

УДК 681.7.068: 681.7: 543.27.08: 681.586.776:621.382

В.С. ОСАДЧУК<sup>1</sup>, В.Ф. ЯРЕМЧУК<sup>2</sup>, О.М. ІЛЬЧЕНКО<sup>1</sup>, С.М. СМІШНИЙ<sup>2,2</sup>

## СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ОПТИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ КОНЦЕНТРАЦІЇ ГАЗІВ

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет  
Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, 21021, Україна,  
Тел.: 59-80-13, E-mail: alenail\_86@mail.ru

<sup>2</sup>Вінницький державний педагогічний університет ім. М. Коцюбинського  
вул. Острозького, 32, Вінниця, 21001, Україна,  
E-mail: ssmishnuu@mail.ru

**Анотація.** Проаналізовано способи підвищення точності та чутливості оптичних перетворювачів концентрації газів. Представлено функціональні схеми волоконно-оптичних перетворювачів концентрації газів з двома каналами, робота яких ґрунтується на принципі оптично-абсорбційного методу, що дозволяють покращити метрологічні характеристики таких перетворювачів концентрації газів. Представлено схеми оптично-частотних перетворювачів, які можуть бути використані при побудові датчиків концентрації газу.

**Аннотация.** Проанализированы способы повышения точности и чувствительности оптических преобразователей концентрации газов. Представлены функциональные схемы волоконно-оптических преобразователей концентрации газов с двумя каналами, работа которых основывается на принципе оптического-абсорбционного метода, что позволяют улучшить метрологические характеристики таких преобразователей концентрации газов. Представлены схемы оптических частотных преобразователей, которые могут быть использованы при построении датчиков концентрации газа.

**Annotation.** The methods of increase of exactness and sensitiveness of optical transformers of gases concentration are analysed. The functional diagrams of the fiber optic transformers of gases concentration with two channels are presented, their work is based on the principle of the optical absorption method, which allows to improve metrology descriptions of such gases concentration transformers. Charts of optical frequency transformers which can be used for the construction of sensors of concentration of gas are presented.

**Ключові слова:** концентрація, газ, волоконно-оптичний, світловод, частотний перетворювач, сонячний елемент, оптичне випромінювання, функція перетворення, транзисторні структури з від'ємним опором.

### ВСТУП

У хімічній та нафто-газовій промисловості, при шахтних виробках, житлово-комунальному секторі, а також у системах призначених для екологічного моніторингу довкілля та ін., широко використовуються оптичні перетворювачі концентрації газів. Тому, розроблення нових чи вдосконалення уже існуючих оптичних газоаналізаторів для вимірювання концентрацій найбільш поширених забруднювачів атмосфери газів (чадний газ, вуглекислий газ, оксид азоту, сірководень, сірчистий газ), вибухонебезпечних газів (метан, бутан, пропан, етилен, ацетилен і ін.), токсичних, агресивних і отруйних газів, залишається актуальним питанням. Точність визначення та контроль у часі газового складу у виробничо-технологічному процесі гарантує відповідну якість проведених робіт, а у робочій зоні – підвищує безпеку праці.

Покращення чутливості вимірювання та підвищення метрологічних характеристик газоаналізатора, автоматично призведе до збільшення точності визначення концентрації аналізованого газу чи суміші газів.

Метою роботи є розроблення та вдосконалення існуючих способів підвищення точності та чутливості оптичних перетворювачів концентрації газів. Вирішити дані завдання можна, зокрема, за рахунок відповідної конструкції приладу, внесенням в схему засобу вимірювання оптичного частотного перетворювача, який дозволяє перетворювати потужність оптичного випромінювання у вихідний сигнал

відповідної частоти, що забезпечує високу завадостійкість (отже, і точність) вимірювання оптичної потужності. Крім того, радіовимірювальні 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 [1]. Це, в свою чергу, доводить їх перевагу над існуючими оптичними сенсорами [2].

### ОСНОВНИЙ ЧАСТИНА

Для визначення якісного та кількісного складу газів використовують, зокрема, оптично-абсорбційний метод. Оптично-абсорбційний метод полягає в здатності газів поглинати інфрачервоні промені в суворо визначених для кожного газу ділянках спектру завдяки наявності коливально-обертальних смуг поглинання [3].

Величина ослабленого потоку випромінювання  $\Phi_i$  і є той параметр, який інформує про концентрацію газу  $C_x$ . Величина ослабленого потоку випромінювання  $\Phi_i$ , що пройшов через вимірювальну кювету з газом, що аналізується, може бути визначена за законом Бугера-Ламберта-Бера, який зв'язує інтенсивності світлових потоків до та після проходження середовища з довжиною  $l$  та концентрацією досліджуваного газу  $C$  [4]:

$$\Phi_1 = \Phi_0 e^{-\alpha_{газ} Cl}, \quad (1)$$

де  $\Phi_0$  - величина потоку випромінювання до проходження досліджуваного середовища комірки;  $\Phi_1$  - величина потоку інфрачервоного випромінювання, що пройшов середовище вимірювальної кювети;  $C$  - концентрація газу у вимірювальному оптичному каналі;  $l$  - довжина поглинаючого шару, що рівна оптичній довжині;  $\alpha_{газ}$  - коефіцієнт поглинання газу, який залежить від ступеня узгодження спектрів поглинання газу, спектральної характеристики джерела інфрачервоного випромінювання і спектральної чутливості приймача інфрачервоного випромінювання.

З рівняння (1) випливає, що вихідна потужності  $\Phi_1$ , при концентрація  $C$ , залежить від довжина поглинаючого шару  $l$ . Тобто збільшуючи оптичну довжину  $l$ , збільшується чутливість засобу вимірювання концентрації газу. Зрозуміло, що існує обмеження збільшення  $l$ , виходячи з визначення мінімально допустимої енергії, яку в змозі фіксувати приймач оптичного випромінювання з заданою пороговою чутливістю та заданими параметрами оптичних вузлів перетворювача, такими як, втрати системи на визначеній довжині хвилі, концентрація досліджуваного газу, тощо [5]. Збільшити оптичну довжину  $l$  можливо, використовуючи видовження самої вимірювальної комірки; використовуючи різні форми дзеркал, причому дзеркал, що не впливають на характеристики оптичного випромінювання (наприклад металевих [6]); за допомогою інтегрованої сфери, де довжина пучка випромінювання, яке проходить через досліджуване середовище, розраховується певним чином (див. [7]).

Формула (1) показує також, що при факторах, які призводять до змін величини потоку випромінювання  $\Phi_0$  та коефіцієнту поглинання газу  $\alpha_{газ}$ , буде змінюватися вихідний сигнал, який і інформує про концентрацію газу  $C_x$ . Тобто, метрологічні характеристики перетворювача знижуються. Висока точність абсорбційного аналізатору може бути забезпечена, якщо стабілізувати світловий потік випромінювача, а для цього потрібно стабілізувати напругу живлення випромінювача, стабілізувати параметри кювети, а також стабілізувати температуру, тиск проби, інтегральну чутливість фотоприймача  $S$ , охолоджувати фотоприймач [8]. Покращення метрологічних характеристик абсорбційного аналізатора відбувається в двоканальних схемах. На рис.1 представлено функціональні схеми волоконно-оптичних перетворювачів з двома каналами.

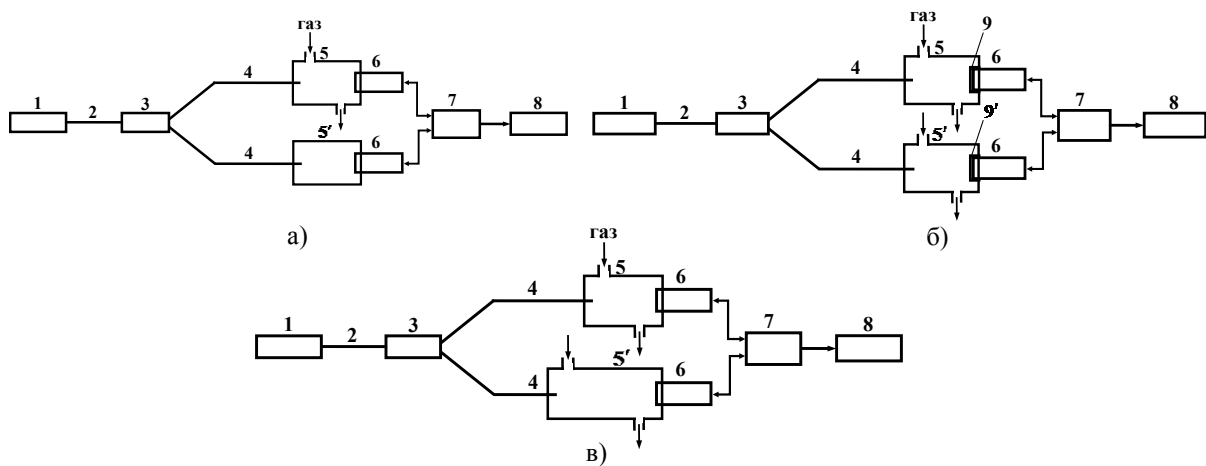


Рис.1. Функціональні схеми волоконно-оптичних перетворювачів з двома каналами (оптично-абсорбційний метод): 1- джерело випромінювання; 2, 4 - світловод; 3 - оптичний розгалужувач; 5- вимірювальна кювета; 5' - порівнювальна кювета 6- приймачі випромінювання; 7- реєструючий пристрій; 8- блок обробки інформації; 9, 9' – спектральні фільтри.

Схема на рис.1,а має порівнювальний канал, що містить відомий склад газів, в якому, зокрема, і міститься певна концентрація вимірювального газу, або ж така концентрація рівна нулю (фактично порівнювальний канал слугує для передачі дестабілізуючого чинника). Порівнюючи отримані сигнали з двох каналів, і оброблюючи їх, знаходять концентрацію шуканого газу. За конструкцією перетворювача зображеного на рис.1,б у обох каналах, в яких на виході вбудовано приймачі випромінювання, присутні спектральні фільтри. Спектральний фільтр 9 вимірювальної кювети 5 виділяє спектральну смугу випромінювання, що відповідає смугі поглинання газу, що аналізується. А спектральний фільтр 9' порівнювальної кювети 5' виділяє спектральну смугу випромінювання, що знаходиться поза смугою поглинання газу, що аналізується. Використовуючи закон Бугера-Ламберта-Бера, визначається концентрація газу у вимірювальній кювету 5. Вимірюється потік випромінювання, що пройшов вимірювальну кювету 5. Оскільки решта компонентів суміші будуть однаково впливати на потоки у каналах, то потік випромінювання, що пройшов порівнювальну кювету 5', слугує опорним сигналом, що відповідає концентрації  $C$  газу - нуль. За формулою (1) знаходять концентрацію газу, використовуючи отримані сигнали. Принцип вимірювання концентрації газів за схемою з різними довжинами каналів (рис.1,в). наступна: оскільки концентрація шуканого газу  $C$  в момент вимірювання у каналах однакова, а оптичні довжини різні ( $l_1$ ,  $l_2$  відповідно), то за відношенням вихідних потоків випромінювання обох каналів, визначається концентрація газу  $C$ .

Дані схеми двоканальних газоаналізаторів в порівнянні з одноканальними значно покращують метрологічні характеристики, оскільки відсутні похибки вимірювання, які пов'язані із зміною потоку випромінювання, збільшення точності вимірювання перетворювача у випадку збільшення неселективних втрат випромінювання, пов'язаних із забрудненням оптичних елементів з часом, досягається за рахунок використання двох плеч. Схеми представлених перетворювачів концентрації газу дозволяють значно спростити сам метод та перевірити справність самих перетворювачів, за присутності газу, на який налаштовано засіб вимірювання, не потребують модуляторів, дзеркал. Наявність світловодів підвищує безпеку використання таких перетворювачів, оскільки випромінювач та приймачі оптичного випромінювання можуть знаходитися, наприклад, поза вибухонебезпечною зоною, а також дає можливість, як для дистанційного так і для локального вимірювання концентрації газу. Підвищується точність вимірювань, оскільки вплив дестабілізуючих факторів (температура, тиск, вологість тощо) істотно послаблюється (обидва канали зазнають однакових впливів). Існує велика кількість методів підвищення точності газоаналітичних вимірювань, що докладно викладені у [8].

Оскільки частотний сигнал є більш чутливим до змін, з'явилася можливість вимірювання малих змін вихідного аналогового сигналу, що в свою чергу дозволяє збільшити точність та чутливість динамічного контролю концентрації газу [9]. Тому в схему вимірювального засобу вноситься оптичний частотний перетворювач, що перетворює оптичний сигнал у частотний, який в свою чергу пропорційний потоку випромінювання, який і характеризує значення концентрації газу. На рис.2 представлено схему оптично-частотного перетворювача, що складається з фотодіодів 3, 4, МДН-фототранзистора 5, МДН-

транзистора 6, конденсаторів 7, 8, резисторів 9, 10, 11, джерело живлення 12 [10]. Вихід пристрою утворений МДН-фототранзистором 5, катодом фотодіода 3,4 і спільною шиною.

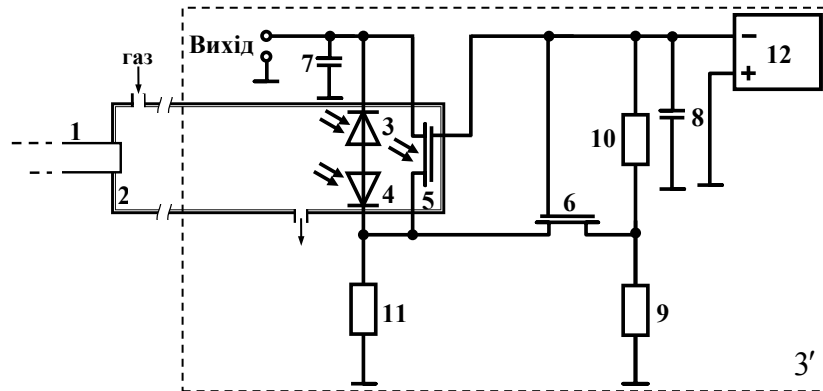


Рис.2. Схема оптичного частотного перетворювача концентрації газу: 1- елемент оптичної системи, з якого виходить потік випромінювання; 2- один з каналів; 3' - оптичний частотний перетворювач.

Зміна інтенсивності світлового потоку викликає зміну еквівалентної індуктивності переходу джерело-витік реактивного МДН-фототранзистора 5 і ємності послідовно з'єднаних першого 3 та другого 4 фотодіодів, в наслідок чого змінюється резонансна частота коливального контуру, що призводить до зміни частоти гармонічних коливань на виході перетворювача. Вибором напруги на виході джерела живлення 12, можна регулювати ступінь лінійності характеристики, тобто здійснювати лінеаризацію функції перетворення.

Використовуючи наступну схему оптично-частотного перетворювача (рис.3) для визначення потужності оптичного випромінювання, можна підвищити чутливість вимірювального перетворювача до зміни оптичної потужності [11].

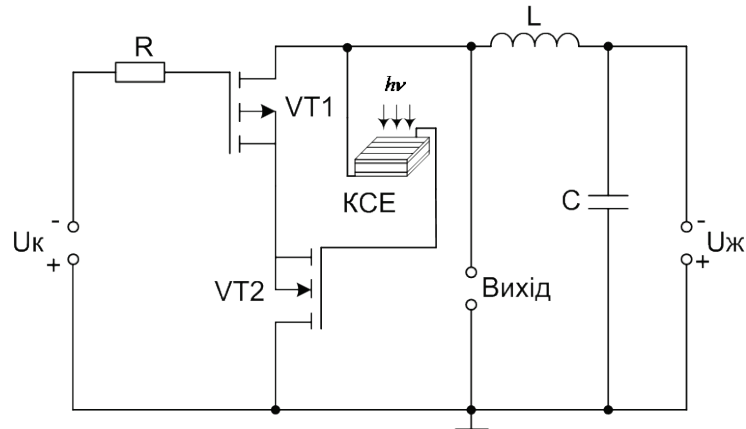


Рис.3. Електрична схема мікроелектронного частотного перетворювача оптичного випромінювання з КСЕ

В даному пристрої потужність оптичного випромінювання однозначно пов'язана з резонансною частотою такої схеми. За допомогою такого підходу можна добитися високої чутливості і точності вимірювання оптичного випромінювання. Перетворювач оптичного випромінювання представляє собою структуру, що складається з двох комплементарних польових транзисторів з ізолюваним затвором. Причому електроди витоків з'єднані між собою, затвор першого польового транзистора VT1 з'єднаний зі стоком другого транзистора VT2. Між стоками транзисторів в результаті додатного зворотного зв'язку виникає повний опір з ємнісним характером і від'ємним значенням активної складової. Підключення зовнішньої індуктивності до затисків стоків транзисторів VT1 і VT2 дозволяє отримати автогенератор електричних коливань. В якості чутливого елемента використано кремнієвий сонячний елемент (КСЕ), який в схемі ввімкнуто в коло затвору транзистора VT2. Потужність падаючого випромінювання на сонячний елемент змінює ємнісну складову повного опору на електродах стік-стік транзистора VT1 і транзистора VT2, а це викликає зміну резонансної частоти коливального контуру, що відображається на вихідному частотному сигналі пристрою [12].

Величина встановленої фотоЕРС при освітленні р-п переходу сонячного елемента випромінюванням постійної інтенсивності описується рівнянням вольт-амперної характеристики (ВАХ):

$$U = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I_{ph} - I}{I_s} + 1 \right), \quad (2)$$

де  $I_s$  - струм насичення;  $I_{ph}$  - фотострум;  $I$  - струм зовнішнього кола.

Експериментальні дослідження оптичного частотного перетворювача (рис.3) проводились на вимірвальній установці, структурна схема якої зображена на рис.4.

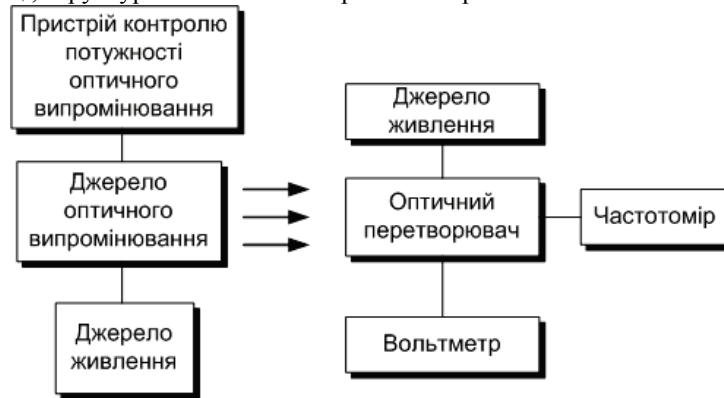


Рис.4. Блок-схема вимірвальної установки

На рис.5 показано ряд експериментальних ВАХ перетворювача в темновому режимі і в режимі дії світловим променем різної потужності на сонячний елемент. Як видно, чим більша потужність світлового випромінювання, тим вище лежить максимум ВАХ. Ділянка від'ємного опору лежить в діапазоні від 4,2 В до 14,5 В напруги живлення.

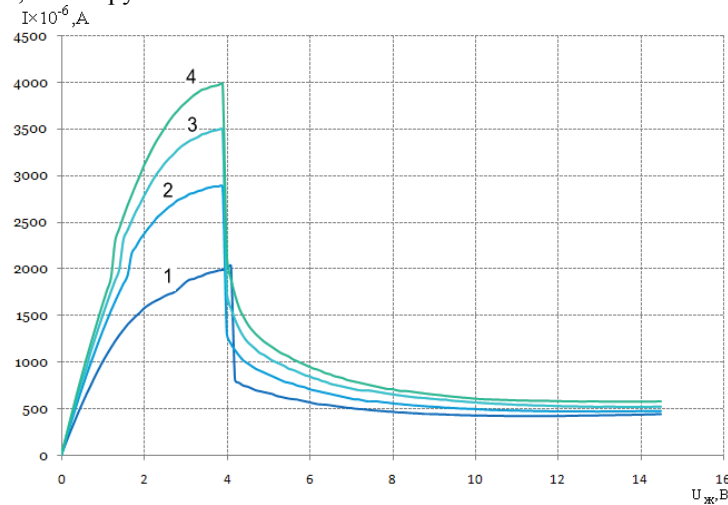


Рис.5. Експериментальна ВАХ перетворювача з КСЕ при різних потужностях оптичного випромінювання ( $U_k=4,2V$ ): 1 –  $P = 0 \text{ мкВт/см}^2$ ; 2 –  $P = 32 \text{ мкВт/см}^2$ ; 3 –  $P = 60 \text{ мкВт/см}^2$ ; 4 –  $P = 120 \text{ мкВт/см}^2$

На рис.6 представлені залежності резонансної частоти від потужності оптичного випромінювання.

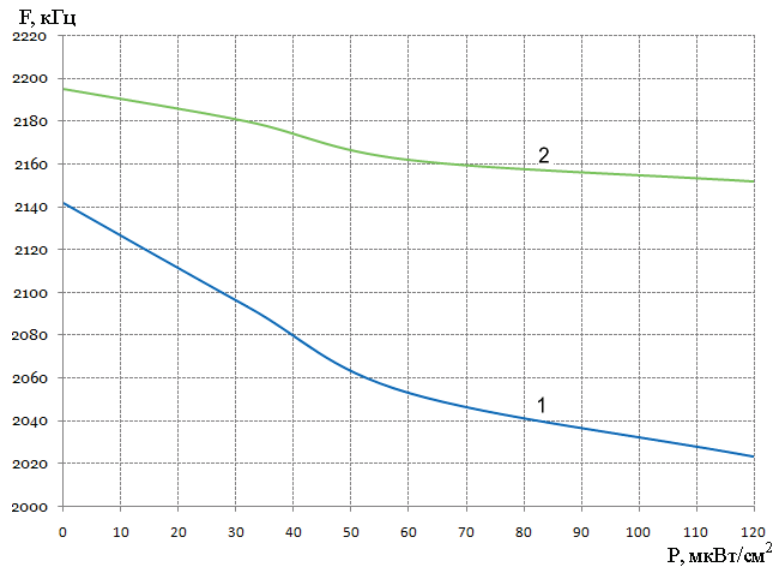


Рис. 6. - Експериментальна залежність частоти генерації перетворювача від потужності оптичного випромінювання ( $U_k=4,2В$ ): 1 –  $U_{ж} = 4,2В$ ; 2 –  $U_{ж} = 8В$

Дослідження показали, що змінюючи режим живлення фоточутливого перетворювача, можна отримати лінійну залежність частоти генерації від потужності падаючого світла. Найбільша зміна частоти генерації спостерігається з напругою живлення 4,2 В.

Отже, показано доцільність використання подібного мікроелектронного перетворювача оптичного випромінювання на основі сонячного елемента в сучасній інформаційно-вимірній техніці, в аерокосмічній, автомобілебудівній галузях, для моніторингу довкілля, зокрема в якості оптичних частотних перетворювачів у газоаналізаторах для підвищення точності вимірювання концентрації газів.

### ВИСНОВКИ

Проаналізовано способи підвищення точності та чутливості оптичних перетворювачів концентрації газів. Представлено функціональні схеми волоконно-оптичних перетворювачів концентрації газів з двома каналами, робота яких ґрунтується на принципі оптично-абсорбційного методу, що дозволяють покращити метрологічні характеристики таких перетворювачів концентрації газів, значно спростити сам метод вимірювання концентрації газу, підвищують безпеку використання та дають можливість як для дистанційного, так і для локального вимірювання концентрації газу.

Представлено схеми оптично-частотних перетворювачів. Запропоновано використання мікроелектронного оптичного частотного перетворювача з покращеними метрологічними характеристиками в розробці приладів, призначених для вимірювання концентрації газів.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Осадчук В.С. Мікроелектронний частотний перетворювача густини оптичної потужності з активним індуктивним елементом / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук, О.М. Ільченко // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2010. - № 2 (20). – С. 210 – 218.
2. Носов Ю.Р. Оптоелектроніка / Ю.Р. Носов – М.: Сов. Радио, 1977. – 231 с.
3. 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.
4. Бахшиев Н. Г. Введение в молекулярную спектроскопию: [учеб. пособие] / Бахшиев Николай Григорьевич. — Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1987. -216с.
5. Яремчук Ф.В. Енергетичний потенціал та умови функціонування волоконно-оптичної системи, призначеної для визначення складу та концентрації газу / Яремчук Ф.В., Кравчук Н.С., Смішний С.М. / Вісник Тернопільського національного технічного університету, №3, 2010. – С. 119-123.
6. Ландсберг Г.С. Оптика: [учеб. пособие для вузов.] / Григорий Самуилович Ландсберг. – [6-е изд., стереот.]. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. - 848 с.
7. Іщенко В. А. Високочутливі засоби контролю малих концентрацій газів: монографія/В. А. Іщенко, В. Г. Петрук. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 152 с.

8. Аналітичні екологічні прилади та системи. — Монографія. / В.А. Порєв, О.А. Дашковський, Я.Л. Миндюк, В.П. Приміський / Під заг. ред. В. А. Порєва. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. —336 с.
9. Визначення вольт-амперної характеристики оптичного частотного перетворювача концентрації газу метану/ В.С. Осадчук, О.В. Осадчук, М.О. Прокопова, Д.П. Дудник//Optoelectronic information – power technologies/Оптико-електронні інформаційно–енергетичні технології. – 2010. –№1(19). –С. 174-180.
10. Пат. України № 41612, МПК<sup>9</sup> G01K 11/00. Мікроелектронний оптичний сенсор температури / Яремчук Ф.В., Кравчук Н.С., Смішний С.М.; заявники та патентовласники Яремчук Ф.В., Кравчук Н.С., Смішний С.М. – №u200900996; заявлено 09.02.2009; опубл. 25.05.2009, Бюл. № 10, 2009р.
11. Пат. України № 55474, H01L 27/00. Мікроелектронний частотний сенсор оптичної потужності / Осадчук В.С., Осадчук О.В., Ільченко О.М.; заявник та патентовласник Вінн. нац. техн. ун-т. - № u201008378; заявл. 05.07.2010; опубл. 10.12.2010, Бюл. № 23.
12. Ільченко О.М. Мікроелектронний частотний сенсор оптичного випромінювання для моніторингу довкілля / Осадчук В.С., Осадчук О.В. / Матеріали II Всеукраїнського з'їзду екологів з міжнародною участю (Екологія/Ecology-2009) // Збірник наукових статей / Вінниця: ФОП Данилюк, 2009. – С. 317 – 320.

Надійшла до редакції 02.04.2011р.

**ОСАДЧУК В.С.** – заслужений діяч науки і техніки України, академік АНУ, д.т.н., професор кафедри електроніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.

**ЯРЕМЧУК В.Ф.** – к.т.н., доцент кафедри фізики, Вінницький державний педагогічний університет ім. М.Коцюбинського, Вінниця, Україна.

**ІЛЬЧЕНКО О.М.** – аспірант кафедри електроніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.

**СМІШНИЙ С.М.** – аспірант кафедри фізики, Вінницький державний педагогічний університет ім. М.Коцюбинського, Вінниця, Україна.