

УДК 658.562.42

**О. В. Осадчук, д-р техн. наук, проф.; С. В. Барабан;
Р. В. Криночкін, канд. техн. наук**

ЗАСІБ ВХІДНОГО КОНТРОЛЮ МОЛЕКУЛЯРНОЇ СТРУКТУРИ НЕКРИСТАЛІЧНИХ НАПІВПРОВІДНИКІВ

Запропоновано апаратно-програмну реалізацію засобу вхідного контролю молекулярної структури некристалічних напівпровідників на основі частотних вимірювальних перетворювачів. Проведено аналіз основних метрологічних характеристик розробленого засобу вхідного контролю.

Вступ

Задача розробки інформаційно-вимірювальних засобів вхідного контролю потребує комплексного підходу — від реалізації апаратної частини (автоматизованого вимірювального обладнання) до розробки комплексу програм користувача та інтегрованої оболонки, що призначена для узгодження апаратної і програмної частин комплексу та керування ними. Наявність останньої особливо актуальна для реалізації концепції відкритого інформаційного засобу, що дозволяє оперативну реконфігурувати його в процесі експлуатації для забезпечення нових можливостей за рахунок як використання стандартного програмного забезпечення інших фірм, так і розробки власних програмних модулів. Крім того, такі засоби повинні забезпечувати зручний інтерфейс для здійснення можливості роботи з ними персоналу, який не обов'язково має професійну підготовку в галузі інформаційних технологій.

Прикладом практичної реалізації відносно недорогого автоматизованого вимірювального засобу може слугувати розроблений мікропроцесорний засіб вхідного контролю. В основі його роботи лежить принцип реєстрації термограм, отриманих з диференційно-термічного аналізу.

Апаратна реалізація засобу вхідного контролю

Апаратна частина забезпечує виконання таких функцій:

- інтерфейс вимірювальних приладів з комп'ютером;
- керування процесом нагрівання печі, керування окремими вимірювальними засобами;
- проведення вимірювання кривих ДТА (термограм).

В установці ДТА за пірометричні перетворювачі для вимірювання диференційної та динамічної температур використовуються частотні вимірювальні перетворювачі на основі реактивних властивостей напівпровідникових структур з частотним виходом. Використання частотних вимірювальних перетворювачів дозволило проводити 1000 вимірювань температури за 1 секунду, що на три порядки більше за аналог. Крім того, частотні перетворювачі на основі ТСВО мають меншу систематичну похибку за термопарні перетворювачі, що дозволило зменшити систематичну похибку визначення структурного перетворення напівпровідника на 0,7 %.

Розроблений засіб вхідного контролю молекулярної структури некристалічних напівпровідників показано на рис. 1. Він реалізує вимірювання температури пікових значень ДТА згідно з виведеним аналітичним виразом [1]. Засіб вхідного контролю містить піч з індуктивним нагрівом. Температура в печі контролюється і регулюється мікроконтролером, частотним вимірювальним перетворювачем, індуктивним нагрівачем, драйвером керування індуктивним нагрівачем. За однакової температури двох зразків, що знаходяться у тиглях в печі, вихідний сигнал буде рівний нулю, а якщо відбуваються ендо- і екзотермічних реакції в досліджуваному зразку, на термограмі за відповідних температур з'являються піки, направлені в протилежні сторони. Для контролю температури досліджуваного зразка і еталонного зразка використовуються безконтактні перетворювачі температури з частотним виходом. В розробленому засобі вхідного контролю (див. рис. 1) використовуються частотні вимірювальні перетворювачі на основі піроструктури та Бі-МОН транзисторної структури з від'ємним опором.

На рис. 2 показано електричну схему засобу вхідного контролю молекулярної структури некристалічних напівпровідників.

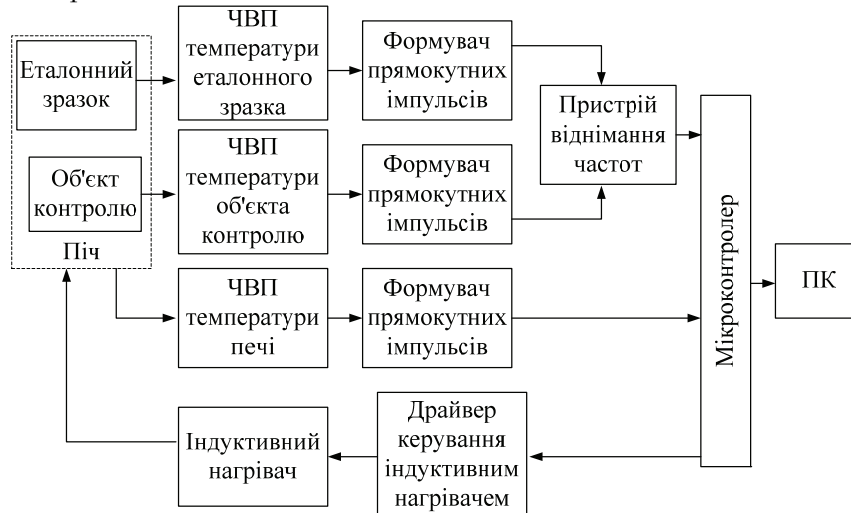


Рис. 1. Структурна схема засобу вхідного контролю молекулярної структури некристалічних напівпровідників

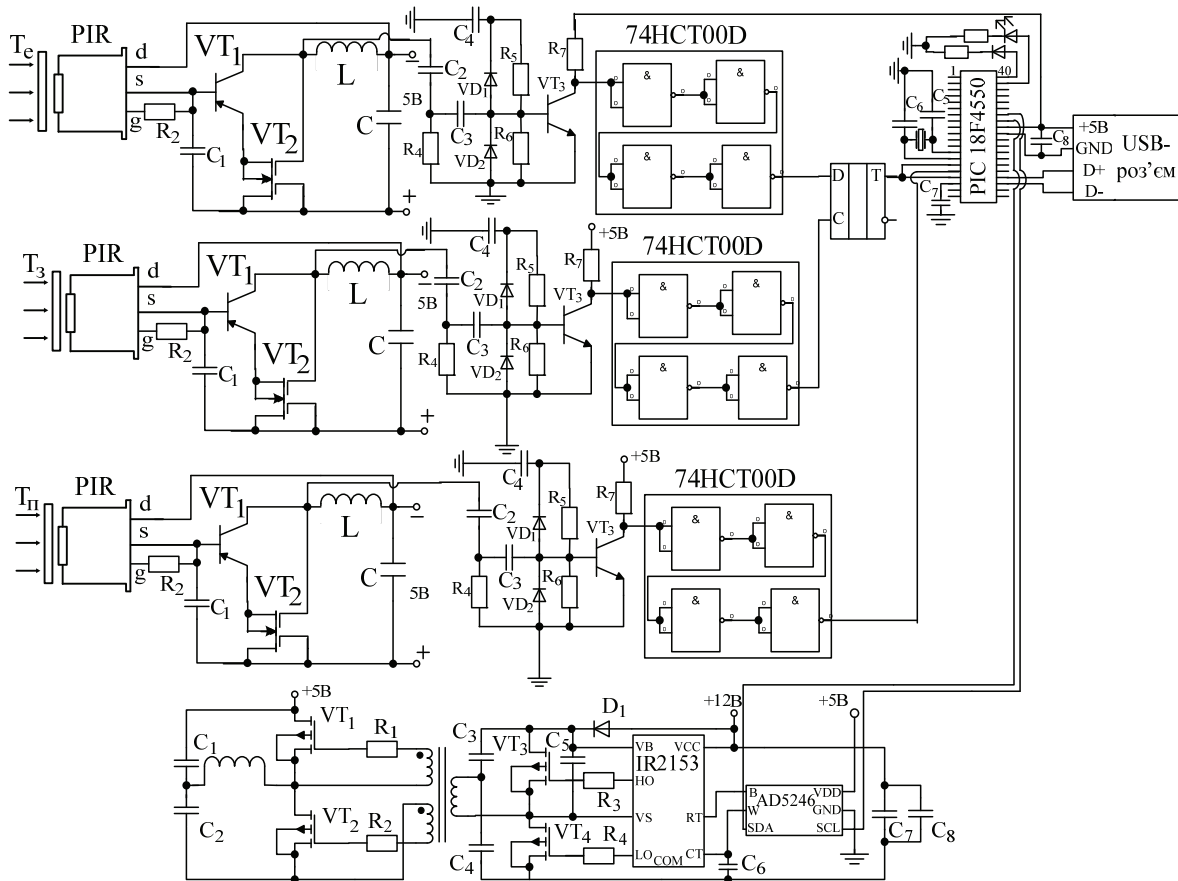


Рис. 2. Електрична схема засобу вхідного контролю молекулярної структури некристалічних напівпровідників

Спеціалізоване програмне забезпечення засобу вхідного контролю

Використання інформаційних технологій для вхідного контролю не тільки дозволяє підвищити його ефективність, але й забезпечити додаткові можливості для ефективного керування підприємством.

Вхідний контроль завжди відносився до першочергових заходів, які слугують для забезпечення необхідної якості готових виробів. Проте, в сучасних умовах необхідно змінювати сам підхід до реалізації вхідного контролю. Тепер вже недостатньо простого відбракування комплектуючих виробів за принципом «придатний — не придатний». Одним з ключових елементів організації вхідного контролю є увімкнення в нього елементів діагностики, що дозволяють виявляти потенційно ненадійні вироби. Проте для проведення ефективної діагностики необхідно проводити обробку більшої кількості даних, які накопичуються за деякий проміжок часу. Введення елементів діагностики під час вхідного контролю потребує використання спеціалізованої інформаційної системи для організації вхідного контролю на підприємстві. Така інформаційна система в загальному випадку має включати такі складові елементи:

- базу даних, яка б забезпечувала накопичення даних, отриманих під час випробувань дослідних зразків на вхідному контролі;
- спеціалізоване вимірювальне обладнання, що містить інтерфейс з персональним комп'ютером для забезпечення взаємодії з базою даних;
- комплекс програмних засобів, що забезпечують керування вимірювальним обладнанням, обмін даними з зовнішніми пристроями, а також візуалізацію, математичну обробку і документування інформації, отриманої в результаті вимірювань і накопиченої в базі даних.

Розробка такого роду інформаційних систем є непростю задачею. Складність її зумовлена як необхідністю керуванням різнорідними і різноформатними даними, так і тим, що вимірювальне обладнання, яке забезпечує можливість взаємодії з сучасною обчислювальною технікою, практично відсутнє на підприємствах України, а вартість такого обладнання, що випускається зарубіжними виробниками, занадто висока.

Програмне забезпечення розробленого мікропроцесорного засобу контролю виконує функцію керування вимірювальним комплексом і містить чотири групи програм:

- програми для керування блоками вимірювального комплексу під час проведення вимірювань, а також для виконання первинної обробки результатів вимірювання і передачу їх на ПК;
- програми, які керують мікропроцесором, а також виконують додаткову математичну обробку отриманих результатів вимірювання з метою підвищення вірогідності контролю (обрахунок критерію Фішера, t -критерію) і заносять отримані результати в базу даних;
- програми, призначені для роботи з результатами вимірювань, що зберігаються в базі даних, включно з візуалізацією, статистичною обробкою і документуванням;
- програмне середовище, що інтегрує різнорідні апаратні і програмні засоби в єдине інформаційне середовище.

Перші дві групи програм спеціалізованого програмного забезпечення призначені для виконання на мікропроцесорі, що входить до складу системи, дві інші групи програм працюють під керуванням ПК.

Розроблене для мікропроцесорної системи контролю спеціалізоване програмне забезпечення дозволяє реалізувати наступні задачі:

- відбракувати зразки некристалічних напівпровідників, що не відповідають технічним умовам;
- робити висновок про придатність або непридатність партії некристалічних напівпровідників, що потрапили для виробництва приладів;
- здійснювати оптимальний вибір постачальників некристалічних напівпровідників.

Показаний на рис. 1 засіб контролю використано для дослідження молекулярного складу плівок аморфного селеніума, отриманих низькотемпературним процесом фотозаміщення. Нагрівання печі 6 (рис. 1) проводилось від -50 до 250 °С з постійною швидкістю 5 °С за хвилину. На рис. 3 показано вікно розробленого інформаційного додатку для засобу вхідного контролю, на якому подано результат досліджень — отриману термограму частотним методом з використанням розроблених частотних вимірювальних перетворювачів з від'ємним опором.

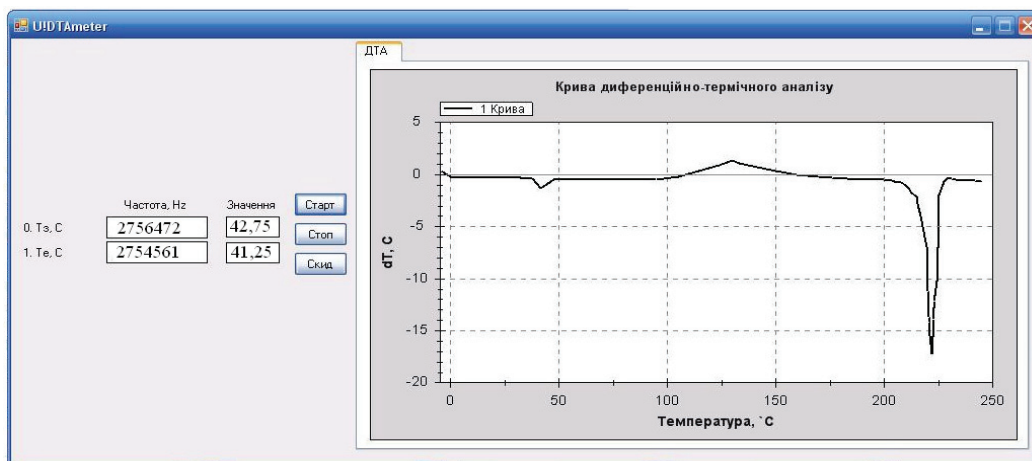


Рис. 3. Вікно розробленого спеціалізованого програмного забезпечення засобу вхідного контролю молекулярної структури некристалічних напівпровідників

Аналіз метрологічних характеристик засобу вхідного контролю

У статті [1] знайдено аналітичне та графічне представлення функції перетворення частотно-вимірювального перетворювача. Вихідним сигналом розробленого вимірювального перетворювача є частота. Знайдемо характеристику перетворення частоти в код мікроконтролера. Вихідний сигнал частотно-вимірювального перетворювача через буфер потрапляє до основного 16-бітного лічильника мікроконтролера, що періодично отримує сигнали скиду від другого лічильника, що використовується в якості часової бази, і формує так звані «часові ворота». Попередньо перед скидом підраховані значення основного лічильника записуються до оперативної пам'яті. Після цього проводиться операція ділення підрахованої кількості імпульсів на час підрахунку – отримане значення і буде шуканою частотою. Принцип формування часових воріт полягає в такому. Тактова частота мікроконтролера задається за допомогою під'єднання відповідного кварцового резонатора. Лічильник часової бази, що підраховує імпульси від внутрішнього тактового генератора, збільшується на 1 за час T_{CY} . Таким чином, кількість підрахованих на виході лічильника імпульсів за час вимірювання $t_{ВИМ}$ буде дорівнювати

$$N = \frac{t_{ВИМ}}{T_{CY}} = F(T) \cdot t_{ВИМ} \quad (1)$$

З формули (1) знайдемо аналітичний вираз для статичної характеристики засобу вхідного контролю структурно-чутливих параметрів некристалічних напівпровідників.

$$N = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_{je} (1 + M_{je} (0,0004(T - T_0) + 1 - U_{je}(T)/U_{je})) (1 - U_{\delta e}/U_{je}(T))^{-M_{je}} + \dots}{C_{je} (1 + M_{je} (0,0004(T - T_0) + 1 - U_{je}(T)/U_{je})) (1 - U_{\delta e}/U_{je}(T))^{-M_{je}} \dots}} = \sqrt{\frac{\dots + C_{jc} (1 + M_{jc} (0,0004(T - T_0) + 1 - U_{jc}(T)/U_{jc})) (1 - U_{\delta k}/U_{jc}(T))^{-M_{jc}}}{\dots \cdot C_{jc} (1 + M_{jc} (0,0004(T - T_0) + 1 - U_{jc}(T)/U_{jc})) (1 - U_{\delta k}/U_{jc}(T))^{-M_{jc}} \cdot L_{ЕКВ}}} \cdot t_{ВИМ} \quad (2)$$

$$\text{де } U_{je}(T) = U_{je} T/T_0 - 3(kT/qs) \ln(T/T_0) - E_G T/T_0 + E_{G0} - aT^2/(T+b);$$

$$U_{jc}(T) = U_{jc} T/T_0 - 3(kT/qs) \ln(T/T_0) - E_G T/T_0 + E_{G0} - aT^2/(T+b).$$

Підставивши у вираз (2) числові значення і провівши обчислення, отримано статичну характеристику, графічне відображення якої показано на рис. 4.

Похибка, яка виникає внаслідок неідеальності перетворення частоти в кількість імпульсів у мікроконтролері, становить похибку квантування засобу вхідного контролю структурно-чутливих параметрів некристалічних напівпровідників і є однією з основних метрологічних характе-

ристик розробленого засобу контролю [2]. Вона, в свою чергу, складається з трьох основних частин — похибки міри, що виникає від нестабільності джерела часової міри, похибки дискретності, що є різницею між часом появи імпульсів на вході лічильника частотоміра і часом видачі строб-імпульсу «часових воріт», тобто старту і зупинці циклу підрахунку, похибка розрядності, яка виникає через обмежену розрядність лічильника та мікроконтролера.

Похибка часової міри — це фактично не точність визначення проміжку часу за який проводиться підрахунок. Зважаючи на метод вимірювання часу за допомогою тактового сигналу очевидно, що основною впливовою складовою похибки міри (за умови використання програмного калібрування) є нестабільність кварцового генератора, як джерела тактових імпульсів. Відносна похибка за частотою, що вноситься за рахунок нестабільності генератора з кварцовим частотозадавальним елементом складає звичайно близько $10^{-6} \dots 10^{-7}$, тому нею можна знехтувати.

Похибка розрядності δ_p виникає при виконанні обчислювальних операцій через обмеженість розрядності мікроконтролера [3]

$$\delta_p = 2^{-n} \cdot 100 \% = 2^{-16} \cdot 100 \% = 0,0015 \% . \quad (3)$$

Похибка квантування в електронно-лічильних частотомірах не перевищує по абсолютному значенню одного імпульсу молодшого розряду лічильника, а її відносне значення визначається за формулою

$$\delta_{\text{кв}} = \frac{1}{F \cdot t_{\text{вим}}} \cdot 100 \% = \frac{1}{N} \cdot 100 \% . \quad (4)$$

Виконавши підстановку статичної характеристики (1) у вираз для знаходження похибки квантування (4), можна отримати графічне представлення залежності похибки квантування від пікових значень ДТА некристалічних напівпровідників (рис. 5).

Як видно з графіка рис. 5 найменше значення похибки квантування становить 0,015 %. Клас точності приладу $1,5 \cdot 10^{-n}$, $n = 2$. Знайдемо найменше значення температури на яке буде реагувати розроблений засіб вхідного контролю. Для цього необхідно скористатися виразами (1) і (4). Поріг чутливості для розробленого засобу вхідного контролю T_{min} буде визначатися з наступної рівності

$$0,015 \% = \frac{1}{N(T_{\text{min}})} \cdot 100 \% , \quad (5)$$

де $N(T_{\text{min}})$ підставляється з формули (1). При цьому усі T у виразі (1) замінюються на T_{min} .

Аналітичний вираз для T_{min} з рівняння (5) не може бути знайдений через складність формули для статичної характеристики (1). Проте сучасна обчислювальна техніка дозволяє

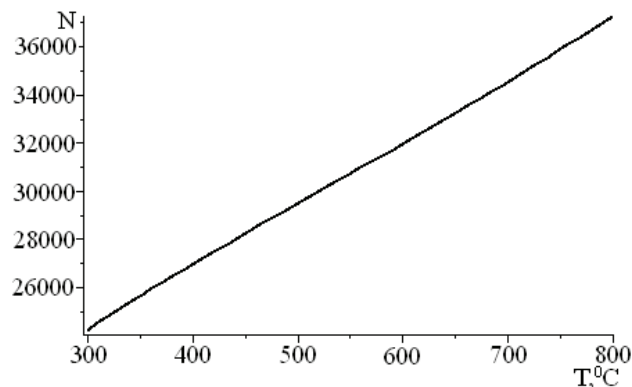


Рис. 4. Статична характеристика засобу вхідного контролю структурно-чутливих параметрів некристалічних напівпровідників

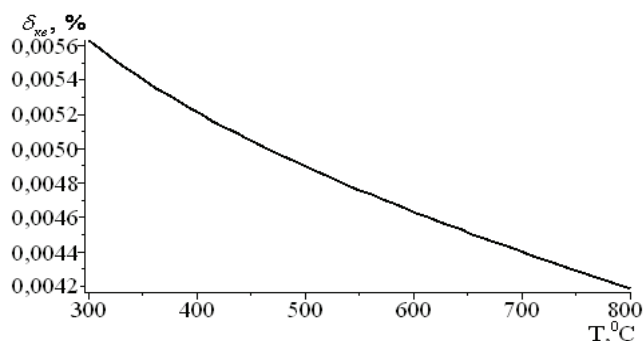


Рис. 5. Залежність похибки квантування засобу вхідного контролю молекулярної структури некристалічних напівпровідників від температури

знайти розв'язок для T_{\min} чисельними методами. Поріг чутливості розробленого засобу вхідного контролю становить $1,073$ °С.

Верхня межа вимірювання пікових значень ДТА розробленим засобом T_{\max} визначається з виразу

$$N(T_{\max}) = 2^{15,6} - 1, \quad (6)$$

де $N(T_{\max})$ підставляється з формули (1). При цьому усі T у виразі (1) замінюються на T_{\max} .

Аналогічно до порогу чутливості аналітичний вираз для T_{\max} з рівняння (6) не може бути знайдений через складність формули для статичної характеристики (1). Проте сучасна обчислювальна техніка дозволяє знайти розв'язок для T_{\max} чисельними методами.

Верхня межа вимірювання розробленим засобом вхідного контролю структурно-чутливих параметрів некристалічних напівпровідників становить $1125,056$ °С.

Знаючи верхню та нижню межі вимірювань, знайдемо крок квантування запропонованого засобу для вхідного контролю

$$\Delta T = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2^{15,6} - 1}. \quad (7)$$

Крок квантування ΔT з виразу (7) буде становити $0,0226$ °С.

Визначимо похибки, які виникають під час процесу перетворення частоти в цифровий код. Похибка нестабільності кварцового генератора для USB-частотоміра дорівнює $\delta_{\text{н}} = 0,003$ %.

$$\delta_{\text{з.к.}} = \delta_{\text{кв}} + \delta_{\text{р}} + \delta_{\text{н}}. \quad (8)$$

Сумарна похибка засобу вхідного контролю молекулярної структури некристалічних напівпровідників визначається з виразу (8) і складає $0,019$ %.

Висновки

Розроблено мікропроцесорний засіб вхідного контролю молекулярної структури некристалічних напівпровідників на основі частотних вимірювальних перетворювачів. У результаті математичного моделювання отримано статичну характеристику засобу вхідного контролю молекулярної структури некристалічних напівпровідників. Показано, що статична характеристика запропонованого засобу лінійна. Експериментально доведено, що похибка між результатами математичного і фізичного моделювання не перевищує 5 %. Зі статичної характеристики засобу вхідного контролю визначено, що похибка квантування $\delta_{\text{кв}}$ змінюється від $0,0031$ % до $0,015$ % в робочому діапазоні температур, поріг чутливості T_{\min} становить $1,073$ °С, верхня межа вимірювання T_{\max} складає $1125,056$ °С, поріг квантування ΔT дорівнює $0,0226$ °С.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Осадчук О. В. Математична модель автогенераторного засобу для визначення фазових перетворень твердих матеріалів / О. В. Осадчук, С. В. Барабан, А. О. Семенов // Вісник Хмельницького національного університету. — 2012. — № 1. — С. 120—125. — ISSN 2226-9150.
2. Электрические измерения : учеб. для вузов / [Л. И. Байда, Н. С. Добротворский, Е. М. Душин и др.]; под ред. А. В. Фремке и Душина Е. М. — Л. : Энергия, 1980. — 392 с.
3. Райс В. Как работают аналогово-цифровые преобразователи и что можно узнать из спецификации на АЦП? [Электронный ресурс] / В. Райс // Компоненты и технологии. — 2005. — № 3. — Режим доступа : http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/05_03/stat_adc.htm

Рекомендована кафедрою радіотехніки

Стаття надійшла до редакції 5.11.12

Рекомендована до друку 13.11.12

Осадчук Олександр Володимирович — завідувач кафедри, **Барабан Сергій Володимирович** — асистент, **Кринович Роман Володимирович** — старший викладач.

Кафедра радіотехніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця