанализаторов с использованием оптического абсорбционного метода / В.А. Алексеев, В.А. Яценко // Радиотехника. – 2006. – Вып 146. – С. 192–197.
7. Осадчук В. С. Оптичний мікроелектронний перетворювач з фототранзистором для контролю плазмохімічних процесів / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Ю. С. Кравченко, О. О. Селецька // Вісник Хмельницького національного університету. – 2009. – № 5. – С. 226–231.
8. Осадчук А.В. Фоточувствительные преобразователи на основе структур с отрицательным сопротивлением : монография / А.В. Осадчук. – Винница : Континент, 1998. – 130 с.

References

1. Osadchuk V. S. Metody vymiryuvannya kontsentratsii haziv / V. S. Osadchuk, O. V. Osadchuk, D. P. Dudnyk // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2011. – № 6. – S. 55–58.
2. Zavadovskiy A. G. Malogabaritnyy lazernyy lokator utechek metana / A. G. Zavadovskiy, I. I. Plyusnin, S. N. Syisoev // Datchiki i sistemyi (Chelyabinskii OUNB). – 2007. – № 4.
3. Y. Shimose, T. Okamoto, A. Maruyama, M. Aizawa, H. Nagai, Remote sensing of methane gas by differential absorption measurement using a wavelength tunable DFB LD, IEEE Photonics Technology Letters. 1991. Volume: 3 Issue: 1. pp.86–87.
4. V. S. Osadchuk, A.V. Osadchuk, “Radiomeasuring Microelectronic Transducers of Physical Quantities”, IEEE, Proceedings of the International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 21–23 May 2015.
5. Kwang-Jow Gan, Kuan-Yu Chun, Wen-Kuan Yeh. Design of Dynamic Frequency Divider using Negative Differential Resistance Circuit. International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication. 2015. Volume: 3 Issue: 8. pp.5224–5228.
6. Alekseev V. A. Opyit sozdaniya perenosnyih mnogokomponentnih gazoanalizatorov s ispolzovaniem opticheskogo absorbtionnogo metoda / V.A. Alekseev, V.A. YAtsenko // Radiotekhnika. – 2006. – Vyip 146. – S. 192–197.
7. Osadchuk V. S. Optychnyi mikroelektronnyi peretvoriuvach z fototranzystorom dlia kontroliu plazmokhimichnykh protsesiv / V. S. Osadchuk, O. V. Osadchuk, Yu. S. Kravchenko, O. O. Seletska // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2009. – № 5. – S. 226–231.
8. Osadchuk A.V. Fotochuvstvitelnyie preobrazovateli na osnove struktur s otritsatelnyim soprotivleniem : monografiya / A.V. Osadchuk. – Vinnitsa : Kontinent, 1998. – 130 s.

Рецензія/Peer review : 9.11.2018 р.

Надрукована/Printed : 19.12.2018 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Петрук В.Г.