

УДК 536.55+681.7.068

Р.П. Самченко,
Б.І. Стадник, д-р техн. наук

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ ТОЧКОВОГО ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ МЕДИЧНИХ НАНОКОМПОЗИТІВ В ПРОЦЕСІ ЇХ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВАННЯ

Проводиться огляд найбільш поширених волоконно-оптичних перетворювачів для здійснення вимірювань температури композитів гідрогелю та магнітних наночастинок під час їх нагрівання магнітним полем. Розглянуто необхідне обладнання для реалізації вимірювань, чутливість та точність вимірювальних систем на основі таких перетворювачів.

Ключові слова: волоконно-оптичні перетворювачі температури, сенсори, магнітна гіпертермія, вплив магнітного поля, індукційне нагрівання.

R.P. Samchenko,
B. I. Stadnyk, ScD.

REVIEW OF FIBER OPTIC SENSORS FOR POINT TEMPERATURE MEASUREMENT DURING INDUCTION HEATING OF MEDICAL NANOCOMPOSITES

In this paper are considered most widespread fiber optic sensors for temperature measurements in plant for estimation of thermal properties of hydro gel with magnetic nano particles composites that are used for cancer treatment combining hyperthermia and chemotherapy methods. Necessary equipment for measurements realization, sensitivity and accuracy of measurement system are studied.

Keywords: fiber optic temperature sensors, magnetic hyperthermia, magnetic field influence, induction heating.

Р.П. Самченко,
Б.І. Стадник, д-р техн. наук

ОБЗОР ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ТОЧЕЧНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕДИЦИНСКИХ НАНОКОМПОЗИТОВ В ПРОЦЕССЕ ИХ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Проводится обзор наиболее распространенных волоконно-оптических преобразователей для осуществления измерений температуры композитов гидрогеля и магнитных наночастиц во время их нагрева переменным магнитным полем. Рассмотрено необходимое оборудование для реализации измерений, чувствительность и точность измерительных систем на основе таких преобразователей.

Ключевые слова: волоконно-оптические датчики температуры, магнитная гипертермия, влияние магнитного поля, индукционный нагрев.

Вступ. Попередні публікації – [1] та [2] – стосувались загального опису використання композитів гідрогелів та феромагнітних наночастинок при лікуванні онкологічних захворювань, типів, матеріалів таких композитів, структури установки для вимірювання їх температурно-залежних характеристик, загальна схема якої зображена на рис. 1, огляду напрямку, а також математичних моделей, які дають змогу проводити розрахунок нагрівання таких композитів для лабораторних та клінічних досліджень.

При індукційному нагріванні створюється змінне магнітне поле, яке спричиняє завади при вимірюванні температури термометрами з термоелектричними та терморезистивними чутливими елементами, а також може зумовити нагрівання самого термометра, зумовлюючи додаткову теплову похибку.

© Самченко Р.П., Стадник Б.І., 2012

Використання волоконно-оптичних перетворювачів дає змогу виключити вплив магнітного поля на термоперетворювач.

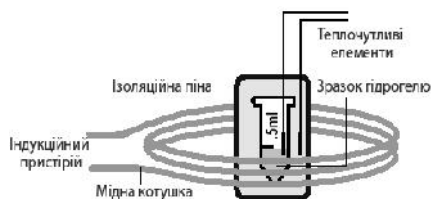


Рис. 1. Схема агрегату для дослідження радіочастотного нагрівання композитів на основі гідрогелю та феромагнітних наночастинок (ФМНЧ) [1]

З огляду на невеликі розміри капсули у дослідній установі (близько 5 мл) можливо припустити швидке поширення та рівномірний розподіл температури, тому доцільно використовувати термоперетворювачі для точкового вимірювання температури. Додатковими вимогами є відсутність у перетворю-

вачі феромагнетиків, які могли б нагріватись змінним магнітним полем, малі габарити первинного перетворювача та його водонепроникність. Вимірювання температури проводитиметься у діапазоні від 20 до 60°C. Перетворювач повинен мати якомога вищу роздільну здатність та точність (менше 0,5 К) у цьому діапазоні та невисоку вартість

Різновиди волоконно-оптичних перетворювачів. Більшість промислових вимірювань температури виконуються за допомогою таких традиційних термометрів, як термомари, термоопори та термістори. Проте використання звичайних термоперетворювачів часто обмежене, особливо за таких умов [3]:

є необхідність покриття великих відстаней у випадку розподіленого вимірювання температури;

потрібно інтегрувати велику кількість термоперетворювачів для моніторингу складних систем, температурних полів або чи їх градієнтів;

електромагнітні завади суттєво зменшують відношення сигнал/шум;

вибухонебезпечні середовища унеможливають використання електричних приладів;

необхідне використання легковагових систем та устаткування для моніторингу з малим впливом маси.

Особливо за цих умов волоконно-оптичні перетворювачі виявляють весь свій потенціал. Проте, залежно від поставленого завдання, можна використовувати різноманітні типи сенсорів. Найбільш поширеними серед них [3, 4]:

волоконно-оптичні перетворювачі на основі ґраток Брегга (*Fiber Bragg Gratings*), у яких використовується температурна залежність оптичного відбивання;

зовнішні інтерферометричні оптичні структури, властивості яких температурно-залежні;

перетворювачі на Раманівському розсіюванні для розподіленого вимірювання температури, у яких використовують температурну залежність нееластичного розсіювання оптичними фононами;

перетворювачі на Бріллюенівському розсіюванні, з використанням розсіювання на акустичних фононах;

напівпровідникові перетворювачі, принцип дії яких ґрунтується на явищі температурної залежності ширини забороненої зони напівпровідникових кристалів;

волоконно-оптичні перетворювачі на основі явища флуоресценції.

Виробники таких перетворювачів також повідомляють про можливість клінічного застосування волоконно-оптичних термометрів, завдяки мініатюрним та безпечним конструктивним виконанням.

Напівпровідникові перетворювачі, принцип дії яких ґрунтується на явищі температурної залежності ширини забороненої зони напівпровідникових кристалів

У таких перетворювачах на вимірювальному кінці закріплено напівпровідниковий кристал. При вимірюванні відбитого кристалом світла, що випромінюванюється широкосмуговим джерелом, спостерігається зміщення краю зони власного поглинання в залежності від температури, як це зображено для кристалу арсеніду галію на рис.2 [4].

Існує цілий ряд напівпровідникових матеріалів, напр. арсенід галію (GaAs), фосфід індію (InP), кремній (Si) і т.д., край зони власного поглинання яких перебуває в спектральній області прозорості кварцових оптоволокон у діапазоні довжин хвиль $\lambda=(0,6 \dots 1,6)$ мкм [5].

Температурна залежність зміни ширини забороненої зони ε_g описується параметром χ [5]:

$$\chi = \frac{d\varepsilon_g}{dT} \quad (1)$$

Довжина хвилі λ_g , пов'язана з шириною забороненої зони, обчислюється [5]:

$$\lambda_g = hc/\varepsilon_g \quad (2)$$

де h – стала Планка, c – швидкість світла у вакуумі. Звідси коефіцієнт температурного зсуву краю зони власного поглинання

$$k = \frac{d\lambda_g}{dT} = \frac{hc}{\varepsilon_g^2} \cdot \frac{d\varepsilon_g}{dT} \quad (3)$$

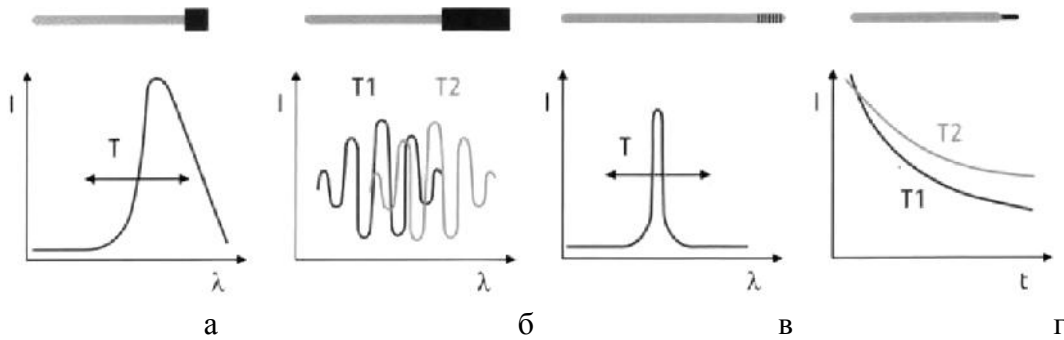


Рис. 2. Вимірювані величини та їх температурні залежності для деяких типів волоконно-оптичних перетворювачів: Перетворювачі:

а – напівпровідникового; б – зовнішнього інтерферометричного на основі резонатора Фабрі-Перо; в – ґратки Брегга; г – сенсор на основі явища флуоресценції: I – інтенсивність світіння, λ – довжина хвилі, t – час, T – температура [4]

Типові значення k лежать у діапазоні 0,1 – 0,4 нм/К, а порогова чутливість при використанні сучасних спектроаналізаторів сягає 0,1 К [5]. Перетворювачі переважно застосовуються в діапазоні температур від -40 до +250 °С, мають малий час реакції (0,01–0,5 с). Можливі їх мініатюрні конструктивні виконання (діаметром близько 1 мм) [6, 7]. Виробник Neoptix повідомляє про можливість вимірювання його перетворювачами наднизьких температур від мінус 272°С [8].

Основні елементи системи вимірювання виділені на схемі на рис. 3: широкосмугове джерело світла, оптичний чутливий елемент, оптичний аналізатор спектра.

Вимірювання температури волоконно-оптичними перетворювачами на основі явища флуоресценції.

Принцип дії таких волоконно-оптичних перетворювачів ґрунтуються на вимірюванні залишкової температурно-залежної флуоресценції. Лінійні її температурні залежності характерні для рідкоземельних елементів, наприклад європію, ербію [5]. При дії на них випромінювання виникає флуоресцентне випромінювання у вищому діапазоні довжин хвиль, тривалість якого i є температурно-залежною. Посилання короткотривалих імпульсів джерелом світла (світлодіодом, ксеноновою лампою) та оцінка тривалості експоненційно спадаючого флуоресцентного світіння дає змогу виміряти температуру чутливого елемента [5, 9, 10].

На рис 2 та 5 зображено типову залежність інтенсивності світіння від часу. Зліва на графіку рис. 5 видно, що збуджуючий світловий імпульс викликав післясвітіння, за тривалістю якого i визначають температуру. Для виготовлення перетворювачів використовують флуоресцентні матеріали, які мають порівняно довге післясвітіння (>1 мкс). Так уникають необхідності використання високошвидкісних електронних компонентів у вторинному приладі.



Рис. 3. Схема вимірювання температури за допомогою напівпровідникових перетворювачів на основі кристалу арсеніду галію GaAs (Виробник OPSSENS) [6]

Існує багато методів математичного опрацювання сигналу для точнішого вимірювання температури такими перетворювачами, наприклад двохточковий, інтегральний, апроксимаційний та ін. [10]. Приклад двохточкової техніки зображено на рис. 5.

На сьогодні доступні у продажу ВОП температури для вимірювань у діапазоні

від -45 до +200 °С [9, 11] з точністю до ± 0,02°С. Можливе також розширення діапазону вимірювання до 600 °С при використанні рубіну як матеріалу чутливого елемента [10]. Метрологічні та вартісні переваги також має використання їх як безконтактних термометрів (рис.4) [11].

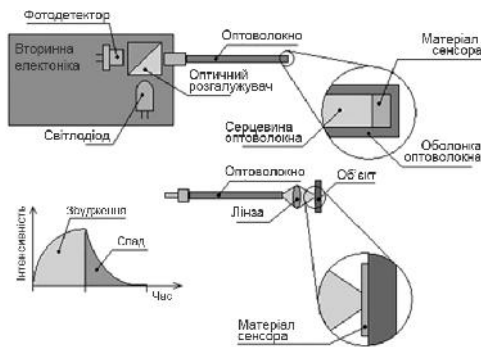


Рис. 4. Схема контактної (зверху) та безконтактної (знизу) вимірювання температури на основі явища флуоресценції та графік вимірюваного сигналу [11]

Перевагою перетворювачів також є їх нижча ціна у порівнянні з іншими волоконно-оптичними перетворювачами. Недоліком таких сенсорів – мала допустима довжина оптичного тракту та загальна складність фотореєструючого устаткування, як зумовлені низькою потужністю флуоресцентного випромінювання [5]. Допустима довжина волоконно-оптичної лінії перетворювача є порівняно невеликою (близько 10 м).

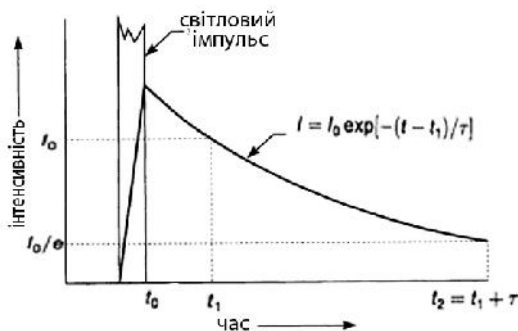


Рис. 5. Типова залежність інтенсивності світіння флуоресцентного матеріалу перетворювача від часу [10]

Вимірювання температури за допомогою перетворювачів з ґратками Брегга.

При проходженні світла через волоконно-оптичні ґратки Брегга (ВГБ) (*Fiber Bragg Gratings*– FBG), які нанесені на сердцевину оптоволокна, відбувається відбивання певної смуги зі спектру широкосмужового джерела світла, як це зображено на рис. 6. Волоконно-оптичні ґратки Брегга формуються через періодичну зміну показника заломлення у сердцевині оптоволокна з періодом Λ . Вплив температури чи деформації на ефективний показник заломлення, зумовлює зміщення відбитої смуги.

Зміщення смуги відбивання відбувається внаслідок трьох ефектів [3]:

зміни форми через деформації, спричинені або механічним напруженням σ або зміною температури ΔT ;

зміни коефіцієнта заломлення зумовленої розтягом (фотоеластичний ефект);

зміни коефіцієнта заломлення через зміну температури (термооптичний ефект).

Вираз, поданий нижче, називається резонансом, або умовою Брегга [3, 5]

$$\lambda_B = 2n_{ef}\Lambda, \quad (4)$$

де n_{ef} – ефективний показник заломлення моди оптоволокна; λ_B – центральна довжина хвилі спектру відбивання; Λ – просторовий період зміни показника заломлення.

Зміни довжини відбитої хвилі розраховується як відношення загальної похідної до відповідного параметра. Приймаючи ізотропні та однорідні властивості кварцового оптоволокна, похідна для визначення температури [3, 12]

$$\frac{\Delta\lambda_{B,T}}{\lambda_B} = \frac{1}{\lambda_B} \frac{d\lambda_B}{dT} = \frac{1}{n_{ef}} \frac{\partial n_{ef}}{\partial T} - \frac{\partial n_{ef}^2}{\partial T} (p_{11} + 2p_{12})\alpha_T + \alpha_T, \quad (5)$$

де $\Delta\lambda_{B,T}/\lambda_B$ – відносна зміна центральної довжини хвилі при зміні температури на 1 К; dn_{ef}/dT – термооптичний коефіцієнт; p_{11} та p_{12} – коефіцієнти Покельса, які характеризують фотоеластичний ефект; α_T – коефіцієнт теплового розширення матеріалу оптоволокна. У [3] наближено розраховано спектральну температурну чутливість ґраток Брегга, яка сягає 10,5 пм/К на довжині хвилі 1550 нм.

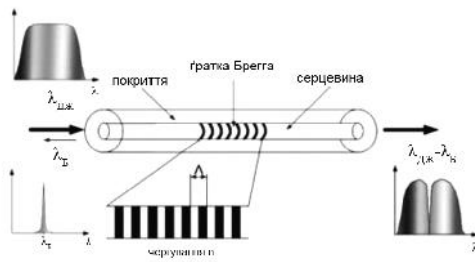


Рис. 6. Структура волоконно-оптичного перетворювача на ґратках Брегга та спектри джерела, а також пропущеного та відбитого ним світла

На сьогодні опубліковано численні схеми опитування таких перетворювачів. Більшість з них ґрунтуються на відбиванні енергії чутливим елементом, часто комбінуються з алгоритмом пошуку піків, для знаходження піку Бреггівського відбивання. Спектральна роздільча здатність таких аналізаторів сигналу ВГБ сягає пікометра, яка разом із чутливістю перетворювача дозволяє досягти роздільчої здатності вимірювання температури близько 100 мК [3]. Діапазони вимірювання доступних у продажі ВОП на основі ґраток Брегга зазвичай лежать в межах від -70 до +300 °С. На рис. 7 зображено загальну структурну схему вимірювання температури та розтягу за допомогою волоконно-оптичних ґраток Брегга.

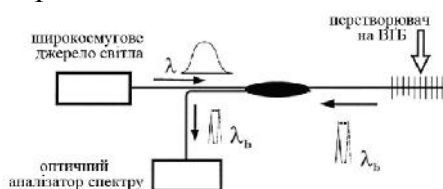


Рис. 7. Схема вимірювання температури за допомогою волоконно-оптичних перетворювачів на ґратках Брегга [13]

Основною особливістю такого типу перетворювачів є можливість створення багатьох спектрально-розподілених перетворювачів на ґратках Брегга на одному і тому ж оптоволокну, що дозволяє проводити квазі-розподілене вимірювання температури [3, 4]. Існують також мініатюрні конструктивні виконання перетворювачів. Недолік такого типу перетворювачів полягає у необхідності використання в схемах вимірювання високоточних спектрометрів, що відбивається на

вартості системи. Відносно розтягу такі перетворювачі мають більшу чутливість ніж до температури, відтак при вимірюванні температури потрібно запобігати зовнішнім деформаціям перетворювача. З цією метою перетворювачі фіксуються на підкладках або у корпусі.

Вимірювання температури з зовнішнім інтерферометричним чутливим елементом.

Принцип функціонування інтерферометричних волоконно-оптичних перетворювачів полягає у температурній залежності довжини оптичного резонатора [3]. У таких перетворювачах зовнішній чутливий елемент, напр. тонкоплівковий резонатор Фабрі-Перо, розташовується на вимірювальному кінці волокна. Залежно від матеріалу резонатора можна досягнути значення діапазону вимірювання від - 272 до 1000 °С [3], доступні у продажі їх типи зазвичай мають діапазон вимірювання від - 50 до 200 °С.

На рис 8 зображено схему вимірювання температури перетворювачами Фабрі-Перо . Резонатор Фабрі-Перо має розміри близько 2 мм. Він складається з багатьох тонких шарів з почергово високим та низьким показником заломлення. Як матеріал з високим показником заломлення використовується аморфний кремній (температурна залежність $dn/dT \approx 2,8 \cdot 10^{-4} \text{ 1/K}$), як матеріал з низьким показником заломлення – діоксид кремнію.

При нагріванні перетворювача відбувається зміщення інтерференційного мінімуму в напрямку збільшення довжини хвилі.

Світло в перетворювач поширюється по оптоволокну від широкопугового джерела світла (наприклад вольфрамової галогенової лампи, широкопуговим *GaAlAs* світлодіодом і т.п). Для демодуляції сигналу може використовуватись мініатюрний оптичний полімерний спектрометр. Спектральний діапазон таких приладів сягає від 700 до 900 нм з оптичною роздільною здатністю 4 нм та лінійною дисперсією 31,3 нм/мм. Точність вимірювання довжини хвилі може досягати 10 пм. Чутливість при такій конфігурації приблизно дорівнює 0,07 нм/К. При цьому досягається точність вимірювання близько 0,5К [3].

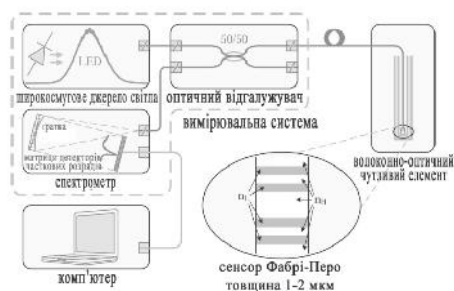


Рис. 8. Схема вимірювання температури з використанням сенсорів Фабрі-Перо [3]

Перевагою таких ВОП є висока чутливість, стабільність характеристик та можливість передачі вимірювального сигналу на великі дистанції [3, 5]. Недоліки – обмежений динамічний діапазон, а також необхідність використання доволі складних систем обробки інформації, великі розміри таких перетворювачів, що викликає їх інерційність у порівнянні з іншими конструкціями чутливих елементів[5]. Тому використання таких перетворювачів при вимірюванні температури малих об'єктів обмежене.

Висновки та напрямки подальших досліджень. Проведено огляд волоконно-оптичних перетворювачів різних видів для вимірювання температури, які на сьогодні широко застосовуються у розвинутих країнах для дослідження основоположних фізичних явищ, вимірювального обладнання та метрологічних характеристик. Проаналізовано їх загальні переваги та недоліки для виконання поставлених завдань.

Практично всі розглянуті типи волоконно-оптичних перетворювачів температури придатні для вимірювання температури зразку композиту гідрогелю з феромагнітними наночастинками під час його індукційного нагрівання. Проте одним з важливих факторів залишається вартість реалізації системи вимірювання. Основним елементом таких систем на основі ґраток Бреґґа, напівпровідникових та інтерферометричних перетворювачів є оптичний аналізатор спектра, який для забезпечення належних точності та роздільної здатності вимірювання температури повинен мати доволі високу спектральну чутливість, що відбивається на його вартості.

Отже, доцільним є використання систе-

ми вимірювання температури перетворювачами на основі явища флуоресценції, що дає змогу суттєво здешевити вартість устави для лабораторних досліджень композитів, при збереженні метрологічних характеристик. Напрямок подальших розробок є розрахунок та реалізація дослідної устави з регульованим нагріванням та вимірювання температури зразків композитів гідрогелю та ФМНЧ під час індукційного нагрівання за допомогою системи вимірювання температури з ВОП на основі явища флуоресценції.

Список використаної літератури

1. Самченко Р. П. Теплочутливі композити з феромагнітними наночастинками для медичних цілей (Огляд устав для дослідження теплових характеристик нанокompозитів) / Р. П. Самченко // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2011. – №72. – С.142–147.
2. Самченко Р. П. Використання математичних моделей для проведення наближеної оцінки індукційного нагріву феромагнітних наночастинок: (Архів доповідей міжнародної науково-практичної конференції «Современные направления теоретических и прикладных исследований 2012») [Електронний ресурс] / Самченко Р.П. – Одеса, 2012. – Режим доступу: <http://sworld.com.ua/index.php/uk/technical-sciences-112/innovative-technologies-112>.
3. Applications of fibre optic temperature measurement. / Hoffmann L., Müller M. S., Krämer S. [та ін.] // Estonian Journal of Engineering.– Кн. 13. – № 4. – С. 343–378.
4. Renschen C. Fi(e)ber-Thermometer / Renschen C. –Carl Hansen Verlag München: 2004.
5. Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических измерительных систем в современном приборостроении / В. Б. Гармаш, Ф. А. Егоров, Л. Н. Коломиец, А. П. Неугодинов, В. И. Поспелов // Спецвыпуск «Фотон-экспресс». – 2006. – № 6. – С. 128–140.
6. Opsens SCBG Temperature sensing technology [Електронний ресурс] / Opsens Inc.– 2010. – Режим доступу: <http://www.opsens.com/pdf/SCBG.pdf>.
7. Gallium Arsenide-Based Fiber Optic Temperature Sensor for Distribution Transformers: технічна документація [Електронний ресурс]. / LumaSense Technologies Inc. –

2011. – Адреса доступу: http://lumasenseinc.com/uploads/Products/Luxtron/pdf/Datasheets/GaAs/OTG-T_Datasheet.pdf.

8. T1™ Fiber Optic Temperature Sensor : технічна документація [Електронний ресурс]/ Neoptix Canada LP. – 2011. – Адреса доступу: http://www.neoptix.com/literature/v1002_Datasheet_t1.pdf.

9. Fluoroptic Temperature Measurement [Електронний ресурс]. / LumaSense Technologies Inc.–2012. – Адреса доступу: <http://lumasenseinc.com/EN/solutions/techoverview/fluoroptic/fluoroptic-technology.html>

10. Grattan L. S. Optical Fiber Sensor Technology: Chemical and environmental sensing: Том 4 з серії Optoelectronics, Imaging and Sensing Series / L. S. Grattan, B. T. Meggitt. – Kluwer, 1999. – 352 с.

11. OSENSA Innovations Corp. Fluorescent Sensor Technology [Електронний ресурс] / OSENSA Innovations Corp. – 2012. – Адреса доступу. <http://www.osensa.com/downloads/WP%20OSENSA%20Fluorescent%20Sensor%20Technology.pdf>.

12. What is Fiber Bragg Grating? [Електронний ресурс] / Fiber Optic Training & Tutorials. – 2012.–Адреса доступу: <http://www.fiberoptics4sale.com/wordpress/what-is-fiber-bragg-grating/>.

13. Grattan K.T.V. Fiber optic sensor technology: an overview / K.T.V. Grattan, T. Sun. – Sensors and Actuators. - №82. – 1999. – С.40–61.

Отримано 25.05.2012

References

1. Samchenko R. P. Thermo-sensitive composites with ferromagnetic nanoparticles for medical applications (Review of aggregates for thermal properties of nanocomposites investigations) / R. P. Samchenko // Measurement techniques and metrology 72 (2011). – Lviv: 2011. – P. 40–61 [in Ukrainian].

2. The use of mathematical models for approximate estimation induction heating mag-

netic nanoparticles [Archive of reports on international scientific conference “Recent directions of theoretical and applied researches’2012”]. – Odessa: – 2012 Available from: <http://sworld.com.ua/index.php/uk/technical-sciences-112/innovative-technologies-112>; [in Ukrainian].

3. Applications of fibre optic temperature measurement / L. Hoffmann, M. S. Müller, S. Krämer. Proc. Estonian Acad. Sci. Eng., 2007, 13. – № 4. – P. 343–37813 [in English].

4. Renschen C. Fi(e)ber-Thermometer Carl Hansen Verlag München:2004 [in English].

5. Opportunities, tasks and prospects of fiber optical measurement systems in contemporary engineering / W. B. Harmash, F. A. Jehorow, L. N. Kolomiets, A. P. Neuhodnikow, W. I. Pos-pelow // Special Issue “Foton-express” 6(2005). – Moscow: – 2005. – P.128–140 [in Russian].

6. Opsens SCBG Temperature sensing technology Opsens Inc. 2010. Available from: <http://www.opsens.com/pdf/SCBG.pdf> [in English].

7. Gallium Arsenide-Based Fiber Optic Temperature Sensor for Distribution Transformers LumaSense Technologies Inc, 2011 Available from: http://lumasenseinc.com/uploads/Products/Luxtron/pdf/Datasheets/GaAs/OTG-T_Datasheet.pdf [in English].

8. T1™ Fiber Optic Temperature Sensor Neoptix Canada LP, 2011 Available from: http://www.neoptix.com/literature/v1002_Datasheet_t1.pdf [in English].

9. Fluoroptic Temperature Measurement LumaSense Technologies Inc., 2012 Available from: <http://lumasenseinc.com/EN/solutions/techoverview/fluoroptic/fluoroptic-technology.html> [in English].

10. Grattan L.S. Optical Fiber Sensor Technology: Chemical and environmental sensing / L. S. Grattan, B. T. Meggitt [Optoelectronics,

Imaging and Sensing Series Book 4] . – Kluwer: –1999. – 352 p. [in English].

11. OSENSA Innovations Corp. Fluorescent Sensor Technology OSENSA Innovations Corp., 2012 Available from: <http://www.osensa.com/downloads/WP%20OSENSA%20Fluorescent%20Sensor%20Technology.pdf> [in English].

12. What is Fiber Bragg Grating? Fiber Optic Training & Tutorials., 2012. Available from: <http://www.fiberoptics4sale.com/wordpress/what-is-fiber-bragg-grating/> [in English].

13. Grattan K.T.V. Fiber optic sensor technology: an overview / K.T.V. Grattan, T. Sun . – Sensors and Actuators (82). – 1999. – P. 40–61 [in English].



Самченко
Ростислав Павлович,
аспірант каф. Інформаційно-
вимірювальної технології НУ
«Львівська політехніка»,
e-mail:
rostyslav.samchenko@gmail.com



Стадник
Богдан Іванович,
д-р техн. наук, проф., зав. каф.
Інформаційно-вимірювальної
технології НУ «Львівська полі-
техніка»,
e-mail: stadnyk@polynet.lviv.ua