

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

**ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХПІ»**

*Серія: Електроенергетика та перетворювальна
техніка*

№ 4 (1226) 2017

Збірник наукових праць

Видання засновано у 1961 році

Харків
НТУ «ХПІ» 2017

Вісник Національного технічного університету «ХПІ»

Збірник наукових праць. Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 4 (1226) – 96 с.

Державне видання

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ No 5256 від 2 липня 2001 року

Збірник виходить українською та російською мовами.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ» внесено до «Переліку наукових Фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого постановою президії ВАК України від 26 травня 2010 р. №1 – 05/4. (Бюлетень ВАК України №6, 2010 р., стор. 3, №20).

Координаційна рада:

Л. Л. Товажнянський, д-р техн. наук, чл.-кор. НАНУ (**голова**)

К. О. Горбунов, канд. техн. наук, доц. (**секретар**)

А. П. Марченко, д-р техн. наук, проф.; Є. І. Сокол, д-р техн. наук, чл. -кор. НАНУ, д-р техн. наук, проф.; Є. Є. Александров, д-р техн. наук, проф.; А. В. Бойко, д-р техн. наук, проф.; Ф. Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.; М. Д. Годлевський, д-р техн. наук, проф.; А. І. Грабченко, д-р техн. наук, проф.; В. Д. Дмитриєнко, д-р техн. наук, проф.; І. Ф. Домнін, д-р техн. наук, проф.; В. В. Єпіфанов, канд. техн. наук, проф.; Ю. І. Зайцев, канд. техн. наук, проф.; П. О. Качанов, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.; С. І. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.; В. М. Кошельник, д-р техн. наук, проф.; В. І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.; Г. В. Лісачук, д-р техн. наук, проф.; О. К. Морачковський, д-р техн. наук, проф.; В. І. Ніколаєнко, канд. іст. наук, проф.; П. Г. Перерва, д-р екон. наук, проф.; В. А. Пуляєв, д-р техн. наук, проф.; М. І. Рищенко, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.; Г. М. Сучков, д-р техн. наук, проф.; Ткачук, д-р техн. наук, проф.

Редакційна колегія серії:

Відповідальний редактор: Г. М. Сучков, д-р техн. наук, проф.

Відповідальний секретар: І. Г. Хорошайло – інженер I кат.

Члени редколегії: Є. І. Сокол, член-кор. НАНУ, д.т.н., проф.; В. Ф. Болюх, д.т.н., проф.; В. В. Воїнов, к.т.н., доц. А. Г. Гурін, д.т.н., проф.; С. М. Глоба, к.т.н., доц.; Б. В. Клименко, д.т.н., проф.; К. Л. Ноздрачова, к.т.н., доц.; Радєв Христо, д.т.н., проф., (Болгарія); Ю. К. Тараненко, д.т.н., проф.; П. Ф. Щапов, д.т.н., проф.; Ю. Є. Хорошайло, к.т.н., проф.; Петрищев О. М., д.т.н., проф.; Стоєв П. І., д.ф. мат. н., проф.; Смолін Ю. О., к.т.н., доц.; Плєснецов С. Ю., к.т.н.

*У квітні 2013 р. Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія «Електроенергетика та перетворювальна техніка», включений у довідник періодичних видань бази даних **Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)**.*

Рекомендовано до друку вченою радою НТУ «ХПІ»

Протокол № 6 від 7 липня 2017 р.

Ю. Г. БЕЗЫМЯННЫЙ, Е. А. КОЗИРАЦКИЙ, В. А. НАЗАРЕНКО, Л. О. ТЕСЛЕНКО

ОСОБЕННОСТИ АКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ В ПРЕССОВКАХ НА ОСНОВЕ ПОРОШКА ТИТАНА

В результате изучения закономерностей зміни параметрів пружних хвиль, що пройшли через зразки пористих прессовок, проведена адаптація методик вимірювань динамічних характеристик пружності імпульсним та резонансним методами до особливостей досліджуваних матеріалів для підвищення достовірності, точності та інформативності вимірювань. Застосування адаптованих методик дозволило отримати якісно нову інформацію про закономірності зміни швидкостей поширення пружних хвиль як функції параметрів структури в прессовках на основі порошку титана. Показано, що залежності швидкості поширення від пористості різні на різних ділянках і для різних типів хвиль. При цьому ділянки відділені аномальною зоною пористості.

Ключові слова: неруйнівний контроль, акустичні методи, швидкість ультразвуку, титан, пористі прессовки.

В результате изучения закономерностей изменения параметров упругих волн, прошедших через образцы пористых прессовок, проведена адаптация методик измерений динамических характеристик упругости импульсным и резонансным методами к особенностям исследуемых материалов для повышения достоверности, точности и информативности измерений. Применение адаптированных методик позволило получить качественно новую информацию о закономерностях изменения скорости распространения упругих волн как функции параметров структуры в прессовках на основе порошка титана. Показано, что зависимости скорости распространения от пористости различны на разных участках и для разных типов волн. При этом участки отделены аномальной зоной пористости.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, акустические методы, скорость ультразвука, титан, пористые прессовки.

As a result of studying the regularities of the changes in the parameters of elastic waves passed through samples of porous compacts, the methods of measuring the dynamic characteristics of elasticity by pulse and resonant methods have been adapted to the features of the materials under study to increase the reliability, accuracy, and informativeness of the measurements. The use of adapted techniques allowed obtaining qualitatively new information about the regularities of the variation of the elastic wave propagation as a function of the structure parameters in compacts based on titanium powder. The paper presents the results of pulsed and resonant methods used to study the characteristics of porous titanium. A technique is proposed for estimating the correctness of the results obtained. It is shown that the dependence of the propagation velocity on the porosity is different at different sites and for different types of waves. The sections are separated by an abnormal zone of porosity.

Keywords: non-destructive testing, acoustic methods, ultrasound speed, titanium, porous compacts.

Введение. Порошковая металлургия является перспективным направлением получения новых материалов с уникальными свойствами [1]. При этом методы порошковой металлургии имеют специфические особенности, которые предполагают контроль свойств материала на разных стадиях его получения [2]. В этом плане важным следует считать знание характеристик упругости материала [3]. Для их оценки широко используют акустические методы, основанные на измерении различных скоростей распространения упругих волн (см. обзор в [4]). Наиболее сложным в методическом плане следует считать измерение модуля упругости после стадии прессования порошкового материала. Неправильная постановка измерительного эксперимента может привести к получению некорректных результатов или потере важной информации вследствие принципиальных промахов или большой погрешности измерений, обусловленных особенностями исследуемых материалов. В литературе этот вопрос до сих пор не освещён.

Цель исследования. Изучить закономерности изменения параметров упругих волн, прошедших через образцы пористых прессовок, и провести адаптацию методик измерений скоростей распространения упругих волн к особенностям структуры исследуемых образцов для повышения достоверности, точности и информативности измерений.

Объект исследования. В качестве объекта исследований выбран модельный материал со сложной структурой. Образцы изготовлены из

титанового порошка марки ПТЭС, рассеянного на разные фракции [5].

Прессовки получены двусторонним прессованием в виде прямоугольных балок размерами 3x7x45 и 5x7x45 мм и имеют пористость от 5 до 40 %.

На рис. 1 показана структура поверхности образца с увеличением x50.

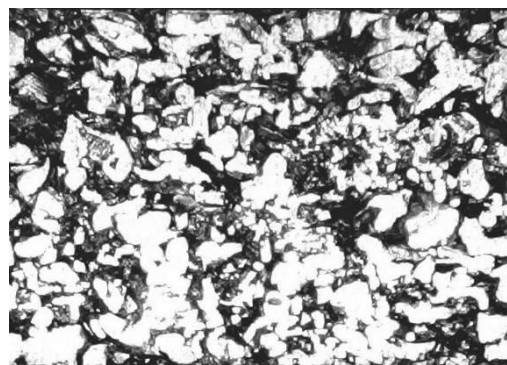


Рис. 1 – Структура образца с пористостью 20%

На снимке можно рассмотреть неоднородности связанные с процессом прессования образцов. Приложение усилия прессования с двух сторон приводит к тому, что уплотняемость частиц вблизи поверхности больше чем внутри образца. В некоторых случаях область меньшей плотности приближается к поверхности и таким образом формируется градиентная структура. При малом усилии прессования неравномерность структуры проявляется меньше и в результате получается более однородный материал, но с большей пористостью.

Методика измерений. На рис. 2 показаны направления прозвучивания образцов.

Импульсным методом при возбуждении продольных упругих волн (УВ) прозвучивание проводили во всех направлениях.

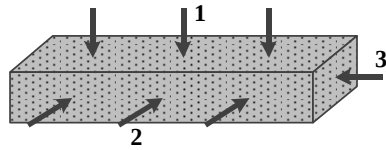


Рис. 2 – Форма образцов и направления прозвучивания

Резонансным методом – вдоль образца в направлении 3.

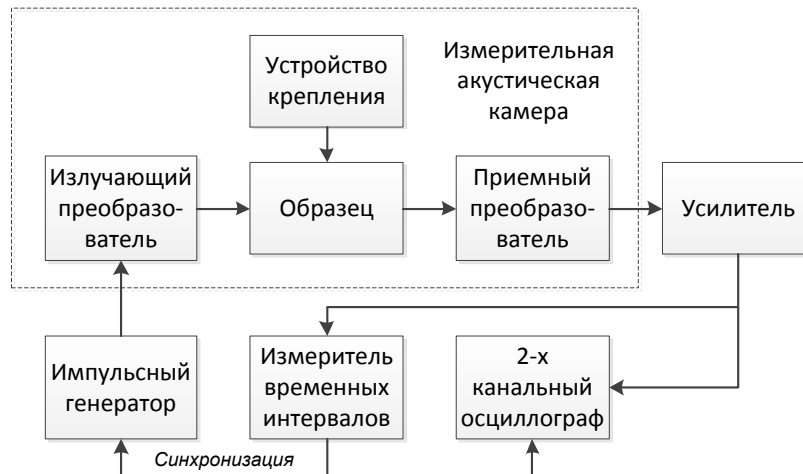


Рис. 3 - Схема измерения скорости распространения упругих волн импульсным методом

Резонансный метод. В резонансном методе возбуждали в образце вынужденные ультразвуковые колебания и определяли первую резонансную частоту (рис. 4).

По резонансной частоте f , рассчитывали СР УВ в стержне длиной l [7], по формуле:

$$c_s = 2fl \quad (1)$$

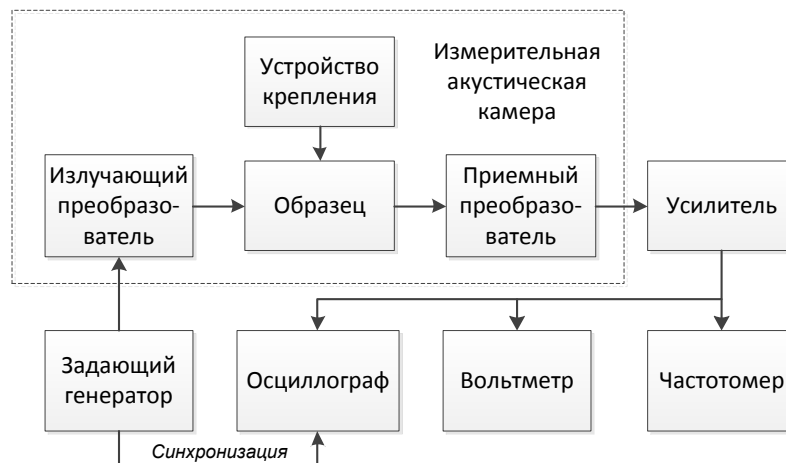


Рис. 4 – Структурная схема установки для измерения резонансной частоты

Адаптация методики. Прозвучивая образцы импульсным методом на разных частотах, с помощью РС-осциллографа получили сигналы с приемного преобразователя. В табл. 1 показаны сигналы для образцов с пористостью 20 и 30% и излучаемый сигнал для сравнения.

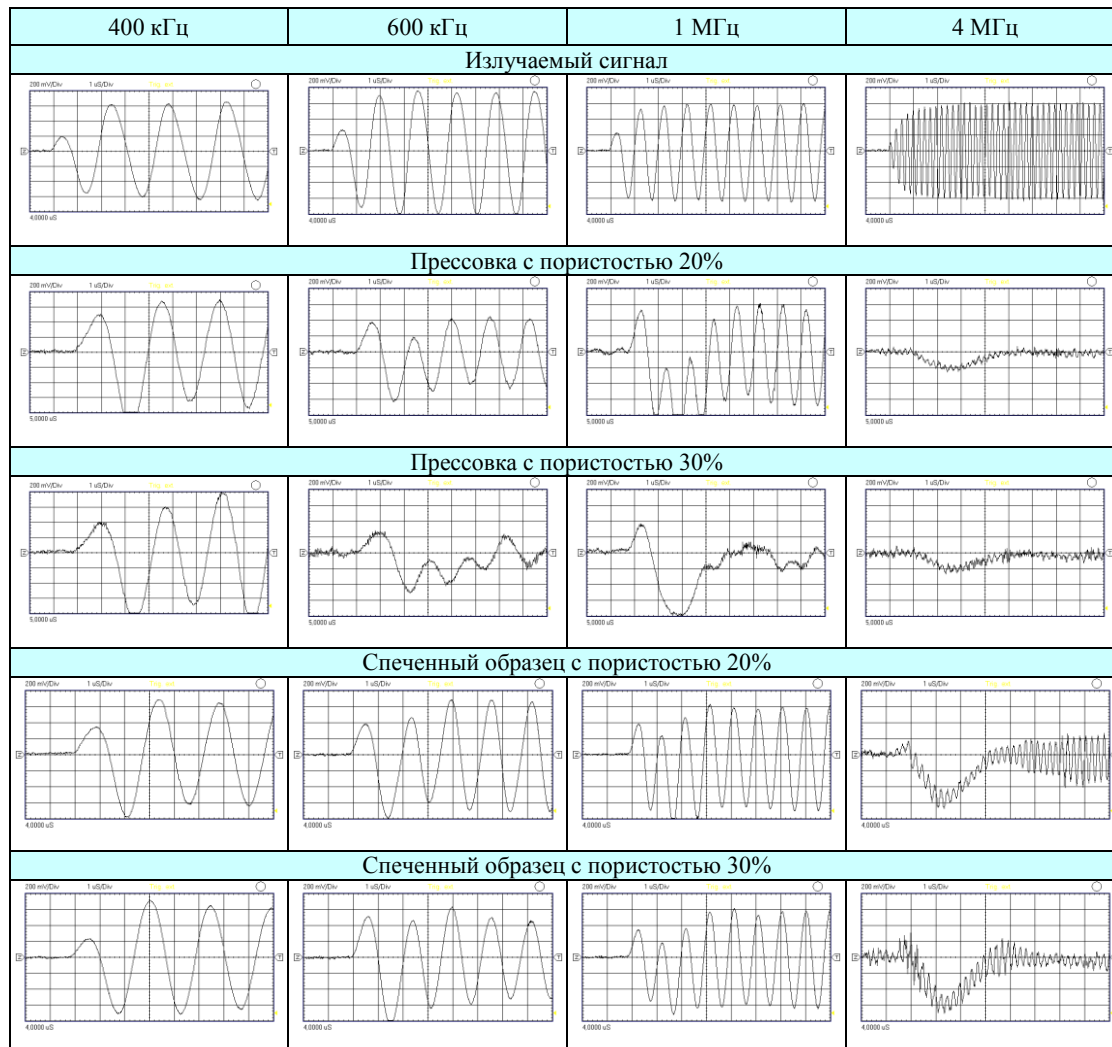
Для прессовок характерно искажение

радиоимпульса с частотой больше 600 кГц. При этом с увеличением пористости граничная частота уменьшается. В спеченных образцах граница уходит в верхний диапазон, что объясняется улучшением качества межчастичных контактов.

В результате анализа формы полученных сигналов также выявлено уменьшение частоты

радиоимпульса и растягивание фронта после измерений. прохождения через образец, что влияет на точность

Таблица 1 – Сигналы с приемного преобразователя



Для учета искажения формы сигнала предлагается выполнять измерения по двум точкам согласно методике, описанной в работе [8]. При этом скорость прохождения импульса через исследуемый образец толщиной h определяли с учетом крутизны фронта по формуле:

$$c = \frac{h}{1,87t_1 - 0,87t_2 - t_0}, \quad (2)$$

где t_1 и t_2 – измеряемое время; t_0 – систематическая погрешность измерений.

Такой подход позволил уменьшить погрешность измерений до 1%.

Результаты эксперимента. Применяя адаптированную методику, получили зависимости СР УВ прессовок от пористости. На рис. 5 показаны результаты импульсного метода (ИМ) в разных направлениях и резонансного метода.

В области пористости 18% наблюдается anomalous отклонение значений, что соответствует разрыву кривых во всех направлениях. При такой

пористости предполагается переход структуры от матричной к каркасной [9].

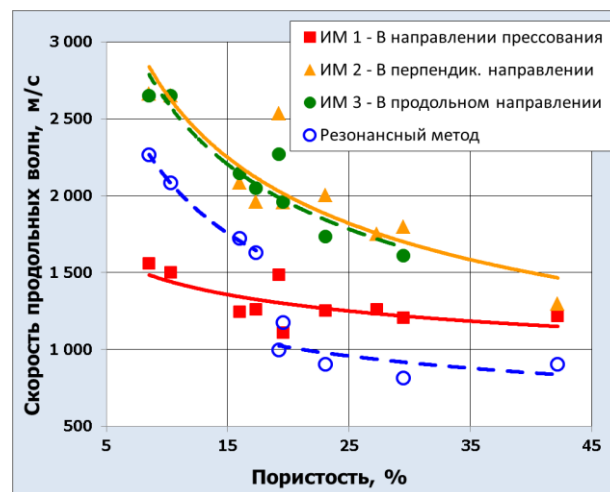


Рис. 5 – Зависимость СР УВ от пористости

Выводы. Установлено, что форма упругой волны, прошедшей через образцы прессовок из пористого титана, изменяется тем значительней, чем выше её частота и больше пористость. В отличие от спеченного материала эти изменения происходят при более низких частотах и приводят к уменьшению частоты принимаемого сигнала по сравнению с излучённым тем большим, чем больше пористость материала. В результате адаптации методик измерения скоростей распространения упругих волн импульсным и резонансным методами к особенностям исследуемых материалов, показано, что зависимости скорости распространения от пористости для прессовок из порошкового титана различны на разных участках и для разных типов волн, причём эти участки отделены аномальной зоной пористости.

Список литературы

1. Степанчук А. Н. Порошковая металлургия // Неорганическое материаловедение: Энциклопед. изд.: В 2 т. / под ред. Г. Г. Гнесина, В. В. Скорохода. – Т. 2.: Материалы и технологии. – Кн. 2 – К.: Наук. думка, 2008. – С. 104-114.
2. Скороход В. В. Наука о спекании: эволюция идей, достижения, текущие проблемы и новые тенденции I. От натурфилософии к физике спекания / Порошковая металлургия. – 2014. – № 9/10. – С. 42-60.
3. Скороход В. В. Приближенные методы численной оценки модулей упругости композиционных и микронеоднородных материалов / Порошковая металлургия. – 2011. – № 1/2. – С. 69-80.
4. Безимьянный Ю. Г., Козирацкий С. О., Тесленко Л. О., Талько О. В. Факторы влияния на динамичні модулі пружності гетерофазних порошкових матеріалів / Вісник українського матеріалознавчого товариства. В. 8. 2015, С. 93-102.
5. Борисовская Е. М., Назаренко В. А., Подрезов Ю. Н. Механические свойства порошкового титана на разных стадиях его получения. II. Механическое поведение пористых титановых прессовок / Порошковая металлургия – 2008. – № 9-10.
6. Роман О. В., Скороход В. В., Фридман Г. Р. Ультразвуковой и резистометрический контроль в порошковой металлургии. – Мн.: Выш. шк., 1989. – 182 с.
7. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. – М.: Мир, 1972. – 302 с.
8. Безимьянный Ю. Г. Особенности акустических измерений при импульсном зондировании материалов, изготавливаемых методами порошковой металлургии // Современные проблемы физического материаловедения: Сб. науч. тр. Института проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины. Сер. "Физико-химические основы технологии порошковых материалов" – К., 2005. – С. 190-201.
9. Скороход В. В. Теория физических свойств пористых и композиционных материалов и принципы управления их микроструктурой в технологических процессах / Порошковая металлургия. – 1995. – № 1/2. – С. 53-71.

References (transliterated)

1. Stepanchuk A. N. Poroshkovaya metallurgiya [Powder Metallurgy] // Neorganicheskoe materialovedenie: Entsikloped. izd.: V 2 t. / pod red. G. G. Gnesina, V. V. Skorokhoda. – T. 2.: Materialy i tekhnologii. – Kn. 2 [Inorganic Materials Science - Vol. 2: Materials and technologies] – Kiev, Nauk. dumka Publ., 2008. – pp. 104-114.
2. Skorokhod V. V. Nauka o spekanii: evolyutsiya idey, dostizheniya, tekushchie problemy i novye tendentsii I. Ot naturfilosofii k fizike spekaniya [The science of sintering: the evolution of ideas, achievements, current problems and new trends I. From natural philosophy to the physics of sintering] / Poroshkovaya metallurgiya [Powder Metallurgy]. – 2014. – no. 9/10. – pp. 42-60.
3. Skorokhod V. V. Priblizhennyye metody chislennoy otsenki moduley uprugosti kompozitsionnykh i mikroneodnorodnykh materialov [Approximate methods for numerical estimation of elastic moduli of composite and microinhomogeneous materials] / Poroshkovaya metallurgiya [Powder Metallurgy]. – 2011. – no. 1/2. – pp. 69-80.
4. Bezimyannyi Yu. G., Kozyrats'kyy E. O., Teslenko L. O., Tal'ko O. V. Faktory vplyvu na dynamichni moduli pruzhnosti heterofaznykh poroshkovykh materialiv [Pressure on the dynamic modulus of elasticity heterophase powder materials] / Visnyk ukraiyin'skoho materialoznavchoho tovarystva [Ukrainian Journal of Materials Research Society]. V. 8. 2015, pp. 93-102.
5. Borisovskaya E. M., Nazarenko V. A., Podrezov Yu. N. Mekhanicheskie svoystva poroshkovogo titana na raznykh stadiyakh ego polucheniya. II. Mekhanicheskoe povedenie poristykh titanovykh pressovok [Mechanical properties of powdered titanium at different stages of its production. II. Mechanical behavior of porous titanium compacts] / Poroshkovaya metallurgiya [Powder Metallurgy] – 2008. – no 9-10.
6. Roman O. V., Skorokhod V. V., Fridman G. R. Ul'trazvukovoy i rezistometricheskii kontrol' v poroshkovoy metallurgii [Ultrasonic and resistometric control in powder metallurgy]. – Minsk.: Vysh.shk. Publ., 1989. – 182 p.
7. Truell R., El'baum Ch., Chik B. Ul'trazvukovye metody v fizike tverdogo tela [Ultrasonic methods in solid state physics]. – Moscow.: Mir. Publ., 1972. – 302 p.
8. Bezimyannyi Yu. G. Osobennosti akusticheskikh izmereniy pri impul'snom zondirovani materialov, izgotovlyaemykh metodami poroshkovoy metallurgii [Features of acoustic measurements for pulsed sounding of materials manufactured by methods of powder metallurgy] // Sovremennyye problemy fizicheskogo materialovedeniya: Sb. nauch. tr. Instituta problem materialovedeniya im. I. N. Frantseвича NAN Ukrainy [Modern problems of physical materials science: Proc. of the Institute of Problems of Materials Science. I. N. F.]. Ser. "Fiziko-khimicheskie osnovy tekhnologii poroshkovykh materialov" – Kiev., 2005. – pp. 190-201.
9. Skorokhod V. V. Teoriya fizicheskikh svoystv poristykh i kompozitsionnykh materialov i printsipy upravleniya ikh mikrostrukturnoy v tekhnologicheskikh protsessakh [The theory of physical properties of porous and composite materials and the principles of controlling their microstructure in technological processes] / Poroshkovaya metallurgiya [Powder Metallurgy]. – 1995. – no 1/2. – pp. 53-71.

Поступила (received) 25.05.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Особливості акустичних вимірювань в пресовках на основі порошку титана / Ю. Г. Безимьянный, Є. О. Козирацький, В. А. Назаренко, Л. О. Тесленко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 4 (1226). – С. 3-7. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-4525.

Особенности акустических измерений в прессовках на основе порошка титана / Ю. Г. Безимьянный, Е. А. Козирацкий, В. А. Назаренко, Л. О. Тесленко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 4 (1226). – С. 3-7. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-4525.

Features of acoustic measurements in compacts based on titanium powder / Yu. G. Bezimyanniy, E. A. Kozirackiy, V. A. Nazarenko, L. O. Teslenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Elektroenergetika i

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Безимяний Юрій Георгійович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувачий відділом, Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, м. Київ; тел.: (044) 424-52-00; e-mail: bezimyni@i.com.ua.

Безимяний Юрий Георгиевич – доктор технических наук, старший научный сотрудник, заведующий отделом, Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, г. Киев; тел.: (044) 424-52-00; e-mail: bezimyni@i.com.ua.

Bezimyanniy Yuriy Georgievych – Doctor of technical sciences, Senior Research Worker, Head of department, Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of NAS of Ukraine, Kyiv; tel.: (044) 424-52-00; e-mail: bezimyni@i.com.ua.

Козирацький Євген Олександрович – здобувач, молодший науковий співробітник, Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, м. Київ; тел.: (044) 424-20-55; e-mail: evgeniy_k@ukr.net.

Козирацкий Евгений Александрович – соискатель, младший научный сотрудник, Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, г. Киев; тел.: (044) 424-20-55; e-mail: evgeniy_k@ukr.net.

Kozirackiy Evgen Aleksandrovich – Competitor, Junior Research Worker, Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of NAS of Ukraine, Kyiv; tel.: (044) 424-20-55; e-mail: evgeniy_k@ukr.net.

Назаренко Володимир Андрійович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, головний металург, Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, м. Київ; тел.: (044) 424-21-55; e-mail: vanazarenko@gmail.com.

Назаренко Владимир Андреевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, главный металлург, Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, г. Киев; тел.: (044) 424-21-55; e-mail: vanazarenko@gmail.com.

Nazarenko Vladimir Andreevich – Candidate of Engineering Science (Ph. D.), Senior Research Worker, Chief metallurgist, Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of NAS of Ukraine, Kyiv; tel.: (044) 424-21-55; e-mail: vanazarenko@gmail.com.

Тесленко Людмила Олегівна – науковий співробітник, Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, м. Київ; тел.: (044) 424-20-55; e-mail: dep57@materials.kiev.ua.

Тесленко Людмила Олеговна – научный сотрудник, Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, г. Киев; тел.: (044) 424-20-55; e-mail: dep57@materials.kiev.ua.

Teslenko Lyudmila Olegovna – Researcher, Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of NAS of Ukraine, Kyiv; tel.: (044) 424-20-55; e-mail: dep57@materials.kiev.ua.

УДК 620.111.3:666.762.852+666.189.2

Ю. Г. БЕЗЫМЯННЫЙ, А. В. МАЗНАЯ, А. Н. ВЫСОЦКИЙ, К. А. КОМАРОВ, О. В. ТАЛКО**ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕРАЗРУШАЮЩИХ АКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ КОМБИНИРОВАННЫХ КЕРАМИКО-ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Розроблено оригінальну методику оцінки захисних властивостей комбінованих кераміко – полімерних матеріалів і їх шарів опору ударному навантаженню шляхом адаптації імпульсного методу вимірювання швидкості пружної хвилі. Показано доцільність застосування ударного методу впливу (дії) на фронтальну поверхню досліджуваного зразка для збудження пружної хвилі з широким спектром частот. Використання методики дає можливість прогнозування ефективності захисних комбінованих перешкод різного складу.

Ключові слова: комбіновані кераміко-полімерні матеріали, акустичні методи, прогнозування захисних властивостей.

Разработана оригинальная методика оценки защитных свойств комбинированных керамико-полимерных материалов и их слоев при сопротивлении ударным нагрузкам путем адаптации импульсного метода измерения скорости распространения упругой волны. Показано целесообразность применения ударного метода воздействия на фронтальную поверхность исследуемого образца для возбуждения упругой волны с широким спектром частот. Использование методики дает возможность прогнозирования эффективности применения защитных преград разного состава.

Ключевые слова: комбинированные керамико-полимерные материалы, акустические методы, прогнозирование защитных свойств.

Creation of effective protection against high-energy killers is always actual in connection with their constant improvement. One of the most prospective directions of ballistic protection is connected with the development of a combined multilayered material as a protective structure. The material consists of armored ceramics and a substrate made from polymeric composites. Elastic waves velocities are physically connected with density and elastic properties of the material, and an attenuation coefficient of an elastic wave – with its damping properties and inner structure. An original technique of evaluation of protective properties of combined ceramics-polymeric materials and their layers under shock resistance was developed by adapting the impulse method of measuring elastic wave velocity to the peculiarities of the products under study and to the problem of this investigation. Application of this technique made it possible to compare efficiency of using protective barriers of different compositions and give recommendations concerning their completing with layers of materials possessing different properties.

Keywords: ballistic protection, ceramics-polymeric materials, elastic waves, damping properties, attenuation coefficient.

Введение. В наше время создание эффективной защиты от высокоэнергетического баллистического воздействия является особенно актуальным в связи с постоянным совершенствованием средств поражения. Одно из наиболее перспективных направлений баллистической защиты связано с разработкой в качестве защитной структуры комбинированного многослойного материала, состоящего из броневой керамики и подпора из полимерных композитов [1, 2]. Для обеспечения возможности эффективного противостояния действию высокоэнергетических динамических нагрузок фронтальный керамический слой комбинированных керамико-полимерных преград должен обеспечивать бронестойкость [3], а подпор – минимизацию запреградной деформации [2]. При этом на ударную стойкость защитной преграды в значительной степени влияют состав, структура, размеры и форма составляющих комбинированных материалов, определенная последовательность слоев, адгезионные свойства на их границах и другие факторы [4]. Создание таких комбинированных материалов дает возможность регулировать защитные свойства преграды за счёт использования физико-механических характеристик слоёв из разных по природе материалов.

Следует обратить внимание, что общепринятые представления о физике и механике разрушения керамики при её взаимодействии с высокоскоростными твёрдыми телами до настоящего времени четко не сформированы. Однако опыт теоретических и экспериментальных работ показывает, что эффективность керамической брони

определяет оптимальная плотность, высокие модуль упругости, твёрдость, трещиностойкость, заданный уровень прочности и скорость распространения продольной упругой волны [3]. Для обеспечения минимальной запреградной деформации подпор должен иметь достаточную прочность и высокий уровень диссипации энергии [5].

Каждый из известных [3] эмпирических критериев бронестойкости керамики учитывает только часть из указанных свойств материала и не может быть применен в случае комбинированных керамико-полимерных материалов. Единственным надежным методом оценки бронестойкости и запреградной деформации керамико-полимерных материалов являются баллистические испытания, что достаточно дорого и приводит к разрушению испытываемых образцов. Поэтому при разработке комбинированных защитных материалов актуальным остается поиск новых методов прогнозирования бронестойкости материалов, в том числе, неразрушающего контроля. Использование акустических методов для решения этой задачи имеет веские предпосылки: считается, что процесс разрушения керамики имеет волновой характер, связанный с двойным временем распространения упругой волны в толщине материала [6]; для оценки бронестойкости керамических материалов используют скорость распространения продольной упругой волны и волновое сопротивление материала [8]; скорости распространения упругих волн физически связаны с плотностью и характеристиками упругости материала, а коэффициент затухания упругой волны – с его

диссипативными свойствами и внутренней структурой [8].

Возможности акустических методов при неразрушающем контроле многослойных конструкций [9] гораздо шире традиционно используемых [10]. Повышение эффективности акустических методов при решении практических задач возможно путём адаптации этих методов и используемых ими диагностических параметров к особенностям объекта исследования [11].

Целью работы является повышение эффективности использования акустических неразрушающих методов для прогнозирования свойств защитных комбинированных керамико-полимерных материалов и их слоёв.

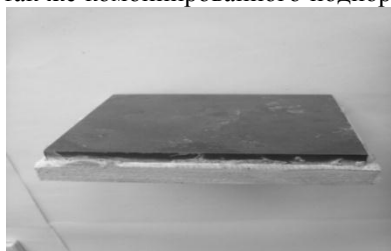
Методология адаптации акустических методов неразрушающего контроля к исследуемым комбинированным керамико-полимерным материалам и их слоям с учётом поставленной задачи была следующей [11]: анализ объектов исследования; обоснование методов исследования и диагностических параметров; разработка методик измерений; проведение акустического эксперимента; анализ полученных результатов.

Образцы для исследования. В соответствии рекомендациям [12] базовым для исследования выбран образец комбинированного трёхслойного керамико-полимерного материала (рис. 1а), состоящий из керамического слоя на основе карбида кремния (рис. 1б) и комбинированного подпора, состоящего из стеклопластика, в котором фронтальный слой – композит с эпоксидной матрицей, а тыльный слой – композит с полиуретановой матрицей. Для сравнения взяты образцы комбинированных двухслойных керамико-полимерных материалов, состоящих из керамического слоя с подпором из стеклопластика с эпоксидной или полиуретановой матрицей. Отдельно были исследованы образцы отдельных слоёв двух- и трёхслойных материалов, а так же комбинированного подпора. Все образцы были

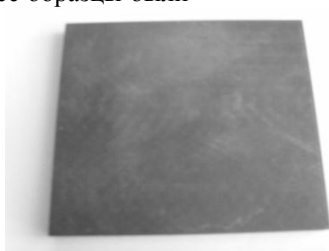
изготовлены в ИПМ НАН Украины им. И.Н.Францевича. Их структура и толщины приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Структура и толщины образцов для исследований

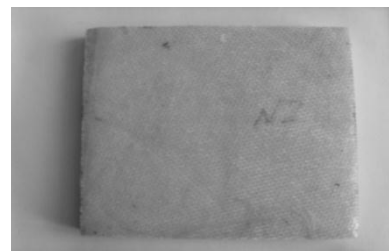
№ образца	Количество слоёв	Материал слоев	Толщина, мм
1	3	Керамика	8
		Стеклопластик с эпоксидной матрицей	5.5
		Стеклопластик с полиуретановой матрицей	5.4
2	2	Керамика	8,0
		Стеклопластик с эпоксидной матрицей	13.3
3	2	Керамика	8,0
		Стеклопластик с полиуретановой матрицей	10.8
4	1	Керамика	8,0
5	2	Стеклопластик с эпоксидной матрицей	5.5
		Стеклопластик с полиуретановой матрицей	5.4
6	1	Стеклопластик с эпоксидной матрицей	13.3
7	1	Стеклопластик с полиуретановой матрицей	10.8



а



б



в

Рис. 1–Образцы для исследований: а – образец комбинированного керамико-полимерного материала; б – керамическая пластина из реакционно-спеченного карбида кремния; в – комбинированный подпор

Таким образом, образцы для исследований представляют собой слоистые конструкции или отдельные слои. Все образцы, кроме 4, обладают трансверсальной анизотропией.

Методы исследования и диагностические параметры. Обоснование методов исследования и диагностических параметров является основной частью постановки акустического эксперимента.

Для получения характеристик упругости и неупругости, которые могут определять бронестойкость материалов, исследуемые образцы могут быть исследованы с

помощью импульсных ультразвуковых методов неразрушающего контроля.

Высокоэнергетическое средство поражения со скоростью 845-1000 м/с воздействует на поверхность фронтального слоя защитной преграды, в частности, перпендикулярно плоскости этой поверхности, частично разрушает его (рис. 2) и создаёт ударную волну в наружном слое и подпоре. Эта волна имеет широкий спектр частот. Поэтому при акустическом моделировании этого воздействия с использованием импульсного ультразвукового метода целесообразно

применение ударного метода воздействия на фронтальную поверхность исследуемого образца для возбуждения упругой волны с широким спектром частот, а именно, прозвучивать образец насквозь по толщине, принимая прошедший через него сигнал с внутренней стороны. Тогда изменение характеристик принимаемого сигнала относительно возбуждаемого отразит искомые свойства материала в направлении прозвучивания.

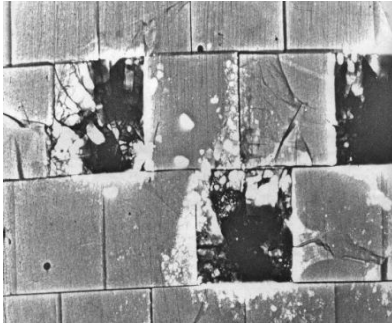


Рис. 2.—Рентгеновский снимок защитной преграды после баллистических испытаний

Следует отметить, что, учитывая анизотропию материала, его акустические свойства в других направлениях будут отличаться. Поперечные размеры образцов позволяют при принятом методе прозвучивания считать, что боковые поверхности образцов не влияют на результаты измерений.

Характеристику упругости анизотропного материала в заданном направлении (жесткость) определяют по формуле (1) [13]

$$c = \rho v^2, \quad (1)$$

где v – скорость распространения продольной упругой волны в этом направлении, ρ – плотность материала.

В нашем случае композиционного материала все эти величины приобретают смысл эффективных, сохраняя между собой функциональную связь [11]:

$$c_3 = \rho_3 v_3^2, \quad (2)$$

где v_3 – эффективная скорость распространения продольной упругой волны, ρ_3 – эффективная плотность материала.

Под эффективной плотностью ρ_3 здесь следует понимать усредненную, как скалярную величину, плотность материалов слоёв на пути распространения упругой волны. Эффективную скорость распространения упругой волны в импульсном методе определяют как (3) [14]:

$$v_3 = h/t_0, \quad (3)$$

где h – путь упругой волны в исследуемом объекте, t_0 – время распространения её фазы..

Численное значение пути совпадает с соответствующей толщиной образца, а время получают путём измерения в результате акустического эксперимента. Таким образом, в акустическом эксперименте диагностическим

параметром при определении эффективной жесткости будет время распространения упругой волны. Изотропную керамику можно рассматривать как частный случай анизотропного материала, что позволяет использовать единые подходы при исследовании всех образцов.

Предварительные исследования показали, что распространение продольной упругой волны в образцах исследуемых материалов, кроме керамики, носит дисперсионный характер. Это, как известно [8], приводит к искажению формы широкополосного сигнала за счёт разной скорости гармонических составляющих. В нашем случае сред с большой диссипацией энергии, которые не пропускают упругие волны с частотами выше 1 МГц, искажение сигнала сопровождается, в частности, затягиванием его фронта по сравнению с излучённым сигналом из-за резкого уменьшения высокочастотных составляющих. Поэтому затягивание фронта обусловлено поглощением волновой энергии [14].

Для выбора диагностического параметра при оценке диссипативных свойств материалов использована следующая модель распространения упругой волны в исследуемых образцах (рис. 3). Время распространения фазовой скорости продольной упругой волны t_0 определяет жесткость материала, а увеличение крутизны фронта сигнала – его неупругость. При этом мерой потерь волновой энергии в материале будет служить [14]:

$$1/\Delta t, \quad (4)$$

где Δt – увеличение длительности фронта.

Для определённости назовём эту меру дисперсионным параметром. Таким образом, в акустическом эксперименте диагностическим параметром при определении диссипации энергии упругой волны будет время увеличения фронта сигнала.

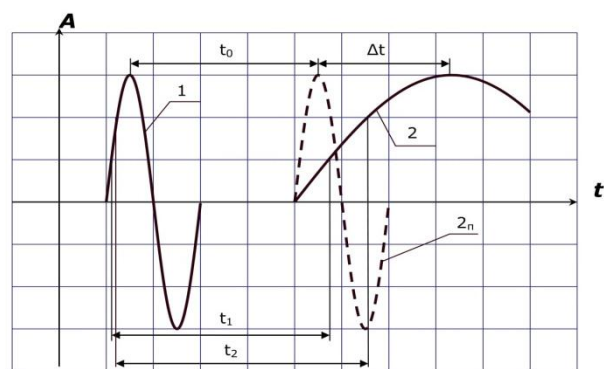


Рис. 3.—Сигналы на выходе приёмного преобразователя:
1 – датчик в датчик; 2 – после прохождения образца;
2_n – приведенный к начальной форме

Итак, для получения характеристик упругости и неупругости материалов образцов необходимо прозвучить их насквозь импульсным ультразвуковым методом при ударном возбуждении упругой волны с поверхности образца и получить в результате акустического эксперимента t_0 и Δt .

Методика и результаты акустических измерений.

Разработка методики измерений является заключительной частью постановки корректного акустического эксперимента.

Для проведения измерений использовали разработанный в ИПМ НАН Украины аппаратный комплекс для прецизионных акустических исследований, позволяющий, в частности, при импульсном прозвучивании образцов синтезировать в широких диапазонах требуемые параметры зондирующих и виды обработки принимаемых сигналов, в том числе с использованием нетрадиционных методов контроля [14].

Акустическое поле в образцах генерировали при помощи пьезоэлектрического преобразователя [10] с резонансной частотой 0,6 МГц методом ударного возбуждения периодическим прямоугольным видеоимпульсом, имеющим широкий спектр частот.

Для определения t_0 и Δt методом радиоимпульса с

дискретной задержкой [15] по методике [14] измеряли время распространения упругой волны на уровнях 1/3 и 2/3 (см. рис. 3) от амплитуды первого полупериода сигнала, прошедшего образец (t_1 и t_2 , соответственно), и датчик в датчик без образца (t_{10} и t_{20} , соответственно). Тогда $t_0 = 1,8716 (t_1 - t_{10}) - 0,8716 (t_2 - t_{20})$, а $\Delta t = 3,1570 (t_2 - t_{20}) - 2,1570 (t_1 - t_{10})$. Жёсткость и дисперсионный параметр рассчитывали по формулам (2) и (4), соответственно. При этом погрешность измерения жёсткости не превышает 4 %, а дисперсионного параметра – 3 %.

Оценки бронестойкости исследуемых образцов по результатам акустических измерений приведены на рис. 4. Там же, для сравнения, приведен один из известных [3] эмпирических критериев бронестойкости ρv (в акустике эту величину называют волновое сопротивление [8]).

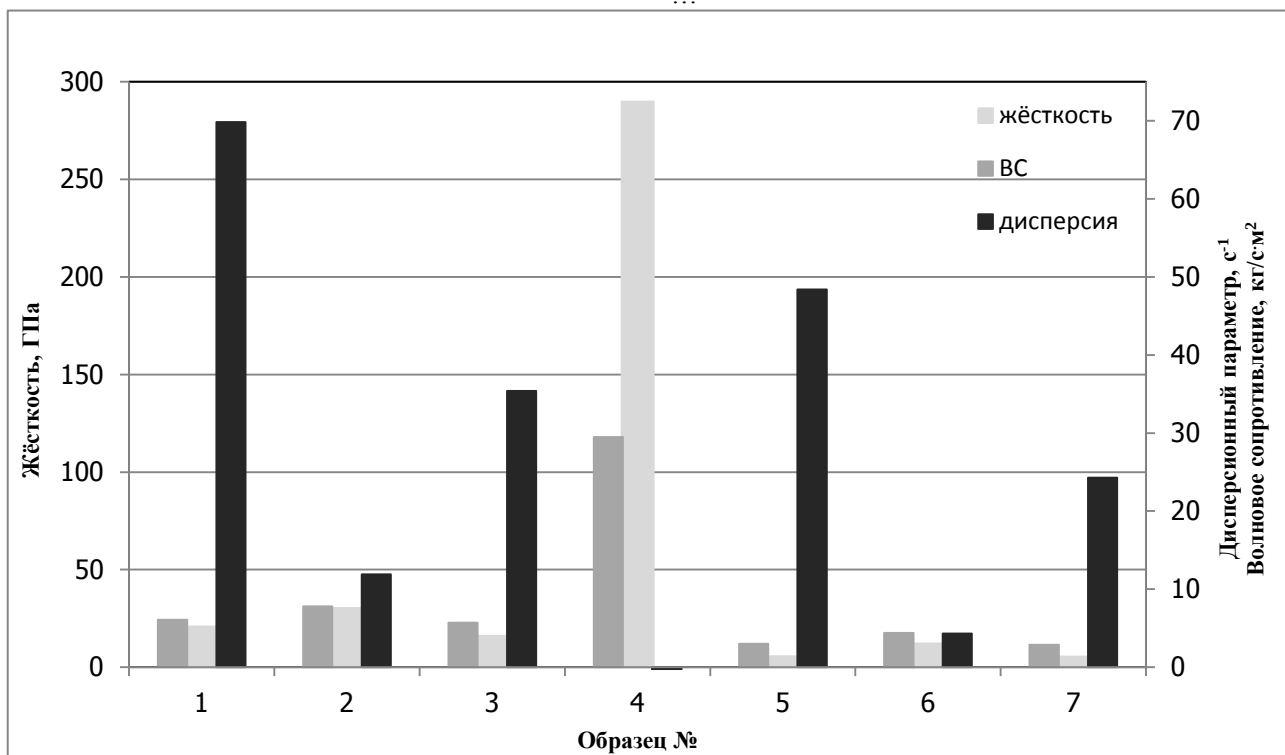


Рис. 4 – Результаты акустических измерений

Анализ полученных результатов. Из рис. 4 видно, что и жёсткость, и волновое сопротивление, выстраивают образцы материалов в одинаковые иерархические ряды. При этом, жёсткость более чувствительна к изменению свойств материала. В соответствие этим критериям наибольшую ударостойкость имеет керамический образец и его целесообразно использовать как фронтальный слой в комбинированных керамико-полимерных материалах. Следует заметить, что фронтальный керамический слой отвечает за первоначальную диссипацию кинетической энергии ударника за счет фрагментации керамики. Полимерные композиционные материалы имеют бронестойкость на порядок меньшую чем у керамических материалов, однако дисперсионный параметр полимерных волокнистых композитов

значительно превышает дисперсию керамики. Эти материалы используются в качестве демпфирующих слоев, которые обеспечивают целостность комбинированной преграды и уменьшение запреградной деформации. При этом полимерные композиционные материалы с полиуретановой матрицей (образец 7) имеют дисперсионный параметр значительно превышающий таковой композитов с эпоксидной матрицей (образец 6), что связано с демпфирующими свойствами полимерных связующих (тангенс механических потерь полиуретанового связующего значительно превышает эпоксидное). Подобная зависимость наблюдается и для образцов керамико-полимерных материалов (образцы 2, 3). Однако, наряду с демпфирующими, значительное влияние на величину запреградной деформации

оказывают и физико-механические свойства полимерных композитов, характеристики которых для эпоксидных матриц превышают полиуретановые. Так, в случае использования подпора с полиуретановой матрицей наблюдается большая запреградная деформация при сохранении целостности тыльной поверхности защитного материала. В случае объединения слоев полимерных композитов с разными видами связующих в комбинированный полимерный композит подпора (образцы 1, 5) наблюдается значительное увеличение как дисперсионного параметра, так и бронестойкости комбинированного керамико-полимерного материала. Полученные результаты акустических измерений подтверждаются экспериментальными данными баллистических испытаний.

Выводы. В результате адаптации импульсного метода измерения скорости распространения упругой волны к особенностям исследуемых изделий разработана оригинальная методика оценки защитных свойств комбинированных керамико-полимерных материалов и их слоев. Применение этой методики дает возможность прогнозировать эффективность использования защитных преград разного состава, и дать рекомендации по их комплектации слоями материалов с различными свойств

Список литературы

- 1 Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования В. А. Григорян /В. А. Григорян, И. Ф. Кобылкин, В. М. Маринин, [и др.] ред. В. А. Григоряна. – М.:Изд. РадиоСофт, 2008. – 406 с.
- 2 Нешпор А.В. Ударопрочные слоистые материалы на основе керамических и полимерных композиционных слоев /А. В. Нешпор, Л. Р. Вишняков, А. В. Мазная //Технологические системы. – 2009. – № 4. – С. 34-39.
- 3 Гнесин Г. Г. Броневые керамические материалы //Неорганическое материаловедение: Энциклопед. изд.: В 2 т. /Под ред. Г. Г. Гнесина, В. В. Скорохода. – Т. 2.: Материалы и технологии. – Кн. 1 – К.: Наук. думка, 2008. – С. 171-174.
- 4 Вишняков Л.Р. Вплив конструктивно-технологічних факторів на ефективність бронееlementів на основі кераміки /Л. Р. Вишняков, О. В. Мазна, О. В. Нешпор[таін.] // Проблеми прочності. – 2004. – № 5-6. – С. 128-135.
- 5 Вишняков Л. Р. Ударна стійкість при швидкісних ударних навантаженнях склопластиків із епоксидною матрицею /Л. Р. Вишняков, О. В. Нешпор, О. В. Мазна[таін.] //Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2010. – № 1. – С. 66-71.
- 6 Гаршин А. П., /Гаршин А. П., Гропянов В. М., Зайцев Г. П[и др.]// Керамика для машиностроения. – М.: Научтехиздат, 2003. – 380 с.
- 7 Галанов Б. А. /Б. А. Галанов, О. Н. Григорьев, С. М. Иванов[и др.] Разрушение керамики и её сопротивление внедрению высокоскоростных ударников //Огнеупоры и техн. керамика. – 2004. – С. 8-15.
- 8 Ультразвук. Маленькая энциклопедия /Под ред. И. П. Голяминой. – М.:Сов.энц, 1979. – 400 с.
- 9 Безымянный Ю. Г. Особенности использования акустических методов при контроле качества слоистых материалов // Порошковая металлургия. – 1999. – № 5/6. – С. 24-29.
- 10 Неразрушающий контроль: [Справочник]: В 7 т. /Под общ. ред. В. В. Клюева. Т.3: И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге. Ультразвуковой контроль. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.
- 11 Безымянный Ю. Г. Акустическое отображение материалов с развитой мезоструктурой//Акустичний вісник. – 2006. – Т. 9. – № 2. – С. 3–16.
- 12 Вишняков Л. Р./Вишняков Л. Р., Мазна О. В., Нешпор О. В. [и др.] / Патент України № 108668МПКF41H1/02, F41H5/04 Броньова панель опубл. 25.05.2015 Бюл. – № 10.
- 13 Шутлов В. А. Основы физики ультразвука: Учеб. пособие. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1980. – 280 с.
- 14 Безымянный Ю. Г. Особенности акустических измерений при импульсном зондировании материалов, изготовляемых методами порошковой металлургии //Современные проблемы физического материаловедения: Сб. науч. тр. Института проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины. Сер."Физико-химические основы технологии порошковых материалов" – К., 2005. – С. 190–201.
- 15 Труэлл Р./Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б./Ультразвуковые методы в физике твердого тела. – М.: Мир, 1972. – 308 с.

References (transliterated)

- 1 Materialy I zashhitnye struktury dlja lokal'nogo i individual'nog obronirovaniya V. A. Grigorjan /V. A. Grigorjan, I. F. Kobylkin, V. M. Marinin, [i dr.] Pod red. V. A. Grigorjana. – Moscow. // Izd. RadioSoft, 2008. – 406 p.
- 2 Neshpor A. V. Udaroprochnye sloistye materialy na osnove keramicheskikh i polimernykh kompozicionnykh sloev [Impact-resistant laminate materials based on ceramics and polymeric composite layers.] /A. V. Neshpor, L. R. Vishnjakov, A. V. Maznaja // Tehnologicheskiesistemy. – 2009. – No 4. – pp. 34-39.
- 3 Gnesin G. G. Bronevye keramicheskie materialy [Armored ceramics materials.] // Neorganicheskoe materialovedenie: Jencikloped. izd.: Vol 2 t. /Pod red. G. G. Gnesina, V. V. Skorohoda. – 2.: Materialyitehnologii. – Kn. 1 – Kiev.: Nauk. dumka, 2008. – pp. 171-174.
- 4 Vishnjakov L. R. Vpliv konstruktivno-tehnologichnih faktoriv na effektivnist' broneelementiv na osnovi keramiki [Effect of constructional and technological factors on efficiency of armored elements based on ceramics.] /L. R. Vishnjakov, O. V. Mazna, O. V. Neshpor [ta in.] // Problemyprochnosti. – 2004. – No 5-6. – pp. 128-135.
- 5 Vishnjakov L. R. Udar na stikist' pri shvidkisnih udarnih navantazhennjah skloplastikov iz epoksidnoju matriceju [Impact resistance of glass fiber plastics with the epoxy matrix under rapid shock loading.] /L. R. Vishnjakov, O. V. Neshpor, O. V. Mazna [ta in.] // Novi materialy i tehnologii v metalurgii ta mashinobuduvanni. – 2010. – No 1. – pp. 66-71.
- 6 Garshin A. P., /Garshin A. P., Gropjanov V. M., Zajcev G. P. [i dr.] // Keramika dlja mashinostroenija. [Ceramics for engineering.] – Moscow.: Nauchtehzdat, 2003. – 380 p.
- 7 Galanov B. A. /B. A. Galanov, O. N. Grigor'ev, S. M. Ivanov [i dr.] Razrushenie keramiki I ejo soprotivlenie vnedreniju vysokoskorostnyh udarnikov. [Fracture and resistance of ceramics to introduction of rapid strikers.] // Ogneuporyitehn. keramika. – 2004. – pp. 8-15.
- 8 Ul'trazvuk. Malen'kaja enciklopedija. [Ultrasound. Little encyclopedia.] /Pod red. I. P. Goljaminoj. Sov.jenc.: Moscow., 1979. – 400 p.
- 9 Bezymjannyj Ju. G. Osobennosti ispol'zovaniya akusticheskikh metodov pri kontrole kachestva sloistyh materialov. [Peculiarities of using acoustic methods at quality

- control of laminated materials.] // Poroshkovaya metallurgiya. – 1999. – No5/6. – pp. 24-29.
- 10 Nerazrushajushhij kontrol': [Spravochnik]: Vol 7 t. /Pod obshh.red. V. V. Kljueva. T.3: I. N. Ermolov, Ju.V.Lange. Ul'trazvukovoj kontrol'. [Nondestructive testing. [Reference-book].] – Mosk.: Mashinostroenie, 2004. – 864 p.
 - 11 Bezymjannyj Ju. G. Akusticheskoe otobrazhenie materialov s razvitoj mezostrukturnoj. [Acoustical representation of materials with developed mesostructures.] // Akustichnij visnik. – 2006. – Vol. 9. – No2. – pp. 3–16.
 - 12 Vishnjakov L. R. /Vishnjakov L. R., Mazna O. V., Neshpor O. V. [i dr.] Patent Ukraїni № 108668MPKF41H1/02, F41H5/04 Bron'ova panel' opubl. [Armored panel.] 25.05.2015 Bjul. – No 10.
 - 13 Bezymjannyj Ju. G. Osobennosti akusticheskikh izmerenij pri impul'snom zondirovanii materialov, izgotovljaemyh metoda mi poroshkovoj metallurgii. [Peculiarities of acoustical measurements at impulse sounding of materials produced by methods of powder metallurgy.] // Sovremennye problem fizicheskogo materialovedenija: Sb. nauch. tr. Instituta problem materialovedenijaim. I. N. Francevicha NAN Ukraїny. Ser. "Fiziko-himicheskie osnovy tehnologii poroshkovyh materialov" – Kiev., 2005. – pp. 190–201.
 - 14 Shutilov V. A. Osnovy fiziki ul'trazvuka: Ucheb. posobie. [Grounds of physics of ultrasound.] – L. Izd-vo Leningr. un-ta, 1980. – 280 p.
 - 15 Trujell R./Trujell R., Jel'baum Ch., Chik B./ Ul'trazvukovye metody v fizike tverdogotela. [Ultrasonic methods in solid-state-physics.] – Mosk.: Mir, 1972. – 308 p.

Поступила (received) 01.05.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Особливості використання неруйнівних акустичних методів для прогнозування захисних властивостей комбінованих кераміко – полімерних матеріалів / Ю. Г. Безим'яний, О. В. Мазна, А. М. Висоцький, К. А. Комаров, О. В. Талько // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 4 (1226). – С.8–13. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2079-4525.

Особенности использования неразрушающих акустических методов для прогнозирования защитных свойств комбинированных керамико – полимерных материалов / Ю. Г. Безим'яний, А. В. Мазная, А. Н. Высоцкий, К. А. Комаров, О. В. Талько // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та преобразовательная техника. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 4 (1226). – С. 8–13. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2079-4525.

Peculiarities in using nondestructive acoustic methods for prognostication protective properties of combined ceramic – polymeric materials / Yu. G. Bezimyanniy, O. V. Mazna, A. M. Vysotsky, K. A. Komarov, O. V. Tal'ko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tehnika. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 4 (1226). – P. 8–13. – Bibliogr.: 15. – ISSN 2079-4525.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Безим'яний Юрій Георгійович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, м. Київ; тел.: (044) 424-52-00; e-mail: bezimyni@i.com.ua.

Безим'яний Юрій Георгієвич – доктор технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, г. Киев; тел.: (044) 424-52-00; e-mail: bezimyni@i.com.ua.

Bezimyanniy Yuriy Georgievych – Doctor of technical sciences, Senior Research Worker, Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of NAS of Ukraine, Kyiv; tel.: (044) 424-52-00; e-mail: bezimyni@i.com.ua.

Мазна Олександра Вікторівна – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, м. Київ; тел.: (044) 424-20-55; e-mail: mazna@i.ua.

Мазная Александра Викторовна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, г. Киев; тел.: (044) 424-20-55; e-mail: mazna@i.ua.

Mazna Oleksandra Viktorivna – Candidate of Engineering Science (Ph. D.), Senior Research Worker, Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of NAS of Ukraine, Kyiv; tel.: (044) 424-20-55; e-mail: mazna@i.ua.

Висоцький Андрій Миколайович – здобувач, провідний інженер, Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, м. Київ; тел.: (044) 424-52-00; e-mail: driver5@ukr.net.

Высоцкий Андрей Николаевич – соискатель, ведущий инженер, Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, г. Киев; тел.: (044) 424-52-00; e-mail: driver5@ukr.net.

Vysotsky Andriy Mykolayovych – Competitor, Lead Engineer, Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of NAS of Ukraine, Kyiv; tel.: (044) 424-52-00; e-mail: driver5@ukr.net.

Комаров Костянтин Андрійович – науковий співробітник, Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, м. Київ; тел.: (044) 424-52-00; e-mail: ko17kon@gmail.com

Комаров Константин Андреевич – научный сотрудник, Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, г. Киев; тел.: (044) 424-52-00; e-mail: ko17kon@gmail.com.

Komarov Konstantin Andreevich – Researcher, Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of NAS of Ukraine, Kyiv; tel.: (044) 424-52-00; e-mail: ko17kon@gmail.com.

Талько Оксана Вікторівна – молодший науковий співробітник, Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, м. Київ; тел.: (044) 424-52-00; e-mail: dep57@materials.kiev.ua.

Талько Оксана Викторовна – младший научный сотрудник, Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, г. Киев; тел.: (044) 424-52-00; e-mail: dep57@materials.kiev.ua.

Talko Oksana Viktorivna – Junior Research Worker, Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of NAS of Ukraine, Kyiv; tel.: (044) 424-52-00; e-mail: dep57@materials.kiev.ua.

УДК 621.317:635.017

О. В. ВОВНА, І. С. ЛАКТИОНОВ, А. А. ЗОРІ**МАКЕТНИЙ ЗРАЗОК КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОГО ВИМІРЮВАЧА ПАРАМЕТРІВ
МІКРОКЛІМАТУ ПРОМИСЛОВИХ ТЕПЛИЦЬ**

У статті шляхом аналізу регламентованих вимог щодо режимів зростання рослин на захищених ґрунтах та існуючих рішень побудови систем автоматичного управління технологічними процесами промислових теплиць обґрунтовано структурну схему комп'ютеризованого вимірювача параметрів мікроклімату теплиць. Розроблено апаратно-програмну реалізацію макетного зразка вимірювача. Проведено лабораторні випробування розробленого засобу вимірювання. Визначено пріоритетні напрямки подальших досліджень вимірювача з метою підвищення ефективності вітчизняних аграрних підприємств із захищеними ґрунтами.

Ключові слова: комп'ютеризований вимірювач, макетний зразок, мікроклімат, теплиця, температура, вологість.

В статье путем анализа регламентированных требований относительно режимов произрастания растений на защищенных почвогрунтах и существующих решений построения систем автоматического управления технологическими процессами промышленных теплиц обоснована структурная схема компьютеризированного измерителя параметров микроклимата теплиц. Разработана аппаратно-программная реализация макетного образца измерителя. Проведены лабораторные испытания разработанного средства измерения. Определены приоритетные направления дальнейших исследований измерителя с целью повышения эффективности отечественных аграрных предприятий с защищенными почвогрунтами.

Ключевые слова: компьютеризированный измеритель, макетный образец, микроклимат, теплица, температура, влажность.

The deep analysis of the regulated requirements for the plant growth regimes on the protected soils has been carried out in this paper. Also, the construction of the existing automatic control systems of the industrial greenhouses technological process have been analyzed. The block diagram of the greenhouses microclimate parameters computerized meter has been substantiated. The component base of the computerized meter has been defined. The hardware and software component of the computerized meter model sample have been technically implemented. Structural organization of the computerized meter of greenhouse microclimate parameters has been investigated based on study and synthesis of its subsystems functional maintenance. It provides comprehensive moisture, acidity, temperature, CO₂ concentration, electrical conductivity of the irrigation water and etc. measurements with destabilizing effects compensation which allows its operation as a part of the industrial greenhouse automation complex. The network technologies are included in the developed meter. Designed meter has the function of the measured parameters database creating. Laboratory tests of the established measurement mean have been conducted. Priority areas for further meter research have been identified, which will allow to increase the efficiency of Ukrainian agricultural enterprises with protected soils in the future.

Keywords: computerized meter, model sample, microclimate, greenhouse, temperature, moisture.

Вступ. Сільське господарство належить до стратегічних галузей, стан та ефективний розвиток яких безпосередньо впливає на функціонування національної економіки. Однією з ключових проблем агропромислового виробництва України досі є низький ступінь освоєння підприємствами сучасних інноваційних технологій, через що в галузі автоматично унеможливується процес зниження собівартості сільськогосподарської продукції та зростання її якості, які б відповідали міжнародним стандартам. Стратегічним напрямком розвитку аграрного комплексу України є підвищення продуктивності штучних екосистем із захищеними ґрунтами, до яких відносяться промислові тепличні господарства та комплекси. Разом із тим, окрім економічного ефекту від підвищення продуктивності об'єктів агропромислового комплексу із захищеними ґрунтами, необхідно враховувати факт соціального значення даної галузі господарства. Постійна наявність у раціоні працездатного населення та дітей (дитячі садки й школи) високоякісної с/г продукції впродовж усього календарного року призводить до покращення фізичного та морального стану людей.

Точний і своєчасний комплексний аналіз параметрів мікроклімату теплиць сприяє виробленню наукового підходу щодо обґрунтування ефективних агротехнічних прийомів по догляду за режимами селекції та акліматизації рослин. Одним із можливих шляхів підвищення ефективності тепличних комплексів є впровадження комп'ютеризованих

вимірювачів фізико-хімічних параметрів мікроклімату теплиць, які відповідають сучасним тенденціям розвитку науки і техніки, задля підвищення врожайності українських аграрних підприємств із захищеними ґрунтами.

Локалізація задачі дослідження. На підставі аналізу існуючих статистичних даних щодо показників вирощування культур на закритих ґрунтах встановлено наступний факт: за 2014 р. в Україні було вироблено 482 тис. тонн овочів, з них 114 потужностями с/г виробників та 368 господарствами населення. На 01.01.2015 р. в Україні загальна площа під тепличними комплексами становила – 4,5 тис. га з них 0,4 тис. га припадає на с/г підприємства та 4,1 тис. га на господарства населення [1]. Однак, продуктивність українських тепличних комплексів є недостатньою, а отже продукція вітчизняних виробників не може конкурувати з тією, що виробляється європейськими підприємствами. Підвищення врожайності українських тепличних господарств можна досягти за рахунок впровадження прогресивних комплексів автоматизації виробничих процесів теплиць, показники ефективності яких безпосередньо залежать від функціональних та метрологічних характеристик комп'ютеризованих засобів вимірювання сукупності фізико-хімічних параметрів їх мікроклімату.

Метою статті є обґрунтування структури, технічна реалізація та лабораторні випробування макетного зразка комп'ютеризованого вимірювача

параметрів мікроклімату промислових теплиць із використанням сучасної компонентної бази.

Для досягнення поставленої мети було сформульовано та вирішено наступні задачі:

- визначення сукупності параметрів мікроклімату теплиць, а також робочих діапазонів та допустимих похибок їх вимірювань, з точки зору інформативності їх впливу на показники темпів та об'ємів зростання інтродукованих тепличних культур;

- аналіз технічних і метрологічних характеристик та функціональних можливостей існуючих рішень щодо побудови систем контролю фізико-хімічних параметрів мікроклімату промислових теплиць;

- розробка структурної схеми досліджуваного вимірювача та обґрунтування компонентної бази, на якій буде побудовано інформаційно-вимірювальну систему з урахуванням регламентованих вимог до метрологічних та технологічних показників засобу вимірювання;

- обґрунтування базових функцій вимірювальної системи, принципів її функціонування, а також технічна реалізація макетного зразка вимірювача із його подальшими лабораторними випробуваннями.

Результати розробки та досліджень. На підставі аналізу актуальних на теперішній час вимог щодо принципів вирощування культур на захищених ґрунтах [2–4] обов'язковим є виконання вимірювань в режимі реального часу наступних фізико-хімічних параметрів в робочій зоні теплиці «Inside»: температура та вологість повітря; концентрація CO₂; рівень освітлення в одиницях природної фотосинтетичної активної радіації (ФАР); температура та вологість ґрунту; кислотність, температура та електропровідність поливної води; швидкість руху потоків повітря. Також для більш адекватної оцінки впливу параметрів мікроклімату теплиць на режими зростання культур та їх регулювання в допустимих межах є необхідність у вимірюванні вологості й температури навколишнього середовища «Outside», що також дозволить більш раціонально використовувати ресурси й електричну енергію.

Згідно існуючої інформації щодо поточних локацій потужностей аграрних виробництв із захищеними ґрунтами встановлено, що вони найчастіше віддалені від місць розташування головних офісів та спеціалізованих лабораторій аграрних підприємств, що погіршує показник оперативного реагування на ефективність зростання культур. Отже, вимога щодо реалізації віддаленого контролю параметрів мікроклімату теплиць є обов'язковою при розробці вимірювача.

На підставі проведеного аналізу технічних характеристик та функціональних можливостей існуючих систем автоматичного управління технологічними процесами теплиць [5, 6] встановлено, що більшість із них не реалізують on-line вимірювань повного переліку регламентованих показників. Також до недоліків відомих систем можна віднести той факт, що вони не реалізують функцію прогнозування динаміки вимірюваних параметрів, яка

є актуальною для інерційних об'єктів таких, як промислові теплиці та селекційні комплекси. Існуючі системи також потребують значних капіталовкладень та мають значний період окупності проекту.

Отже, виходячи з результатів проведеного аналізу апіорної інформації можна зробити висновок, що досліджуваний комп'ютеризований вимірювач параметрів мікроклімату теплиць повинен реалізовувати наступні базові функції:

1. On-line вимірювання параметрів мікроклімату промислових теплиць «Inside» та «Outside».

2. Передача даних вимірювань до віддалених місць їх реєстрації та обробки з метою оперативної корекції інформативних параметрів мікроклімату теплиць.

3. Формування бази даних результатів вимірювань з метою уточнення існуючих математичних моделей, що описують закономірності взаємозв'язку фізико-хімічних параметрів мікроклімату теплиць, а також побудови на їх базі екстраполяційних моделей.

4. Реалізація принципів автоматизованого та автоматичного управління засобами й виконавчими механізмами регулювання параметрів технологічних процесів промислових теплиць.

На підставі проведених досліджень з урахуванням регламентованих вимог до переліку вимірюваних параметрів та базових функцій розроблюваного вимірювача було обґрунтовано його структурну схему, яку наведено на рис. 1.

На підставі аналізу вимог до метрологічних характеристик та базових функцій вимірювача з урахуванням результатів попередніх досліджень [7, 8] було обґрунтовано компонентну базу для реалізації макетного зразка досліджуваної системи. При вирішенні задачі вибору сенсорів фізико-хімічних параметрів мікроклімату промислових теплиць та модулів розширення функціональних можливостей вимірювача було прийнято до уваги фактор сумісності датчиків з мікропроцесорною платформою Arduino Uno, на якій реалізовано макетний зразок досліджуваного засобу вимірювання. Таким чином, апаратну складову макетного зразка досліджуваного вимірювача реалізовано із використанням наступних функціональних вузлів та блоків:

- вимірювальні канали (ВК) температури (T) й вологості (W) ґрунту та кислотності (pH), електропровідності (σ) і T поливної води побудовано на базі розробленого авторами статті макетного зразка інформаційно-вимірювальної системи фізичних параметрів ґрунтів промислових теплиць [9];

- ВК T й W повітря «Inside» та «Outside» побудовано на базі датчика DHT 22, який має наступні метрологічні характеристики: діапазон вимірювання T від -40 до 80 °C, сумарна абсолютна похибка $\pm 0,5$ °C; діапазон вимірювання W від 0 до 100 %, сумарна абсолютна похибка ± 2 % [10];

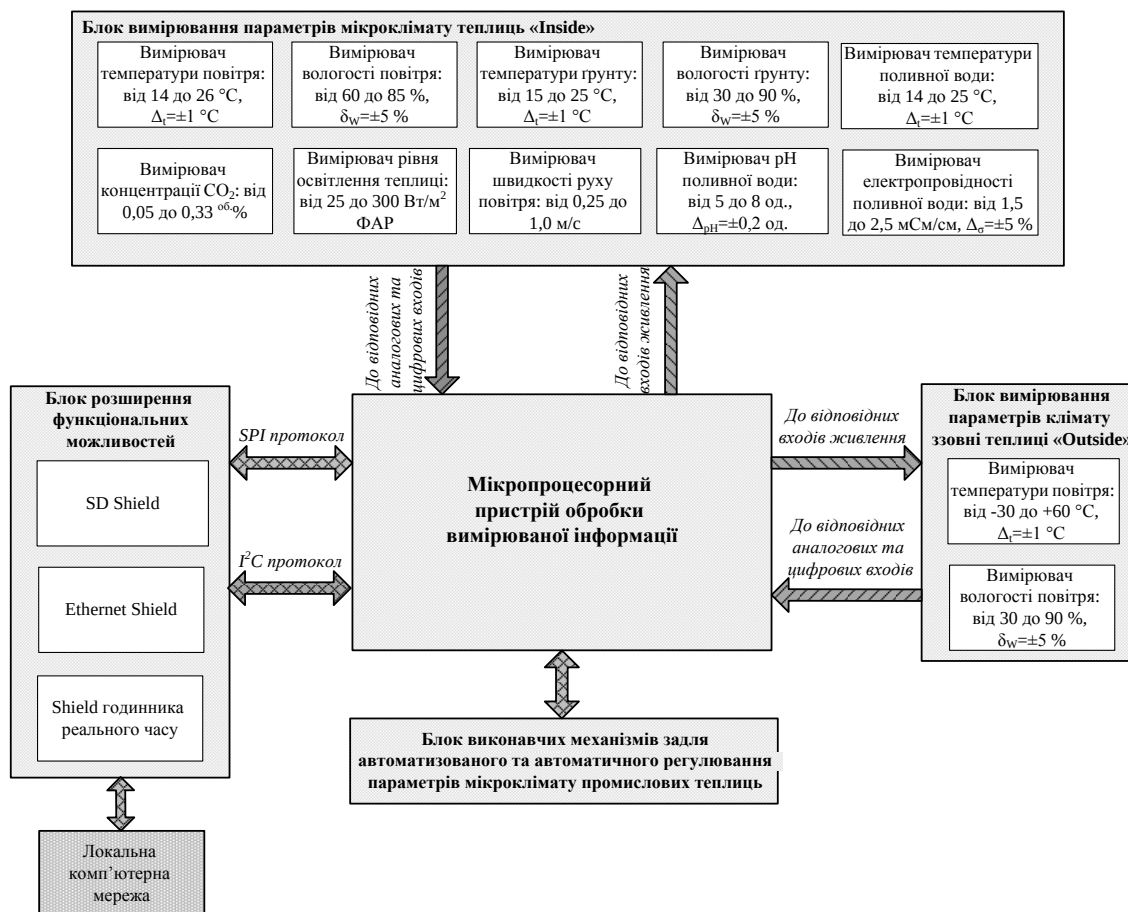
- ВК рівня освітлення побудовано на базі фоторезистору типу VT90N2 [10];

- ВК концентрації CO₂ побудовано на базі електрохімічного сенсору типу MG-811 [10];

– ВК швидкості руху потоків повітря побудовано на базі сумісного з Arduino анемометру [11];

– в якості вузлів блоку розширення функціональних можливостей використано SD Card Shield; Ethernet ENC28J60 Shield та Real time clock модуль на базі мікросхеми DS1307 [10].

На підставі обґрунтованої компонентної бази було реалізовано макетний зразок комп'ютеризованого вимірювача параметрів мікроклімату промислових теплиць та проведено його первинні лабораторні випробування (див. рис. 2).



Примітка: для вимірювачів концентрації CO₂, рівня освітлення приміщення теплиці та швидкості руху повітря в приміщенні теплиці показники точності вимірювання не нормуються.

Рис. 1 – Структурна схема комп'ютеризованого вимірювача фізико-хімічних параметрів мікроклімату промислових теплиць

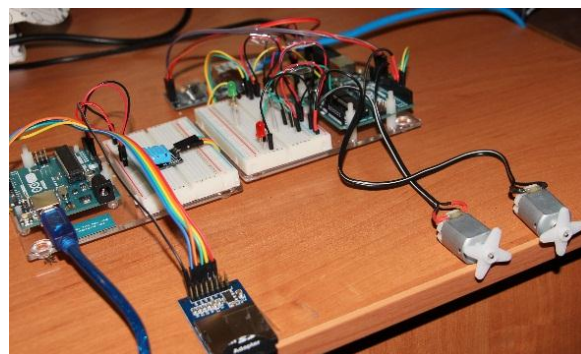
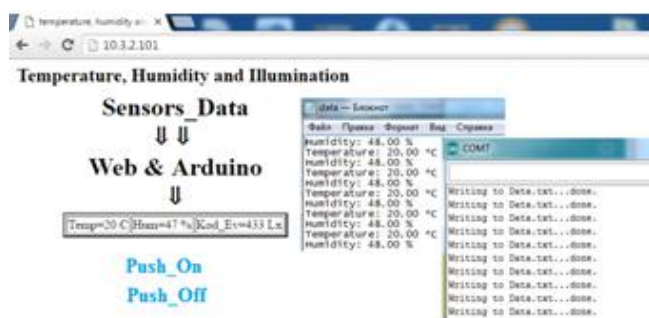


Рис. 2 – Результати розробки комп'ютеризованого вимірювача параметрів мікроклімату теплиць

Реалізований макетний зразок, зовнішній вигляд та результати роботи якого наведено на рис. 2, виконує наступні базові функції: on-line вимірювання фізико-хімічних параметрів мікроклімату теплиць;

локальна та віддалена (за допомогою Web інтерфейсу) реєстрація, індикація й обробка вимірюваних значень фізичних параметрів; формування бази даних вимірюваних параметрів; автоматизоване та

автоматичне управління засобами й виконавчими механізмами регулювання вимірюваних параметрів технологічних процесів у промислових теплиць. На підставі цього можна зробити висновок, що реалізований макетний зразок вимірювача може бути використаний в якості інструменту для проведення подальших наукових досліджень: з виявлення закономірностей взаємного впливу вимірюваних параметрів на показники ефективності вирощування рослин на захищених ґрунтах; удосконалення існуючих та створення нових математичних моделей процесів, що протікають у вимірювальних каналах інформаційно-вимірювальної системи параметрів мікроклімату теплиць; побудови моделей прогнозування динаміки інформативних параметрів мікроклімату теплиць з урахуванням дестабілізуючих факторів; розробки методів та засобів автоматичного управління технологічними процесами з вирощування інтродукованих культур на захищених ґрунтах.

Реалізація заявлених напрямків досліджень дозволить покращити показники врожайності вітчизняних об'єктів агропромислового комплексу за рахунок впровадження комп'ютеризованих вимірювачів фізико-хімічних параметрів мікроклімату теплиць.

Висновки. 1. Обґрунтовано базову сукупність інформативних фізико-хімічних параметрів мікроклімату промислових аграрних підприємств із захищеними ґрунтами та проведено аналіз функціональних можливостей існуючих рішень щодо побудови систем автоматичного управління технологічними процесами теплиць, що дозволило обґрунтувати вимоги та розробити структурну схему досліджуваного макетного зразка вимірювача.

2. Розроблено апаратно-програмну реалізацію макетного зразка вимірювача, який дозволяє виконувати функції локальної та віддаленої реєстрації й обробки вимірюваної інформації щодо показників мікроклімату промислових теплиць з можливістю формування бази даних вимірюваних параметрів тепличних комплексів.

3. Встановлено пріоритетні напрямки подальших досліджень із використанням розробленого комп'ютеризованого вимірювача, що в перспективі дозволить підвищити врожайність вітчизняних агропромислових об'єктів із захищеними ґрунтами з вирощування овочів та квітів.

Список літератури

1. *Agronews*. Всеукраїнське інформаційне агентство [Електронний ресурс]: Виробництво тепличних овочів в Україні. – Режим доступу: <http://agronews.ua/node/52262>. – Дата звертання: 11 березня 2016.
2. *ВНТП АПК–19–07*. Тепличні і оранжерейні підприємства. Споруди захищеного ґрунту для фермерських (селянських) господарств: Відомчі норми технологічного проектування / М-во аграр. політ. України. – К.: «ХІК», 2007. – 140 с.
3. *НТП 10-95*. Нормы технологического проектирования теплиц и тепличных комбинатов для выращивания овощей и рассады: Ведомственные нормы технологического проектирования / Минсельхозпрод РФ. – М.: Гипронисельпром, 1996. – 87 с.

4. *НТП АПК 1.10.09.001-02*. Нормы технологического проектирования селекционных комплексов и репродукционных теплиц: Ведомственные нормы технологического проектирования / Минсельхоз РФ. – М.: Гипронисельпром, 2003. – 24 с.
5. *НПФ «Фито»* [Електрон. ресурс]: контроль за технологическими параметрами в теплицах. – Режим доступу: <http://www.greenhouses.ru/Kontrol-za-tehnicheskimi-parametrami-v-teplicah>. – Дата звертання: 12 березня 2016.
6. *«Промгидропоника»* [Електрон. ресурс]: управление микроклиматом в промышленных теплицах. – Режим доступу: <http://www.promgidroponica.ru/index.php?q=node/1198>. – Дата звертання: 12 березня 2016.
7. *Лактионов И.С.* Разработка и исследование макетного образца измерителя влажности почвы / И.С. Лактионов, В.В. Турупалов // Збірн. наук. пр. Донецьк. ін-ту заліз. трансп. укр. держ. академ. заліз. трансп. – Донецьк. – 2014. – Вип. 38. – С. 13–19.
8. *Лактионов И.С.* Полевой измеритель кислотности почв с аппаратно-программной компенсацией дестабилизирующего влияния естественной влажности / И.С. Лактионов, М.Ю. Никоненко // Наук. пр. Донецьк. нац. техн. ун-ту. Сер.: «Обчислювальна техніка та автоматизація». – Красноармійськ. – 2015. – Вип. 1 (28) 2015. – С. 133–140.
9. *Лактионов И.С.* Комп'ютеризована інформаційно-вимірювальна система фізичних параметрів ґрунтів промислових теплиць з компенсацією дестабілізуючих впливів автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук: спец. 05.13.05 «Комп'ютерні системи та компоненти» / Лактионов Іван Сергійович; Держ. вищ. навч. закл. «Донец. нац. техн. ун-т». – Красноармійськ. – 2015. – 20 с. – укр.
10. *Arduino-ua* [Електрон. ресурс]: шилди и датчики. – Режим доступу: <https://arduino-ua.com/cat6-Datchiki>. – Дата звертання: 03 квітня 2016.
11. *Amperka* [Електрон. ресурс]: анемометр. – Режим доступу: <http://amperka.ru/product/anemometer-kit>. – Дата звертання: 05 квітня 2016.

References (transliterated)

1. Vseukrayinske informatsiyne agentstvo Agronews [All Ukrainian news agency Agronews]. Available at: <http://agronews.ua/node/52262>. (accessed 12.04.2016).
2. Vidomchi normi tehnologichnogo projektuvannya (2007), VNTP APK–19–07. Teplichni i oranzhereyni pidpriemstva. Sporudi zahishchenogo gruntu dlya fermerskih (selyanskikh) gospodarstv [Greenhouse and greenhouse businesses. Structures protected ground for farming (rural) farm]. «HIK», Kiev, Ukraine.
3. Vedomstvennye normy tehnologicheskogo proektirovaniya (1996), NTP 10-95. Normy tehnologicheskogo proektirovaniya teplits i teplichnyh kombinatov dlya vyrashchivaniya ovoshchey i rassady [Norms of technological designing greenhouses and greenhouse combines for growing vegetables and sprouts]. Giproniselprom, Moscow, Russian Federation.
4. Vedomstvennye normy tehnologicheskogo proektirovaniya (2003), NTP APK 1.10.09.001-02. Normy tehnologicheskogo proektirovaniya selektsionnykh kompleksov i reproduktsionnykh teplits: Vedomstvennye normy tehnologicheskogo proektirovaniya [Norms of technological designing breeding complexes and reproduction greenhouses]. Giproniselprom, Moscow, Russian Federation.
5. NPF «Fito» [NPF «Phyto»]. Available at: <http://www.greenhouses.ru/Kontrol-za-tehnicheskimi-parametrami-v-teplicah> (accessed 15.04.2016).
6. «Promgidroponika» [Industrial hydroponics]. Available at: <http://www.promgidroponica.ru/index.php?q=node/1198> (accessed 15.04.2016).
7. Laktionov I.S., Turupalov V.V. Razrabotka i issledovanie maketnogo obraztsa izmeritelya vlazhnosti pochvy [Development and research of the soil moisture meter model sample]. *Zbirk. nauk. pr. Donetsk. in-tu zalizn. transp. ukr. derzh. akadem. zalizn. transp.* 2014, Vol. 38, pp. 13–19.
8. Laktionov I.S., Nikonenko M.Ju. Polevoy izmeritel kislotnosti pochvy s apparatno-programmnoy kompensatsiey destabiliziruyushchego vliyaniya estestvennoy vlazhnosti [Field meter of the soil acidity with hardware and software compensation

- of the natural moisture destabilizing effect]. *Nauk. pr. Donetsk. nats. tehn. un-tu. Ser.: «Obchislyvalna tehnika ta avtomatizatsiya»*. 2015, Vol. 1 (28), pp. 133–140.
9. Laktionov I.S. Komp'yuterizovana informatsiyno-vimiryuvalna sistema fizichnih parametriv gruntiv promislovih teplits z kompensatsieyu destabilizuyuchih vpliviv [The computerized information-measuring system of the industrial greenhouses soil physical parameters with destabilizing influences compensation]. *avtoref. dis. na здобuttya nauk. stupenya kand. teh. nauk: spets. 05.13.05 «Komp'yuterni sistemi ta komponenti»*. 2015, 20 p.
10. «Arduino-ua» [Arduino-ua]. Available at: <https://arduino-ua.com/cat6-Datchiki> (accessed 20.04.2016).
11. «Amperka» [Amperka]. Available at: <http://amperka.ru/product/anemometer-kit> (accessed 22.04.2016).

Надійшла (received) 25.05.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Макетний зразок комп'ютеризованого вимірювача параметрів мікроклімату промислових теплиць / О.В. Вовна, І.С. Лактіонов, А.А. Зорі // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 4 (1226). – С. 14–18. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-4525.

Макетный образец компьютеризированного измерителя параметров микроклимата промышленных теплиц / А. В. Вовна, И. С. Лактионов, А. А. Зори // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 4 (1226). – С. 14–18. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-4525.

The computerized meter model sample of the industrial greenhouses microclimate parameters / O. V. Vovna, A. A. Zori, P. N. Akhmedov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tehnika. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 4 (1226). – P. 14–18. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-4525.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Вовна Олександр Володимирович – доктор технічних наук, доцент, Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», професор кафедри електронної техніки, м. Покровськ (Красноармійськ); тел.: +38(050) 193-35-44; e-mail: Vovna_Alex@ukr.net.

Вовна Александр Владимирович – доктор технических наук, доцент, Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», профессор кафедры электронной техники, г. Покровск (Красноармейск); тел.: +38(050) 193-35-44; e-mail: Vovna_Alex@ukr.net.

Vovna Oleksandr Volodimirovich – Doctor of Technical Sciences, Docent, State Higher Education Establishment «Donetsk National Technical University», Professor at the Department of Electronic Technique, Pokrovsk (Krasnoarmiisk); tel.: +38(050) 193-35-44; e-mail: Vovna_Alex@ukr.net.

Лактіонов Іван Сергійович – кандидат технічних наук, Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», старший викладач кафедри електронної техніки, м. Покровськ (Красноармійськ); тел.: (050) 556-21-43; e-mail: ivanlaktionov88@mail.ru.

Лактионов Иван Сергеевич – кандидат технических наук, Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», старший преподаватель кафедры электронной техники, г. Покровск (Красноармейск); тел.: (050) 556-21-43; e-mail: ivanlaktionov88@mail.ru.

Laktionov Ivan Sergiyovich – Candidate of Engineering Science (Ph. D.), State Higher Education Establishment «Donetsk National Technical University», Senior lecturer of the Electronic technology department, Pokrovsk (Krasnoarmiisk); tel.: (050) 556-21-43; e-mail: ivanlaktionov88@mail.ru.

Зорі Анатолій Анатолійович – доктор технічних наук, професор, Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», завідувач кафедри електронної техніки, м. Покровськ (Красноармійськ); тел.: +38(050) 174-12-14; e-mail: Zori_AA@mail.ru.

Зори Анатолий Анатольевич – доктор технических наук, профессор, Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», заведующий кафедры электронной техники, г. Покровск (Красноармейск); тел.: +38(050) 174-12-14; e-mail: Zori_AA@mail.ru.

Zori Anatolij Anatolijovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, State Higher Education Establishment «Donetsk National Technical University», Head at the Department of Electronic Technique, Pokrovsk (Krasnoarmiisk); tel.: +38(050) 174-12-14; e-mail: Zori_AA@mail.ru.

УДК 543.42:621.384.3:622.412

О. В. ВОВНА, А. А. ЗОПІ, Р. Н. АХМЕДОВ

**ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ОПТОЕЛЕКТРОННОГО ВИМІРЮВАЧА
КОНЦЕНТРАЦІЇ ГАЗУ В РУДНИЧНІЙ АТМОСФЕРІ ШАХТ**

При виконанні досліджень вимірювача концентрації метану встановлено, що використання оптоелектронних компонентів із спектрально-узгодженими характеристиками та їх заливкою халькогенідним склом підвищує оптоелектронний к.к.д. вимірювача у 1,7 разів. Впровадження запропонованих рекомендацій зменшило основну похибку вимірювання метану з 0,2 % до 0,08 % у діапазоні від 0 до 4 %.

Отриманий результат істотно перевищує показники точності існуючих аналогів вимірювачів концентрації метану в рудничній атмосфері.

Ключові слова: вимірювач, концентрація, метан, вугільна шахта, оптоелектронний блок, похибка.

При выполнении исследований измерителя концентрации метана установлено, что использование оптоэлектронных компонентов со спектрально-согласованными характеристиками и их заливкой халькогенидным стеклом повышает оптоэлектронный к.к.д. измерителя в 1,7 раз. Внедрение предложенных рекомендаций уменьшило основную погрешность измерения метана с 0,2 % до 0,08 % в диапазоне от 0 до 4 %.

Полученный результат существенно превышает показатели точности существующих аналогов измерителей концентрации метана в рудничной атмосфере шахт.

Ключевые слова: измеритель, концентрация, метан, угольная шахта, оптоэлектронный блок, погрешность.

In carrying out the concentration methane meter research following information has been obtained: optoelectronic components using with consistent spectral characteristics and their chalcogenide glass casting increases the efficiency of optoelectronic meter at 1.7 times. The implementation of proposed recommendations reduced basic error of the methane measuring from 0.2 % to 0.08 % in the range from 0 to 4 %.

The obtained result is significantly higher than the accuracy of the existing analogue gauges of the methane concentration in the mine atmosphere.

Keywords: measurer, concentration, methane, coal mine, optoelectronic unit, error.

Вступ. У зв'язку з наявністю агресивного середовища рудничної атмосфери і комплексу дестабілізуючих факторів, зміни яких впливають на результати вимірювань концентрації метану до сьогодні не було можливості створити швидкодіючі високоточні газоаналітичні вимірювачі з необхідними метрологічними характеристиками [1]. Існуючі вимірювачі не забезпечують потрібну швидкодію вимірювання концентрації газів за регламентованими показниками точності [2] та метрологічної надійності.

Значною мірою цю проблему можна вирішити з використанням новітніх систем оптоелектронного вимірювального контролю концентрації метану в гірничих виробках вугільних шахт [3]. Проте недостатній розвиток теоретичної бази вимірювальних систем концентрації газових компонент перешкоджає створенню сучасних засобів аерогазового контролю.

Отже, вирішення проблеми розвитку існуючих методів і створення принципово нових підходів до вимірювання концентрації газових компонент [4] дозволив розробити науково-практичний підхід до побудови серійних вимірювачів на базі оптоелектронної платформи для контролю параметрів рудничної атмосфери в реальному масштабі часу з необхідними метрологічними характеристиками [5, 6], що і є принципово важливою проблемою в теоретичній та прикладній площинах.

Постановка задач досліджень. Метою роботи є підвищення точності оптоелектронного вимірювача концентрації метану в рудничній атмосфері шляхом підвищення оптоелектронного к.к.д., що дозволило зменшити величину основної похибки вимірювання при збереженні його регламентованої швидкодії. Для досягнення мети у роботі поставлені задачі:

– розробити математичну модель оптоелектронного блоку вимірювача;

– оцінити вплив зміни дестабілізуючих факторів на результат вимірювання концентрації метану;

– розробити пропозиції щодо зменшення величини похибки вимірювання концентрації метану.

Результати розробки та досліджень. До складу вимірювача концентрації метану в рудничній атмосфері входить оптоелектронний та аналоговий блоки (див. рис. 1). Оптоелектронний блок складається з джерела випромінювання (ДВ), модулятора оптичного випромінювання (МД), вимірювального відкритого оптичного каналу (ОК) і фотодетектора (ФД). До складу аналогового блоку входить фотоприймальний пристрій (ФПП), демодулятор (ДМ) та нормувальний перетворювач (НП), який нормує характеристику перетворення вимірювача до уніфікованого вигляду для подальшого перетворення та обробки у цифровому вигляді з передачею інформації щодо зміни концентрації метану до системи аерогазового захисту шахт.

Для отримання характеристик перетворення швидкодіючого оптоелектронного вимірювача концентрації метану в рудничній атмосфері шахт здійснено облік інформативного параметра – концентрації метану ($C_{CH_4}^{об. \%}$) та дестабілізуючих факторів – конструктивні параметри оптико-абсорбційного вимірювача.

Принцип вимірювання базується на поглинанні оптичного випромінювання в ОК та описується законом Бугера-Ламберта-Бера [7], який зв'язує інтенсивність поглинання ($I_{ВЛХ ОК}$) з довжиною шляху (l) та концентрацією вимірювального газового компоненту (C_{CH_4}). Під час розробки математичної моделі визначено коефіцієнт передачі оптичного каналу $T_{пр}$ (див. рис. 1), який дорівнює відношенню інтенсивності вихідного ($I_{ВЛХ ОК}$) до вхідного ($I_{ВХ ОК}$) оптичних потоків ОК.

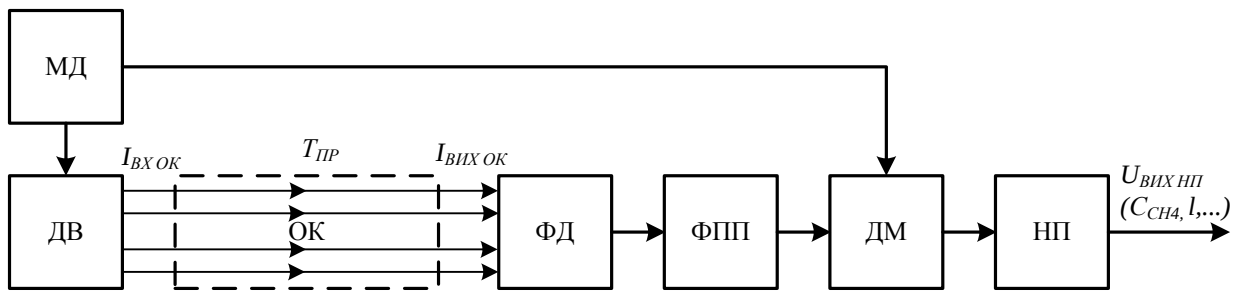


Рис. 1 – Структурна схема оптичелектронного вимірювача концентрації метану

У оптичелектронному блоці необхідно забезпечити максимальний коефіцієнт передачі T_{PP} відкритого ОК. Тому виникає задача проведення досліджень впливу дестабілізуючих факторів та розробки методів і засобів для забезпечення мінімізації їх впливу. Розробка та реалізація відповідних рекомендацій дозволило підвищити якість аналітичних оптичелектронних вимірювачів концентрації газових компонент, які розробляються або вдосконалюються, для виробничих умов рудничної атмосфери вугільних шахт та систем екологічного моніторингу.

Залежно від типу призначення та спеціалізованих функцій, що реалізуються оптичними системами, використовують різні критерії їх якості. До числа загальних критеріїв для більшості систем відносяться коефіцієнт корисної дії оптичної системи η_O (оптичний к.к.д.), який визначає втрати потужності випромінювання у системі з обліком передавальної та приймальної частини. Також до цих критеріїв відносяться коефіцієнт оптичного підсилення системи, оптичну передавальну функцію, роздільну здатність і низку пов'язаних з ними параметрів, які описують просторове розподілення системи. У цій роботі під час складання моделі оптичного вимірювального каналу концентрації метану запропоновано використовувати кількісний критерій якості оптичної системи – максимум к.к.д.

Під час аналізу математичної моделі оптичного вимірювального каналу концентрації метану запропоновано використовувати комплексний показник – оптичелектронних к.к.д. (η_{OE}), який визначає частку корисного сигналу, що надходить до входу вимірювача. Цей сигнал використовується для створення вихідного сигналу, який має інформативну складову. К.к.д. залежить від дестабілізуючих факторів, найважливіші з яких:

- втрати потоку в оптичній системі вимірювача, значення яких оцінюються оптичним к.к.д. (η_O);
- втрати через відсутність належного спектрального узгодження параметрів оптичелектронних компонент вимірювача, а також просторових параметрів приймача з параметрами оптичної та електронної системи, значення яких оцінюється коефіцієнтом узгодження (η_{UZ});
- втрати при модуляції та обробці сигналу, які враховуються коефіцієнтом модуляції (k_M).

Отже, к.к.д. оптичелектронного вимірювального каналу концентрації метану може бути розраховано за співвідношенням:

$$\eta_{OE} = \eta_O \cdot \eta_{UZ} \cdot k_M. \quad (1)$$

Для оцінки величини оптичелектронного к.к.д. (η_{OE}) необхідно розробити і дослідити модель втрат потоку оптичного випромінювання у відкритому каналі вимірювача концентрації метану. Для більшості оптичних систем під оптичним к.к.д. η_O зазвичай розуміють відношення потоку (Φ_{PP}), що надходить до приймача до потоку, який надійшов від ДВ (Φ_0). Тому η_O оцінюється:

$$\eta_O = \frac{\Phi_{PP}}{\Phi_0} = \tau_O \cdot k_D, \quad (2)$$

де τ_O – коефіцієнт пропускання оптичної системи;

k_D – коефіцієнт діафрагмування, що враховує можливе затемнення центру зіниці лінзи, або віньєтування – затемнення крайового периметру лінзи.

У оптичній системі основні втрати випромінювання обумовлено віддзеркаленням на межах оптичних середовищ, поглинанням у матеріалах оптичних компонентів вимірювача, а також за під час віньєтування або діафрагмування оптичних потоків випромінювання. На основі теорії оптичних систем [8] її коефіцієнт пропускання, що враховує втрати на поглинання та віддзеркалення, описується такою залежністю:

$$\tau_O = \prod_{k=1}^N (1 - \rho_k) \cdot \prod_{m=1}^p (1 - a_{om}) \cdot \prod_{n=1}^{N_3} \rho_{\partial zn}, \quad (3)$$

де N – число поверхонь розділу;

ρ_k – коефіцієнт віддзеркалення на k -й поверхні розділу оптичного середовища;

p – число оптичних середовищ, крізь які проходить випромінювання;

a_{om} – коефіцієнт поглинання променів у m -му оптичному середовищі;

$\rho_{\partial zn}$ – коефіцієнт віддзеркалення на n -й дзеркальній поверхні;

N_3 – число дзеркальних поверхонь.

Основними компонентами оптоелектронного блоку, оптичну схему якого наведено на рис. 2, разом з ОК вимірювача є світловипромінюючий діод (СВД) та фотодіод (ФД) з лінзами фокусування (L_1 і L_2) потоку оптичного випромінювання. Вибір СВД та ФД ІЧ-випромінювання ґрунтується на узгодженості спектру поглинання метану в ОК із спектральними характеристиками, як СВД, так і ФД. Як ДВ вимірювального каналу обрано СВД типу

lms34LED [9] з $\lambda_{\text{lms34LED}} = 3,4$ мкм, яка відповідає максимальній інтенсивності спектральних ліній поглинання метану. За рекомендаціями виробника цих оптоелектронних компонентів обрано ФД типу lms36PD [10], оскільки його спектральні характеристики найбільш близькі та узгоджені із спектральними характеристиками СВД типу lms34LED.

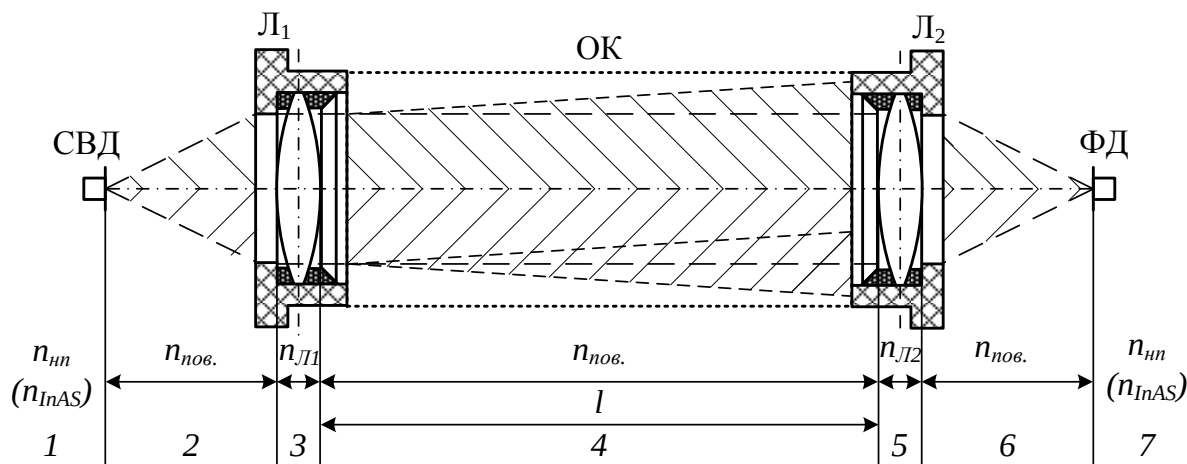


Рис. 2 – Оптична схема вимірювача концентрації метану

Коефіцієнт пропускання оптичного випромінювання, яке надходить за нормаллю до поверхні розділу двох середовищ – напівпровідник-повітря ($T_{\text{нп, нов.}}$) для СВД та повітря-напівпровідник ($T_{\text{нов, нп}}$) для ФД, визначається за формулою:

$$T_{\text{нп, нов.}}(n_{\text{нп}}) = T_{\text{нов, нп}}(n_{\text{нп}}) = \frac{4 \cdot n_{\text{нп}} \cdot n_{\text{нов.}}}{(n_{\text{нов.}} + n_{\text{нп}})^2}, \quad (4)$$

для поверхні GaAs ($n_{\text{нп}} = n_{\text{GaAs}} = 3,54$) – повітря ($n_{\text{нов.}} = 1$) він дорівнює 0,69; InAs ($n_{\text{нп}} = 3,4$) – повітря – 0,70; GaP ($n_{\text{нп}} = 3,3$) – повітря – 0,71. Біля критичного кута виведення випромінювання з СВД коефіцієнт пропускання ($T_{\text{нп, нов.}} = T_{\text{нов, нп}}$) зменшується. Середній коефіцієнт пропускання для таких напівпровідників зменшується не більше ніж на 3 %, при цьому його значення складає 0,67; 0,68 і 0,69 відповідно. Під час розробки оптоелектронного блоку вимірювального каналу концентрації метану як ДВ

використовуються СВД типу lms34LED [9], що виготовлено на основі ґратчастої гетероструктури InAsSbP/InAs з коефіцієнтом заломлення оптичного випромінювання, величина якого складає 3,4.

Як оптичний матеріал, з якого виготовляються лінзи (L_1 і L_2) оптичної системи (див. рис. 2), використовується синтетичний сапфір (Al_2O_3), показник заломлення ($n_L = n_{\text{Al}_2\text{O}_3}(\lambda)$) якого залежить від довжини хвилі випромінювання. У робочому діапазоні довжин хвиль (від 2,8 до 4,4 мкм) оптоелектронних компонентів вимірювального каналу концентрації метану показник заломлення $n_{\text{Al}_2\text{O}_3}(\lambda)$ змінюється від 1,720 до 1,649, що складає не більше 5 %, тому цим фактором можна знехтувати.

Коефіцієнт пропускання оптичної системи τ_o , структуру якої наведено на рис. 2, з обліком втрат оптичного випромінювання під час поглинання та віддзеркалення на основі (3), розраховано за таким співвідношенням:

$$\begin{aligned} \tau_o(n_{\text{нп}}, n_L) &= \\ &= T_{\text{нп, нов.}}(n_{\text{нп}}) \cdot T_{\text{нов, Л1}}(n_L) \cdot T_{\text{Л1, нов.}}(n_L) \cdot T_{\text{нов, Л2}}(n_L) \cdot T_{\text{Л2, нов.}}(n_L) \cdot T_{\text{нов, нп}}(n_{\text{нп}}) = \\ &= \frac{4 \cdot n_{\text{нп}} \cdot n_{\text{нов.}}}{(n_{\text{нов.}} + n_{\text{нп}})^2} \cdot \frac{4 \cdot n_{\text{нов.}} \cdot n_{L1}}{(n_{L1} + n_{\text{нов.}})^2} \cdot \left(\frac{4 \cdot n_{\text{нов.}} \cdot n_L}{(n_L + n_{\text{нов.}})^2} \right)^2 \cdot \frac{4 \cdot n_{L2} \cdot n_{\text{нов.}}}{(n_{\text{нов.}} + n_{L2})^2} \cdot \frac{4 \cdot n_{\text{нов.}} \cdot n_{\text{нп}}}{(n_{\text{нп}} + n_{\text{нов.}})^2} = \\ &= \underbrace{\frac{4 \cdot 3,4 \cdot 1}{(1 + 3,4)^2}}_{0,656} \cdot \underbrace{\frac{4 \cdot 1 \cdot 1,693}{(1,693 + 1)^2}}_{0,934^2} \cdot \underbrace{\left(\frac{4 \cdot 1 \cdot 1,693}{(1,693 + 1)^2} \right)^2}_{0,656} \cdot \frac{4 \cdot 1,693 \cdot 1}{(1 + 1,693)^2} \cdot \frac{4 \cdot 1 \cdot 3,4}{(3,4 + 1)^2} = 0,375. \end{aligned} \quad (5)$$

З аналізу результатів оцінки коефіцієнта пропускання оптичної системи, які наведено у формулі (5), можна зробити висновок, що оптичний к.к.д. каналу без урахування втрат випромінювання під час його введення до вікна ФД складає не більше 38 %. Основні втрати оптичної потужності мають місце (див. рис. 2) на межах розділу 1–2 і 2–3 передавальної ($T_{np,нов} \cdot T_{нов,Л1}$), а також 5–6 і 6–7 приймальної ($T_{Л1,нов} \cdot T_{нов,пн}$) частини системи. На основі проведених розрахунків за формулою (5) їх величина складає 0,656 для кожного з вузлів вимірювального каналу окремо.

Зниження величини цих втрат є можливим завдяки використанню об'ємного покриття відповідної форми активного елементу випромінювача (СВД) і приймача (ФД). Це покриття повинно бути оптично прозорим матеріалом з показником заломлення ($n_{ск}$),

$$\begin{aligned} \tau'_o(n_{пт}, n_{ск}) &= T_{пт,ск}(n_{пт}, n_{ск}) \cdot T_{ск,нов}(n_{ск}) \cdot T_{нов,ск}(n_{ск}) \cdot T_{ск,пн}(n_{пт}, n_{ск}) = \\ &= \frac{4 \cdot n_{пт} \cdot n_{ск}}{(n_{ск} + n_{пт})^2} \cdot \left(\frac{4 \cdot n_{нов} \cdot n_{ск}}{(n_{ск} + n_{нов})^2} \right)^2 \cdot \frac{4 \cdot n_{ск} \cdot n_{пт}}{(n_{пт} + n_{ск})^2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Під час проведення досліджень отримано залежність відношення оптичних к.к.д. $\tau'_o(n_{пт}, n_{ск})$ з використанням об'ємних покриттів оптоелектронних компонентів вимірювача і $\tau_o(n_{пт}, n_{Л1})$ без покриттів від зміни показника заломлення цього покриття ($n_{ск}$), що наведено на рис. 3.

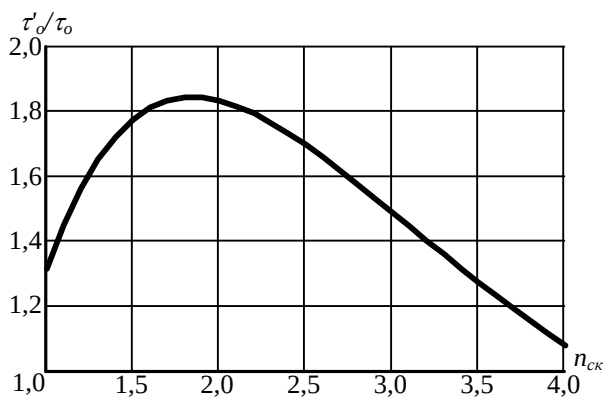


Рис. 3 – Зміна відношення оптичних к.к.д. $\tau'_o(n_{пт}, n_{ск})$ з використанням об'ємних покриттів активних елементів СВД і ФД та $\tau_o(n_{пт}, n_{Л1})$ без покриття від зміни $n_{ск}$

З аналізу залежності (див. рис. 3) можна зробити висновок, що під час використання об'ємних покриттів СВД і ФД, які мають показники заломлення оптичного випромінювання $n_{ск}=1,8$, досягається збільшення оптичного к.к.д. у 1,8 разів порівняно з системою без покриття оптоелектронних компонентів вимірювального каналу концентрації метану. Як ці покриття рекомендується використовувати такі халькогенідні стекла типу від $\text{Ge}_{25}\text{Sb}_{10}\text{S}_{65}$, які мають мінімальний коефіцієнт заломлення оптичного випромінювання 2,25, до $\text{Ge}_{15}\text{Ga}_{10}\text{Te}_{75}$ з максимальним

величина якого є близькою до показника заломлення використаного напівпровідника ($n_{InAs} \approx n_{ск}$). Це значно підвищує коефіцієнт введення та виведення оптичного випромінювання. Перевага такого способу полягає у його простоті й технологічності, а також у можливості одночасного забезпечення захисту активних елементів СВД і ФД від механічних пошкоджень і впливу навколишнього середовища. Під час заповнення просторів між СВД і Л1 (2 на рис. 2) та Л2 і ФД (6 на рис. 2) зникають межі розділів 2–3 і 5–6. При цьому використане покриття оптоелектронних компонентів вимірювача виконує функцію лінз. Отже, коефіцієнт пропускання системи τ'_o , структуру якої наведено на рис. 2, при обліку властивостей використаних покриттів та відсутності меж розділів 2–3 і 5–6 відповідно розраховується за формулою:

– 3,415. Виробником використаних СВД і ФД у вимірювачі, на основі технологічних особливостей його промислових потужностей, запропоновано використовувати халькогенідне скло типу As_2S_3 . Це скло має значення показника заломлення випромінювання 2,42 на довжині хвилі 3 мкм. При цьому оптичний к.к.д. збільшено у 1,7 разів порівняно з системою без покриття оптоелектронних компонентів вимірювального каналу. Зовнішній вигляд СВД типу lms34LED [9] з покриттям на основі халькогенідного скла типу As_2S_3 наведено на рис. 4.

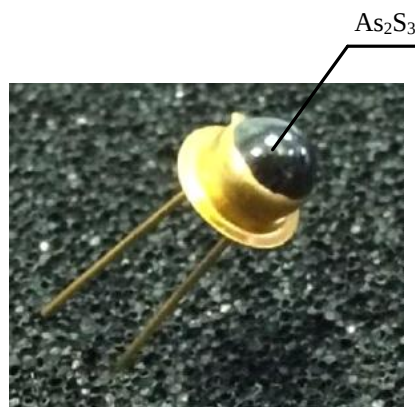


Рис. 4 – Зовнішній вигляд СВД типу lms34LED з покриттям із халькогенідного скла типу As_2S_3

Під час аналізу результатів теоретичних та експериментальних досліджень у роботі [3] визначено, що для отримання необхідного відношення сигнал/шум при мінімальному вимірюваному значенні концентрації метану ($\pm 0,2\%$) [2], необхідно забезпечити довжину траси ОК від 3,2 до 3,6 см. Довжина траси ОК, значення якої рекомендовано у роботі [3], складає 3,4 см, при цьому коефіцієнт вводу випромінювання до оптичної системи складає

$k_{\text{ВВ}} = 0,678$. Відношення сигнал/шум вихідного сигналу вимірювача складає не менше 2,5, що дозволяє проводити вимірювання концентрації метану з величиною абсолютної похибки не більше 0,08^{аб.}% у діапазоні вимірювання від 0 до 4^{аб.}%.

Оптичний к.к.д. вимірювача складає:

$$\eta_O = \tau_O \cdot k_D = 0,647 \cdot 0,678 = 0,44,$$

порівняно з $\eta_O = 0,25$ без заливки СВД халькогенідним склом. На основі проведених теоретичних досліджень, результати яких підтверджено лабораторними випробуваннями, можна зробити висновок, що використання заливки СВД, не менше ніж у 1,7 разів підвищує оптичний к.к.д. вимірювального каналу, тим самим пропорційно підвищуються його показники точності.

Висновки.

1. Розроблено математичну модель формування інформаційних параметрів і дестабілізуючих факторів оптико-абсорбційного вимірювача концентрації метану. В основу розробленої моделі встановлено комплексний показник – оптоелектронний к.к.д.

2. Аналіз результатів моделювання та експериментальних досліджень вимірювального каналу концентрації метану доводить, що використання СВД типу lms34LED і ФД типу lms36PD із спектрально-узгодженими характеристиками та їх заливкою халькогенідним склом типу As₂S₃ підвищує показник оптоелектронного к.к.д. у 1,7 разів.

3. Впровадження запропонованих рекомендацій під час розробки вимірювача зменшило основну похибку вимірювання з $\pm 0,2$ ^{аб.}%, згідно з вимогами ДСТУ [2], до 0,08^{аб.}% у діапазоні вимірювання концентрації метану від 0 до 4^{аб.}%. Отриманий результат істотно перевищує показники точності існуючих вітчизняних і зарубіжних аналогів вимірювачів концентрації метану.

Список літератури

1. Азаров Н. Я. Возможности системы УТАС для диагностики аварийных ситуаций по газовому фактору / Н. Я. Азаров, А. В. Анциферов, М. Г. Тиркель и др. // Наук.пр. УкрНДМІ НАН України. – 2009. – № 5, ч.1 – С. 503 – 512.
2. Приборы шахтные газоаналитические. Общие требования, методы испытания: ДСТУ ГОСТ 24032:2009. – Действ. от 2009-02-01. – К.: Держспоживстандарт, 2009. – 24 с.
3. Вовна О. В. Методи і засоби побудови комп'ютеризованих оптоелектронних вимірювальних систем концентрації метану та пилу в рудничній атмосфері шахт: автореф. дис. на здобуття наук ступеня д-ра техн. наук: спец. 05.13.05 «Комп'ютерні системи та компоненти» / Вовна Олександр Володимирович; Держ. вищ. навч. заклад «Донецький національний технічний університет». – Красноармійськ, 2015. – 40 с.
4. Вовна А. В. Повышение эффективности информационно-измерительных систем научно-исследовательского и промышленного применения / А. В. Вовна, А. А. Зори, В. Д. Корнев и др. // Известия ЮФУ. Технические науки: Тематич. вып. «Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении». – Таганрог, 2011. – № 5 (118). – С. 69 – 74.

5. Вовна А. В. Быстродействующий измеритель концентрации метана в рудничной атмосфере угольных шахт / А. В. Вовна, А. А. Зори // Вісн. Кременчуцьк. нац. ун-ту ім. Михайла Остроградського. – Кременчук, 2013. – Вип. 6 (83). – С. 114 – 119.
6. Hartman H. L. Mine ventilation and air conditioning / H. L. Hartman. – 3-rd ed. – NY.: John Wiley & Sons, 2012. – 752 p.
7. Zuev V. E. Laser beam in the atmosphere / V. E. Zuev. – New York: Plenum Publishing Corporation, 1982. – 503 p.
8. Заказнов Н. П. Прикладная геометрическая оптика / Н. П. Заказнов. – М.: Машиностроение, 1984. – 184 с.
9. БАТ «ЛЕД Микросенсор НТ» [Електронний ресурс]: Специф. СД 2700 – 5000 нм. – Режим доступу: <http://ru.lmsnt.com/download/download-led3>. – Назва з титул. екрану.
10. БАТ «ЛЕД Микросенсор НТ» [Електронний ресурс]: Специф. ФД 3600 нм. – Режим доступу: <http://ru.lmsnt.com/download/photodiodes-3600nm>. – Дата звертання: 20 травня 2016.

References (transliterated)

1. Azarov N. Ja., Anciferov A. V., Tirkel M. G. etc *Vozmozhnosti sistemy UTAS dlya diagnostiki avarijnyh situacij po gazovomu faktoru* [Features UTAS systems for the diagnosis of accidents on the gas factor]. *Nauk.pr. UkrNDMI NAN Ukraini*, 2009, No. 5, issue 1, pp. 503–512.
2. Ukraine Ministry of Coal Industry (2009), 24032:2009. *Pribory shahntnye gazoanaliticheskie. Obshhie trebovaniya, metody ispytaniya* [24032:2009 Mine gas analysis instruments. General requirements, test methods.], Ukraine Ministry of Coal Industry, Kiev, Ukraine.
3. Vovna O. V. *Metodi i zasobi pobudovi komp'yuterizovanih optoelektronnih vimirjuval'nih sistem koncentracii metanu ta pilu v rudnichnij atmosferi shaht* [Methods and means of the creation of computerized optical electronic methane and dust concentration measuring systems for mine atmosphere]. Doctor of Sciences. Thesis, Computer Systems and Components, State Higher Educational Establishment «Donetsk National Technical University», Krasnoarmejsk, Ukraine, 2015, 40 p.
4. Vovna A. V., Zori A. A., Korenev V. D. etc *Povyshenie jeffektivnosti informacionno-izmeritel'nyh sistem nauchno-issledovatel'skogo i promyshlennogo primenenija* [The improvement efficiency of information-measuring systems of scientific research and industrial applications]. *Izvestija JuFU. Tehniceskie nauki: Tematich. vyp. «Komp'yuternye i informacionnye tehnologii v nauke, inzhenerii i upravlenii»*. Taganrog, 2011, No. 5 (118), pp. 69–74.
5. Vovna A. V., Zori A. A. *Bystrodejstvujushij izmeritel' koncentracii metana v rudnichnoj atmosfere ugol'nyh shaht* [The speed methane concentration meter in the atmosphere of coal mines]. *Visnik Kremenchuc'kogo nacional'nogo universitetu im. Mihajla Ostrograd'skogo*. Kremenчук, 2013, No. 6 (83), pp. 114–119.
6. Hartman H. L. Mine ventilation and air conditioning, New York John Wiley & Sons, 2012, 352 p.
7. Zuev V. E. Laser beam in the atmosphere New York, Plenum Publishing Corporation, 1982, 503 p.
8. Zakaznov N. P. *Prikladnaja geometricheskaja optika* [Applied geometric optics], Moscow, Mashinostroenie, 1984, 184 p.
9. LED Microsensor LED 2700 – 5000 nm. Electronic Resources: finding resources by subject [online], Retrieved from: <http://ru.lmsnt.com/download/download-led3> (accessed 20/05/2016).
10. LED Microsensor PD 3600 nm. Electronic Resources: finding resources by subject [online], Retrieved from: <http://ru.lmsnt.com/download/photodiodes-3600nm>. (accessed 20/05/2016).

Надійшла (received) 25.05.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Підвищення точності оптоелектронного вимірювача концентрації газу в рудничній атмосфері шахт / О. В. Вовна, А. А. Зорі, Р. Н. Ахмедов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 4 (1226). – С. 19–24. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-4525.

Повышение точности оптоэлектронного измерителя концентрации газа в рудничной атмосфере шахт / А. В. Вовна, А. А. Зори, Р. Н. Ахмедов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 4 (1226). – С. 19–24. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-4525.

The accuracy improving of the gas concentrations optoelectronic meter for the coal mines atmosphere / O. V. Vovna, A. A. Zori, P. N. Akhmedov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tehnika. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 4 (1226). – P. 19–24. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-4525.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Вовна Олександр Володимирович – доктор технічних наук, доцент, Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», професор кафедри електронної техніки, м. Покровськ (Красноармійськ); тел.: +38(050) 193-35-44; e-mail: Vovna_Alex@ukr.net.

Вовна Александр Владимирович – доктор технических наук, доцент, Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», профессор кафедры электронной техники, г. Покровск (Красноармейск); тел.: +38(050) 193-35-44; e-mail: Vovna_Alex@ukr.net.

Vovna Oleksandr Volodimirovich – Doctor of Technical Sciences, Docent, State Higher Education Establishment «Donetsk National Technical University», Professor at the Department of Electronic Technique, Pokrovsk (Krasnoarmiisk); tel.: +38(050) 193-35-44; e-mail: Vovna_Alex@ukr.net.

Зорі Анатолій Анатолійович – доктор технічних наук, професор, Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», завідувач кафедри електронної техніки, м. Покровськ (Красноармійськ); тел.: +38(050) 174-12-14; e-mail: Zori_AA@mail.ru.

Зори Анатолий Анатольевич – доктор технических наук, профессор, Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», заведующий кафедры электронной техники, г. Покровск (Красноармейск); тел.: +38(050) 174-12-14; e-mail: Zori_AA@mail.ru.

Zori Anatolij Anatolijovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, State Higher Education Establishment «Donetsk National Technical University», Head at the Department of Electronic Technique, Pokrovsk (Krasnoarmiisk); tel.: +38(050) 174-12-14; e-mail: Zori_AA@mail.ru.

Ахмедов Рамін Нізамійович – Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», аспірант кафедри електронної техніки, м. Покровськ (Красноармійськ); тел.: +38(095) 512-67-99; e-mail: Akhmedov_Ramin@ukr.net.

Ахмедов Рамин Низамиевич – Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», аспирант кафедры электронной техники, г. Покровск (Красноармейск); тел.: +38(095) 512-67-99; e-mail: Akhmedov_Ramin@ukr.net.

Ahmedov Ramin Nizamijovich – State Higher Education Establishment «Donetsk National Technical University», Aspirant at the Department of Electronic Technique, Pokrovsk (Krasnoarmiisk); tel.: +38(095) 512-67-99; e-mail: Akhmedov_Ramin@ukr.net.

О. Н. ПЕТРИЩЕВ, Г. М. СУЧКОВ, М. Е. ПОЗНЯКОВА, Н. Н. ЮДАНОВА

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КРУТИЛЬНЫХ ВОЛН В ФЕРРОМАГНИТНЫХ СТЕРЖНЯХ

В роботі побудовано рівняння крутильних коливань, які збуджуються змінним магнітним полем перетворювача електромагнітного типу в пологому ферромагнітному стрижні, який намагнічений постійним магнітним полем в окружному напрямку. Дана кількісна оцінка ефекту збільшення жорсткості намагніченого стрижня. За допомогою інтегрального перетворення Фур'є отримано спільне рішення неоднорідного диференціального рівняння для режиму бегущих крутильних хвиль. Доведено достовірність основного результату рішення - формули для розрахунку амплітудних значень кутів поворотів поперечних перерізів стрижня у фронті крутильної хвилі. На модельному прикладі досліджені і пояснені особливості частотно-залежної зміни рівнів порушуваних крутильних хвиль. Вводиться частотно-залежна функція, яка визначена терміном «хвильова характеристика перетворювача». Вона пов'язує геометричні параметри перетворювача з амплітудою порушуваних крутильних хвиль на заданій частоті.

Ключові слова: недиспергуючі крутильні хвилі, електромагнітний спосіб збудження пружних коливань в ферромагнетиках, феноменологічна теорія магнітострикційних явищ.

В работе построено уравнение крутильных колебаний, которые возбуждаются переменным магнитным полем преобразователя электромагнитного типа в пологом ферромагнитном стержне, который намагничен постоянным магнитным полем в окружном направлении. Дана количественная оценка эффекта увеличения жесткости намагниченного стержня. С помощью интегрального преобразования Фурье получено общее решение неоднородного дифференциального уравнения для режима бегущих крутильных волн. Доказана достоверность основного результата решения – формулы для расчета амплитудных значений углов поворотов поперечных сечений стержня во фронте крутильной волны. На модельном примере исследованы и объяснены особенности частотно-зависимого изменения уровней возбуждаемых крутильных волн. Вводится частотно-зависимая функция, которая определена термином «волновая характеристика преобразователя». Она связывает геометрические параметры преобразователя с амплитудой возбуждаемых крутильных волн на заданной частоте.

Ключевые слова: недиспергирующие крутильные волны, электромагнитный способ возбуждения упругих колебаний в ферромагнетиках, феноменологическая теория магнитоупругих явлений.

In the work equation constructed torsional oscillations, which are excited by an alternating magnetic field of an electromagnetic type transducer in a hollow ferromagnetic core which is magnetized permanent magnetic field in the circumferential direction. A quantitative assessment of the effect of increasing the rigidity of the magnetized rod. With the help of the Fourier integral the general solution of the inhomogeneous differential equation for torsional mode of traveling waves. It proved the accuracy of the main result of the decision - the formulas for calculating the amplitude values of the angles of the cross sections of the rod turns in the front torsional wave. In the model example investigated and explained features of frequency-dependent changes in the levels of the excited torsional waves. We introduce a frequency-dependent function, which is defined by the term "characteristic wave converter." It links the geometric parameters of the converter with the amplitude of the excited torsional waves at a given frequency.

Keywords: nondispersive torsional waves, electromagnetic method of excitation of elastic vibrations in ferromagnetic materials, phenomenological theory of magnetostrictive phenomena.

Введение. Полые ферромагнитные стержни, они же стальные трубки малого наружного диаметра, в некоторых технических устройствах являются достаточно важными элементами, которые должны подвергаться обязательному ультразвуковому неразрушающему контролю [1]. При этом требуется произвести сканирование по всей толщине стенки трубки для того, чтобы достоверно установить отсутствие структурных неоднородностей типа трещин, расслоений, областей с иными физико-механическими характеристиками. Наиболее удобным инструментом для такого сканирования является недиспергирующие крутильные волны [2], которые существуют во всем объеме стенки трубки. Совокупность крутильных волн разной частоты (смены знака напряженно-деформированного состояния) образует волновой пакет (ультразвуковой импульс), который в отсутствие структурных неоднородностей в стенке трубки распространяется на десятки и сотни сантиметров без изменения формы (спектрального состава). В то же время волновой пакет крутильных волн эффективно взаимодействует с достаточно малыми структурными дефектами, что способствует их надежному и достоверному выявлению.

Практическое использование отмеченных выше

позитивных свойств крутильных волн в значительной мере тормозится из-за отсутствия электроакустических преобразователей, которые позволяют эффективно возбуждать и регистрировать крутильные волны в металлах ферромагнитного группы в заданном диапазоне частот. По-видимому, поэтому известно мало теоретических и экспериментальных исследований, нацеленных на создание преобразователей, предназначенных для возбуждения и приема крутильных волн.

Поэтому исследования теоретических основ расчета преобразователей электромагнитного типа в режиме возбуждения недиспергирующих крутильных волн в полых ферромагнитных стержнях являются актуальными.

Исследования и анализ полученных результатов. Крутильные колебания поперечных сечений полого ферромагнитного стержня можно создать с помощью преобразователя, конструкция которого схематически показана на рис. 1. Позицией 1 на рис. 1 обозначен ферромагнитный (магнитоупругий) полый стержень. В полости стержня, соосно с ним, расположен проводник 2, по которому протекает постоянный электрический ток I_0 . Этот проводник 2 является источником

постоянного поля подмагничивания, вектор напряженности которого в цилиндрической системе координат (ρ, ϕ, z) (ось Oz совмещена с осью полого ферромагнитного стержня)

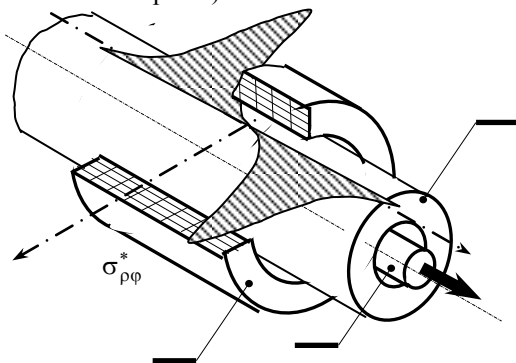


Рис. 1- Упрощенная конструкция электроакустического преобразователя электромагнитного типа для возбуждения крутильных волн в ферромагнитных стержнях

имеет всего лишь один круговой компонент $H_\phi^0 = I_0 / (2\pi\rho)$, где ρ - текущее значение радиальной координаты, причем $\rho \geq R_0$ (R_0 - радиус поперечного сечения проводника с постоянным током). Поле подмагничивания ориентирует домены в объеме ферромагнитного цилиндра таким образом, что переменное магнитное поле катушки 3 вызывает сдвиговые деформации.

Для того чтобы учесть все нюансы напряженно-деформированного состояния намагниченного ферромагнитного цилиндра, рассмотрим его элемент длиной dz (рис. 2 а). В пределах этого элемента выделим двумя плоскостями ϕ и $\phi + d\phi$ сегмент (рис. 2 б). Вектор смещения материальных частиц сегмента в соответствии с гипотезой плоских поперечных сечений имеет всего лишь один круговой компонент $u_\phi = \rho\phi$, где ρ - текущее значение радиальной координаты; ϕ - угол взаимного поворота двух, бесконечно близко расположенных, поперечных сечений полого цилиндра. Полагая, что угол закручивания (угол взаимного поворота) поперечных сечений ϕ зависит от значений координаты z , приходим к выводу, что единственным отличным от нуля компонентом тензора деформации является величина $\varepsilon_{\phi z} = \varepsilon_{z\phi} = (\rho \partial \phi / \partial z) / 2$.

Физическое состояние элемента объема деформируемого, предварительно намагниченного ферромагнетика определяется линеаризованными уравнениями [3], которые следуют из более общих соотношений феноменологической теории магнитострикционных явлений [4]. Если в любой точке деформируемого ферромагнетика выполняется сильное неравенство $|\vec{H}^0(x_k)| \gg |\vec{H}(x_k)|$, где $\vec{H}^0(x_k)$ - вектор напряженности постоянного поля подмагничивания; x_k - координаты точки в декартовой

(физической) системе координат; $\vec{H}(x_k) = \vec{H}^*(x_k) + \vec{h}(x_k)$, где $\vec{H}^*(x_k)$ и $\vec{h}(x_k)$ - амплитудные значения изменяющихся во времени по закону $e^{i\omega t}$ ($i = \sqrt{-1}$; ω - круговая частота смены знака; t - время) векторов напряженности магнитного поля внешнего источника (например, катушки с переменным током) и внутреннего магнитного поля, которое возникает из-за движения магнитных доменов в механически деформируемом ферромагнетике, то из нелинейных соотношений [4] следует линейное приближение, которое записывается в виде

$$\sigma_{mn} = c_{mnk\ell}^H \frac{\partial u_k}{\partial x_\ell} - m_{pkmn} H_p^0 (H_k^* + h_k), \quad (1)$$

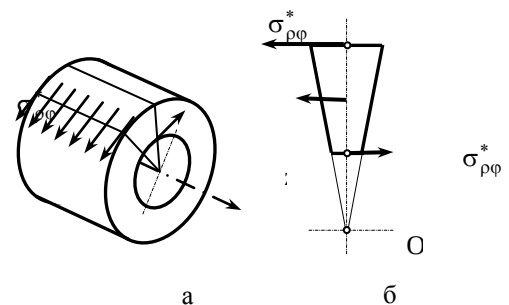


Рис. 2- К выводу уравнений колебаний элемента полого ферромагнитного цилиндра: а - элемент, б - плоскость

$$B_j = m_{pjqs} H_p^0 \frac{\partial u_s}{\partial x_q} + \mu_{jm}^E (H_m^* + h_m), \quad (2)$$

где σ_{mn} - амплитудное значение компонента тензора механических напряжений, который изменяется во времени по закону $e^{i\omega t}$; $c_{mnk\ell}^H$ - модуль упругости ферромагнетика, который экспериментально определяется в режиме постоянства (равенства нулю) магнитного поля (символ H) или, говоря иными словами, модуль упругости размагниченного ферромагнетика; u_k - амплитудное значение k -го компонента изменяющегося во времени по закону $e^{i\omega t}$ вектора смещения материальных частиц деформируемого ферромагнетика. Символом m_{pkmn} обозначена магнитострикционная константа, числовое значение которой, в принципе, зависит от величины и направления постоянного поля подмагничивания. Очевидно, что в случае поликристаллического, не текстурированного металла материальные константы $c_{mnk\ell}^H$ и m_{pkmn} являются компонентами изотропных тензоров четвертого ранга и определяются следующими соотношениями:

$$c_{mnk\ell}^H = \lambda \delta_{mn} \delta_{k\ell} + G (\delta_{mk} \delta_{n\ell} + \delta_{m\ell} \delta_{nk}),$$

$$m_{pkmn} = m_2 \delta_{pk} \delta_{mn} + \frac{m_1 - m_2}{2} (\delta_{pm} \delta_{kn} + \delta_{pn} \delta_{km}),$$

где λ и G - константы Ламе (модули упругости); $\delta_{mn}, \dots, \delta_{km}$ - символы Кронекера; m_1 и m_2 - линейно

не зависящие, экспериментально определяемые константы. Способ экспериментального определения констант m_1 и m_2 для магнитострикционных ферритов изложен в работе [5]. Из приведенного выше определения магнитострикционных констант следует, что матрица тензора $m_{\beta\gamma}$ (β и γ - индексы Фойгта) имеет вид

$$\|m_{\beta\gamma}\| = \begin{vmatrix} m_1 & m_2 & m_2 & 0 & 0 & 0 \\ m_2 & m_1 & m_2 & 0 & 0 & 0 \\ m_2 & m_2 & m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (m_1 - m_2)/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (m_1 - m_2)/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (m_1 - m_2)/2 \end{vmatrix}$$

Символом B_j в соотношении (2) обозначено амплитудное значение j -го компонента вектора магнитной индукции, изменяющегося во времени по закону $e^{i\omega t}$; μ_{jm}^e - компонент тензора магнитной проницаемости намагниченного ферромагнетика, который экспериментально определяется в режиме постоянства (равенства нулю) механической деформации (символ ε). При записи соотношений (1) и (2) было учтено (по умолчанию), что выполняется соглашение о суммировании по дважды повторяющимся индексам.

Изменение напряженно-деформированного состояния в направлении оси z ферромагнетика, намагниченного в окружном направлении, сопровождается появлением внутреннего магнитного поля, вектор напряженности которого практически полностью определяется аксиальным компонентом h_z .

Дополним классическую формулировку гипотезы плоских поперечных сечений [6] предположением о том, что магнитная индукция ферромагнитного стержня не изменяется в пределах поперечного сечения.

Принимая во внимание эти рассуждения и конструкцию соотношения (1), запишем выражение для расчета амплитудных значений напряжений, действующих в пределах выделенного сегмента

$$\begin{aligned} \sigma_{\rho\phi} &= \sigma_{\rho\phi}^* = -m_{2112} H_\phi^0 H_\rho^* = -\frac{m_1 - m_2}{4\pi\rho} I_0 H_\rho^*, \\ \sigma_{\phi z} &= 2G\varepsilon_{\phi z} - m_{2313} H_\phi^0 (H_z^* + h_z) = \\ &= G\rho \frac{\partial \phi}{\partial z} - \frac{m_1 - m_2}{4\pi\rho} I_0 (H_z^* + h_z), \end{aligned} \quad (3)$$

где символами H_ρ^* и H_z^* обозначены компоненты вектора напряженности переменного магнитного поля катушки. При этом вектор $\vec{H}^*(\rho, z)$ удовлетворяет уравнениям Максвелла по определению.

Указанная система напряжений формирует в каждой точке внутри объема выделенного сегмента магнитострикционные силы (силы Джоуля), вектор объемной плотности которых имеет всего лишь один

отличный от нуля компонент f_ϕ . причем

$$\begin{aligned} f_\phi &= \frac{\partial \sigma_{\rho\phi}^*}{\partial \rho} + \frac{\partial \sigma_{\phi z}^*}{\partial z} + 2 \frac{\sigma_{\rho\phi}^*}{\rho} = G\rho \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} - \frac{m_1 - m_2}{4\pi\rho} I_0 \frac{\partial h_z}{\partial z} - \\ &- \frac{m_1 - m_2}{4\pi\rho} I_0 \left(\frac{1}{\rho} H_\rho^* + \frac{\partial H_\rho^*}{\partial \rho} + \frac{\partial H_z^*}{\partial z} \right) \end{aligned}$$

В соответствии с принципом Даламбера алгебраическая сумма моментов внутренних и внешних сил в любой момент времени уравнивается моментом сил инерции материальных частиц движущегося тела. Определим эти моменты относительно оси Oz .

На поверхностях $\rho = R$ и $\rho = r_1$, (навнешней и внутренней боковых поверхностях полого стержня) выделенного сегмента действуют напряжения $\sigma_{\rho\phi}^*$ (рис. 2б), которые создают момент сил

$$M_\sigma = 2\pi \left[R^2 \sigma_{\rho\phi}^*(R, z) - r_1^2 \sigma_{\rho\phi}^*(r_1, z) \right] dz. \quad (4)$$

Распределенная по объему сегмента с плотностью f_ϕ сила Джоуля создает момент

$$\begin{aligned} M_f &= dz \int_0^{2\pi} \int_{r_1}^R \rho \left(\rho f_\phi(\rho, \phi, z) \right) d\rho d\phi = dz \left[\frac{\pi}{2} (R^4 - r_1^4) G \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} - \right. \\ &- \left. \frac{m_1 - m_2}{4} I_0 (R^4 - r_1^4) \frac{\partial h_z}{\partial z} - M_f^* \right], \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{где } M_f^* = \frac{m_1 - m_2}{2} I_0 \int_{r_1}^R \rho \left(\frac{1}{\rho} H_\rho^* + \frac{\partial H_\rho^*}{\partial \rho} + \frac{\partial H_z^*}{\partial z} \right) d\rho -$$

момент сил Джоуля магнитного поля внешнего источника (катушки).

Момент инерции материальных частиц выделенного сегмента определяется следующим образом

$$\begin{aligned} M_m &= dz \int_0^{2\pi} \int_{r_1}^R \rho \left(\rho_0 \rho d\rho d\phi \frac{\partial^2 u_\phi}{\partial t^2} \right) = \\ &= dz \left[\frac{\pi}{2} (R^4 - r_1^4) \rho_0 \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Так как в любой момент времени должно выполняться равенство $M_\sigma + M_f = M_m$, то подстановка в это равенство соотношений (4), (5) и (6) приводит к следующему результату

$$\begin{aligned} GJ_\rho \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} - J_\rho \rho_0 \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} - \frac{m_1 - m_2}{4} * \\ * I_0 (R^4 - r_1^4) \frac{\partial h_z}{\partial z} = \mu^*(z) \end{aligned} \quad (7)$$

где $J_\rho = \pi(R^4 - r_1^4)/2$ - полярный момент инерции поперечного сечения полого стержня; ρ_0 - плотность;

$\mu^*(z) = \frac{m_1 - m_2}{2} I_0 \left[RH_\rho^*(R, z) - r_1 H_\rho^*(r_1, z) + \int_{r_1}^R \left(\frac{1}{\rho} H_\rho^* + \frac{\partial H_\rho^*}{\partial \rho} + \frac{\partial H_z^*}{\partial z} \right) d\rho \right]$ - линейная плотность внешних крутящих моментов. В круглых скобках подынтегрального выражения в

формуле для расчета $\mu^*(z)$ записано развернутое выражение для дивергенции вектора напряженности переменного магнитного поля катушки $\vec{H}^*(\rho, z)$. В случае изотропной по магнитным свойствам среды из уравнения Максвелла $\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}^*}{\partial t} = -\mu \frac{\partial \vec{H}^*}{\partial t}$

следует, что $\text{div} \vec{H}^* = 0$. Так как оснований для предположения о магнитной изотропии намагниченного ферромагнетика нет, то выражение для расчета $\mu^*(z)$ оставим без изменений.

Исключим из уравнения движения элемента стержня (7) неизвестную производную $\partial h_z / \partial z$. Из уравнения Максвелла $\text{rot} \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t$ следует условие $\text{div} \vec{B} = \text{div}(\vec{B}_v + \vec{B}_m + \vec{B}_h) = 0$, где $\vec{B}_m = \vec{e}_k \mu_k^e h_m$ ($\vec{e}_k$ - единичный орт координатной линии системы координат), так как $\text{div} \vec{B}^* = 0$ по определению, то из условия $\text{div} \vec{B} = 0$ следует

$$\frac{\partial}{\partial z}(\vec{B}_v + \mu_3^e h_z) = 0. \quad (8)$$

Так как $\vec{B}_v = m_{2323} H_\phi^0 \vec{e}_\phi = \frac{m_1 - m_2}{8\pi} I_0 \frac{\partial \phi}{\partial z}$, то из условия (1.8) следует, что

$$\frac{\partial h_z}{\partial z} = -\frac{m_1 - m_2}{8\pi \mu_3^e} I_0 \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2}.$$

Подставляя найденную величину $\partial h_z / \partial z$ в уравнение движения (7), получаем

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} - \frac{J_p \rho_0}{[GJ_p]^B} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = \frac{\mu^*(z)}{[GJ_p]^B}, \quad (9)$$

где $[GJ_p]^B$ - жесткость на скручивание намагниченного ферромагнитного стержня, причем $[GJ_p]^B = GJ_p [1 + \Delta(GJ_p)]$, где

$$\Delta(GJ_p) = \frac{[(m_1 - m_2) I_0]^2 (R^2 - r_1^2)}{32\pi \mu_3^e GJ_p} - \text{увеличение}$$

крутильной жесткости при намагничивании или ΔE - эффект в режиме кручения полых цилиндров поляризованных окружным магнитным полем. Для никеля ($G = 66 \text{ ГПа}$; $\mu_3^e = 30\mu_0 = 3,77 \cdot 10^{-5} \text{ Гн/м}$; $m_1 = 1 \text{ Гн/м}$; $m_2 \cong -m_1/2$), при токе $I_0 = 6 \text{ А}$ и размерах $R = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ и $r_1 = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ получаем $\Delta(GJ_p) = 3,3 \cdot 10^{-2}$. Т.е. жесткость стержня на скручивание увеличивается всего лишь на 3,3%, что, соответственно, вызовет увеличение скорости распространения недиспергирующих крутильных волн не более чем на 1,7%.

Таким образом, можно констатировать, что учет связности упругих и магнитных полей приводит к поправкам, которые в большинстве случаев не

оказывают существенного влияния на количественные и на качественные характеристики получаемых результатов.

Полагая, что все процессы в деформируемом стержне изменяются во времени по гармоническому закону $e^{i\omega t}$, перепишем уравнение (9) в следующем виде

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + k_s^2 \phi = \frac{\mu^*(z)}{[GJ_p]^B}, \quad (10)$$

где $k_s = \omega / v_s^B$ - волновое число, а $v_s^B = \sqrt{[GJ_p]^B / (\rho_0 J_p)}$ - скорость волн чистого сдвига или крутильных волн в намагниченном ферромагнитном стержне.

Рассмотрим решение уравнения (10) для распространяющейся гармонической крутильной волны.

Решение уравнения (10) для ограниченных стержней отыскивается в форме разложения в ряды по тригонометрическим функциям и является общеизвестным.

Рассмотрим более интересный (с позиций практического применения) случай, когда стержень является бесконечно длинным, т.е. в нем отсутствуют отражения от торцов и в чистом виде реализуется режим бегущих волн. Сам факт существования бегущих волн косвенно указывает на то, что внешние нагрузки, заданные линейной плотностью внешних крутящих моментов, локализованы в ограниченной по длине области стержня. В противном случае имел бы место режим стоячих волн. Будем полагать, что внешние крутящие моменты сосредоточены в некотором объеме стержня в окрестности начала координат, ограниченном слева и справа сечениями $z = \pm A$. Помимо этого потребуем, чтобы внешние нагрузки, а точнее, источник, их порождающий, удовлетворял условию физической реализуемости, что с формальной точки зрения эквивалентно существованию несобственного интеграла по переменной z от линейной плотности сил $\mu^*(z)$.

Поскольку при $|z| \rightarrow \infty$ источники возмущений отсутствуют, постольку искомое решение уравнения (10) должно удовлетворять условиям физической реализуемости напряженно деформируемого состояния, т.е.

$$\lim_{|z| \rightarrow \infty} \left\{ \phi; \frac{\partial \phi}{\partial z} \right\} = 0. \quad (11)$$

Условия (11) имеют очевидный физический смысл: при бесконечном удалении от источника механических возмущений смещения материальных частиц и деформации в стержне отсутствуют.

Для того, чтобы обеспечить выполнение условий (11) необходимо и достаточно положить, что волновое число k_s является комплексной величиной, т.е. $k_s = k_s^0 (1 - i\alpha)$, где $k_s^0 = \omega / v_s^0$ - волновое число, определенное без учета частотно зависимо

поглощения энергии ультразвуковых волн; v_s^0 – скорость волн сдвига, измеренная в области очень низких частот, в которой поглощение энергии упругих колебаний можно не принимать во внимание; α – сколь угодно малая безразмерная величина – коэффициент затухания. В этом случае выражения для расчета углов поворотов поперечных сечений стержня в гармонических волнах, уходящих влево и вправо от источника, $\phi^{(\pm)}(z, t) = \Phi^{(\pm)} e^{\pm i k_s z} e^{i \alpha t}$ ($\Phi^{(\pm)}$ – угол поворота поперечного сечения стержня во фронте крутильной волны) принимает следующий вид: $\phi^{(\pm)}(z, t) = \Phi^{(\pm)} e^{\pm k_s^0 \alpha z} e^{i(\alpha t \pm k_s^0 z)}$. Для волны уходящей влево от источника сомножитель $e^{k_s^0 \alpha z}$ при $z \rightarrow -\infty$ обращается в нуль. Для уходящей вправо волны сомножитель $e^{-k_s^0 \alpha z}$ также обращается в нуль при $z \rightarrow \infty$.

Выполнение условий физической реализуемости (11) позволяют применить для решения уравнения метод интегральных преобразований [7]. Сущность метода интегральных преобразований заключается в том, что вместо искоемых функций (решений дифференциального уравнения) рассматриваются их интегральные образы. Введение интегральных образов понижает порядок решаемого дифференциального уравнения, а в ряде случаев позволяет привести его к алгебраическому уравнению. Очевидно, что введение интегральных образов преследует цель упрощения самой процедуры решения дифференциального уравнения. После того, как найдены аналитические выражения для интегральных образов, выполняется обратное интегральное преобразование, т. е. осуществляется переход от интегральных образов к оригиналам искоемых функций.

При решении уравнения (10) введем интегральные образы функций $\phi(z)$ и $\mu^*(z)$ как прямое преобразование Фурье, заданное следующими выражениями

$$\phi(\lambda) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \phi(z) e^{-i\lambda z} dz, \quad \mu^*(\lambda) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \mu^*(z) e^{-i\lambda z} dz, \quad (12)$$

где λ – неизвестный пока и подлежащий определению в ходе решения задачи параметр интегрального преобразования.

Переход к оригиналам функций, т. е. к величинам $\phi(z)$ и $\mu^*(z)$ осуществляется путем вычисления следующих интегралов

$$\phi(z) = \int_{-\infty}^{\infty} \phi(\lambda) e^{i\lambda z} d\lambda, \quad \mu^*(z) = \int_{-\infty}^{\infty} \mu^*(\lambda) e^{i\lambda z} d\lambda. \quad (13)$$

Не лишним будет еще раз подчеркнуть, что существование интегралов (12) и (13) обеспечивается условиями физической реализуемости источника внешних сил (это источник конечной мощности) и предельными условиями (11) для динамического напряженно-деформированного состояния стержня.

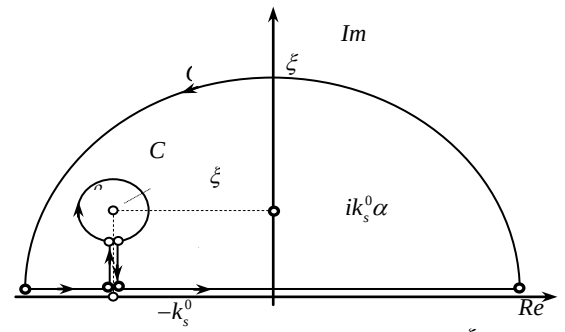


Рис. 3 – Контур интегрирования при определении угла поворота $\phi(z)$

Подвергая прямому интегральному преобразованию Фурье левую и правую части уравнения (10), после двукратного интегрирования по частям в первом слагаемом левой части получаем следующий результат

$$\phi(\lambda) (k_s^2 - \lambda^2) = \frac{\mu^*(\lambda)}{[GJ_p]^B},$$

откуда следует решение в терминах интегральных образов

$$\phi(\lambda) = \frac{\mu^*(\lambda)}{[GJ_p]^B (k_s^2 - \lambda^2)}$$

и формальное решение уравнения (10):

$$\phi(z) = \frac{1}{[GJ_p]^B} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\mu^*(\lambda) e^{i\lambda z}}{(k_s^2 - \lambda^2)} d\lambda. \quad (14)$$

При вычислении интеграла (14) необходимо принимать во внимание, что волновое число k_s является комплексным со сколь угодно малой мнимой частью $k_s^0 \alpha$. Сообразно этому, можно предположить, что и параметр интегрального преобразования также является комплексным числом с вещественной частью λ . Т. е. в качестве параметра интегрального преобразования при вычислении интеграла (14) необходимо рассматривать комплексную величину $\xi = \lambda + i\zeta$. При таком подходе Фурье – образы $\mu^*(\xi)$ и $\mu^*(\lambda)$ совпадают при $\zeta = 0$, т. е. на вещественной оси комплексной плоскости $\xi = \lambda + i\zeta$. Поскольку линейная плотность внешних крутящих моментов соответствует физически реализуемому источнику, постольку функции $\mu^*(\xi)$ и $\mu^*(\lambda)$ являются аналитическими. Из теоремы единственности для аналитических функций [8] следует, что любую функцию, определенную для действительных значений переменной, можно продолжить до аналитической функции комплексной переменной не более чем одним способом. Говоря иными словами, если $\mu^*(\xi)$ и $\mu^*(\lambda)$ совпадают хотя бы в одной точке комплексной плоскости, то они суть одна и та же функция.

Принимая во внимание эти обстоятельства, мы вправе утверждать, что интеграл 14) является частью интеграла по комплексной плоскости ξ . Поскольку речь идет об интегрировании аналитических функций, интегрирование по плоскости сводится к интегрированию по контуру. Причем контур интегрирования выбирается таким образом, чтобы на нем выполнялись условия (11).

Рассмотрим волну, уходящую вправо от источника внешних сил, т.е. будем считать, что $z > 0$. В этом случае контур интегрирования (рис. 3) должен целиком находиться в верхней полуплоскости комплексной плоскости ξ . При этом $e^{i(\lambda+i\zeta)z} = e^{i\lambda z} e^{-\zeta z}$, что при положительных ζ и z обеспечивает обращение в нуль подынтегрального выражения в формуле (14) при неограниченном росте значений z . Внутри находящегося в верхней полуплоскости $\zeta > 0$ контура интегрирования (рис. 3) знаменатель подынтегрального выражения $k_s^2 - \xi^2$ обращается в нуль в точке $\xi_1 = -k_s^0 + ik_s^0 \alpha$. В этой точке подынтегральная функция теряет аналитичность, и поэтому контур интегрирования необходимо деформировать так, чтобы точка ξ_1 оказалась вне его. Окружив точку ξ_1 малой окружностью C_ρ с радиусом $\rho \rightarrow 0$, мы исключим тем самым точку ξ_1 из верхней полуплоскости. При этом контур интегрирования выглядит так, как это показано на рис. 3. После этой операции можно утверждать, что подынтегральное выражение (14) является аналитической функцией во всех точках области, которая окружена деформированным контуром. В этом случае интеграл по замкнутому контуру равен нулю. Отчетливо видно, что контур интегрирования, в пределах которого подынтегральная функция в интеграле (14) уже ни в одной точке плоскости не теряет аналитических свойств, состоит из дуги бесконечного радиуса C_∞ , интеграл вдоль которой в соответствии с леммой Жордана [8] равен нулю; отрезка AB , интеграл вдоль которого как раз и является искомым интегралом (14) и малой окружности C_ρ , интеграл по которой предстоит вычислить. Интегралы по отрезкам CD и C_1D_1 взаимно уничтожаются, так как это по сути один и тот же отрезок, который проходится в двух противоположных направлениях. Следуя основной для теории функций комплексного переменного теореме Коши [8], мы должны записать, что интеграл по изображенному на рис. 3 контуру равен нулю. Из этого факта следует, что

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\mu^*(\lambda) e^{i\lambda z}}{(k_s^2 - \lambda^2)} d\lambda = - \oint_{C_\rho} \frac{\mu^*(\xi) e^{i\xi z}}{(k_s^2 - \xi^2)} d\xi. \quad (15)$$

При вычислении интеграла по окружности C_ρ , радиус которой стремится к нулю, можно

воспользоваться теоремой о среднем и представить числитель в виде $\mu^*(\xi_1) e^{i\xi_1 z}$. Что касается знаменателя, то $k_s^2 - \xi^2 = (k_s - \xi)(k_s + \xi)$. При $\xi \rightarrow \xi_1$

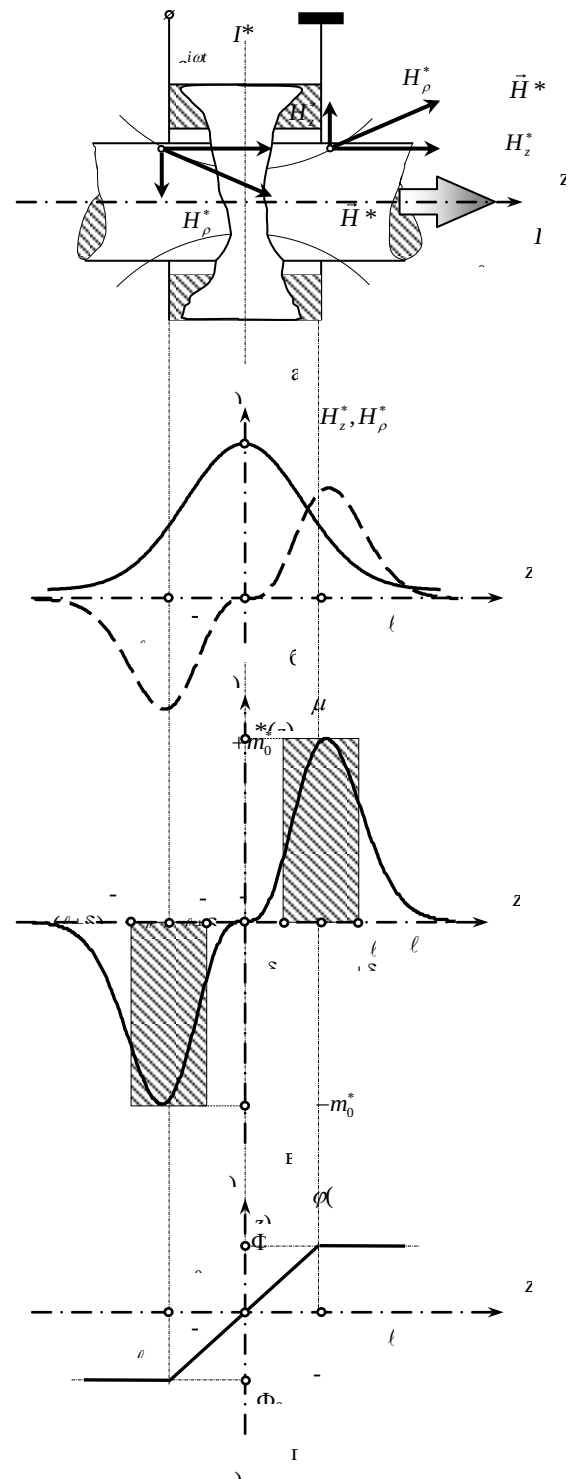


Рис. 4- Качественное моделирование ультразвукового преобразователя электромагнитного типа в режиме возбуждения крутильных волн

сомножитель $k_s - \xi = 2k_s^0 - ik_s^0 \alpha$. Второй сомножитель в разложении знаменателя $k_s + \xi = \rho e^{i\varphi}$, где

ρ - фиксированное сколь угодно малое число, а ψ - полярный угол, изменяющийся в пределах от 0 до 2π . Так как $k_s + \xi = \rho e^{i\psi}$, то $d\xi = i\rho e^{i\psi} d\psi$, и правую часть выражения (15) можно записать в следующем виде

$$\oint_{C_\rho} \frac{\mu^*(\xi) e^{i\xi z}}{(k_s^2 - \xi^2)} d\xi = \frac{i\mu^*(\xi_1) e^{i\xi_1 z}}{2k_s^0 - ik_s^0 \alpha} \int_0^{2\pi} \frac{\rho e^{i\psi} d\psi}{\rho e^{i\psi}} = \frac{2i\pi}{2k_s^0 - ik_s^0 \alpha} \mu^*(\xi_1) e^{i\xi_1 z}. \quad (16)$$

Так как в исходной математической постановке задачи не было заложено поглощение энергии упругих колебаний, то, выполняя в полученном результате предельный переход при $\alpha \rightarrow 0$ (эта процедура в аналитической теории волноводов называется методом предельного поглощения [9]), получаем

$$\phi(z) = -\frac{i\pi}{[GJ_p]^B k_s} e^{-ik_s z} \mu^*(-k_s). \quad (17)$$

В формуле (17) $k_s = k_s^0$ - индекс нуль просто опущен, так как нет нужды особо обозначать действительную часть волнового числа. Фурье-образ $\mu^*(-k_s)$ в формуле (17) вычисляется в соответствии с определением (12) при $\lambda = -k_s$. Подставляя развернутое выражение для величины $\mu^*(-k_s)$ в формулу (7), получаем конечный вид решения уравнения (10) для волны, уходящей вправо от источника внешних сил

$$\phi(z) = -\frac{i}{2[GJ_p]^B k_s} e^{-ik_s z} \int_{-\infty}^{\infty} \mu^*(z) e^{ik_s z} dz. \quad (18)$$

Следует подчеркнуть, что выражение (18) определяет пространственно-развитую амплитуду гармонически изменяющихся во времени углов поворотов поперечных сечений полого ферромагнитного стержня.

Рассуждая аналогичным образом, можно получить решение для пространственно-развитой амплитуды крутильной волны, которая уходит влево от источника возмущений

$$\phi(z) = -\frac{i}{2[GJ_p]^B k_s} e^{-ik_s z} \int_{-\infty}^{\infty} \mu^*(z) e^{-ik_s z} dz. \quad (19)$$

Представленные формулами (18) и (19) результаты можно записать в следующем виде

$$\phi(z) = \begin{cases} \Phi^{(-)} e^{-ik_s z}, & z > A, \\ \Phi^{(+)} e^{ik_s z}, & z < -A, \end{cases} \quad (20)$$

где $\Phi^{(\pm)}$ - смещения материальных частиц стержня во фронте волны; $\pm A$ - границы области существования переменного магнитного поля или физическая бесконечность для источника переменного магнитного поля причем

$$\Phi^{(\pm)} = -\frac{i}{2[GJ_p]^B k_s} \int_{-\infty}^{\infty} \mu^*(z) e^{\mp ik_s z} dz. \quad (21)$$

Поскольку характер распределения внешних

нагрузок полностью определяется конструкцией их источника, постольку можно утверждать, что величины $\Phi^{(\pm)}$ содержат в своем аналитическом определении информацию о конструкции и основных параметрах источника механических возмущений.

Предваряя детальный расчет показанной на рис. 3 конструкции, рассмотрим модельный пример.

На рис. 4 а изображена силовая линия магнитного поля катушки в некоторый фиксированный момент времени t_0 . Так как вектор

напряженности магнитного поля $\vec{H}^*(\rho, z)$ является касательным вектором в каждой точке силовой линии, то это позволяет качественно оценить характер изменения амплитудных значений компонентов вектора $\vec{H}^*(\rho, z)$ при изменении координаты z так, как это показано на рис. 4б. Штриховой кривой на этом рисунке показано пространственное изменение радиального компонента вектора напряженности переменного магнитного поля катушки.

В присутствии кругового поляризующего магнитного поля $H_\phi^0(\rho)$ на поверхности ферромагнитного стержня формируются касательные напряжения Джоуля $\sigma_{\rho\phi}^* = (m_1 - m_2) H_\phi^0 H_\rho^* / 2$. Эти напряжения создают крутящие моменты с плотностью $\mu^*(z) = 2\pi R^2 \sigma_{\rho\phi}^*(R, z) = \pi R^2 (m_1 - m_2) H_\phi^0(R) H_\rho^*(R, z)$, характер изменения которых по длине стержня показан на рис. 4 в. При качественной оценке результатов вычисления интеграла (21), можно воспользоваться аппроксимацией функции $\mu^*(z)$, которая показана на рис. 4 в заштрихованными прямоугольниками. Полагая, что

$\mu^*(z) = m_0^*$ при $\ell - \delta \leq z \leq \ell + \delta$ и $\mu^*(z) = -m_0^*$ при $-\ell - \delta \leq z \leq -\ell + \delta$, получаем после элементарных вычислений следующий результат

$$\Phi^{(\pm)} = \mp \frac{2m_0^* \ell \delta}{GJ_p} W(k_s),$$

где символом $W(k_s)$ обозначена зависящая от частоты (волнового числа k_s) функция, числовые значения которой определяются по формуле

$$W(k_s) = \frac{\sin k_s \ell}{k_s \ell} \frac{\sin k_s \delta}{k_s \delta}.$$

При $k_s \rightarrow 0$ функция $W(k_s) = 1$ и $\Phi^{(\pm)} = \mp 2m_0^* \ell \delta / [GJ_p]^B = \mp M^* \ell / [GJ_p]^B$, где $M^* = 2\delta m_0^*$ - внешний крутящий момент. Последний результат означает, что сечения $z = \ell + \delta$ и $z = -\ell - \delta$ поворачиваются на угол $\pm \Phi_0$, величина которого определяется по формуле $\Phi_0 = M^* \ell / [GJ_p]^B$, т. е. в полном соответствии с элементарными представлениями о статическом скручивании стержня кругового поперечного сечения [8]. Участки стержня слева и справа от сечений

$z = -\ell - \delta$ и $z = \ell + \delta$ поворачиваются при этом как единое жесткое целое. Ориентировочный график изменения углов поворотов поперечных сечений $\Phi^{(\pm)}$ при $k_s \rightarrow 0$ показан на рис. 4 з.

Отмеченное соответствие результатов решения уравнения (10) с результатами известной теории [10] кручения стержней кругового поперечного сечения свидетельствует в пользу достоверности выражения (21) для расчета амплитуды углов поворотов поперечных сечений стержня во фронте крутильной волны.

Теперь рассмотрим, как изменяются повороты поперечных сечений стержня по мере возрастания частоты смены знака магнитного поля катушки.

На рис. 5 показан график изменения модуля функции $W(k_s)$, расчет числовых значений которой произведен в предположении, что $\delta = \ell / 2$. Отчетливо видно, что с ростом значений безразмерного волнового числа $k_s \ell$ или, что то же самое, безразмерной частоты $\omega \tau_0$ ($\tau_0 = \ell / v_s$ - масштабирующий временной интервал), резко уменьшаются значения функции $W(k_s)$, периодически достигая на частотах, которым соответствуют значения $k_s \ell = m\pi$ ($m = 1, 2, 3, \dots$), нулевых отметок. Сообразно значениям функции $W(k_s)$ меняется величина углов поворотов поперечных сечений полого стержня во фронте крутильной волны. Причиной отмеченных особенностей поведения функции $W(k_s)$ и, как следствие, изменения уровней углов поворотов, следует считать явление интерференции упругих волн.

Рассмотрим малый участок стержня, ограниченный поперечными сечениями $z' \pm \Delta z$, находящийся в поле действия внешних крутящих моментов в области $(\ell - \delta < z' < \ell + \delta)$. Материальные частицы этого участка стержня движутся под действием внешних сил и обмениваются импульсом с соседними частицами, т. е. выделенный участок стержня можно рассматривать как некоторый элементарный (в смысле мощности) излучатель, который генерирует стационарное поле углов поворотов поперечных сечений, которое характеризуется стационарным распределением фаз по длине стержня. Другой малый участок, ограниченный сечениями $-z' \pm \Delta z$ ($-\ell - \delta < -z' < -\ell + \delta$), можно интерпретировать как другой элементарный излучатель, который генерирует свое стационарное поле углов поворотов, которое на данной частоте имеет ту же длину волны, что и поле, излучаемое первым, симметрично расположенным, малым участком, и характеризуется так же стационарным распределением фаз по длине стержня. Между этими двумя распределениями фаз существует постоянный фазовый сдвиг, который пропорционален $2k_s z'$ и в зависимости от частоты колебаний и расстояния

между излучающими участками может приобретать значения в интервале от 0 до 2π . В зависимости от значения этого фазового сдвига может наблюдаться либо взаимное подавление излучения двух, симметрично расположенных относительно плоскости $z = 0$, участков стержня, либо такое сложение этих полей, которое максимально усиливает результирующее значение углов поворотов поперечных сечений стержня. При некоторых значениях частоты (безразмерного волнового числа) разность фаз между стационарными полями, излучаемыми различными элементарными участками стержня, расположенными симметрично относительно плоскости $z = 0$, достигает такой величины, что наступает полная взаимная компенсация углов

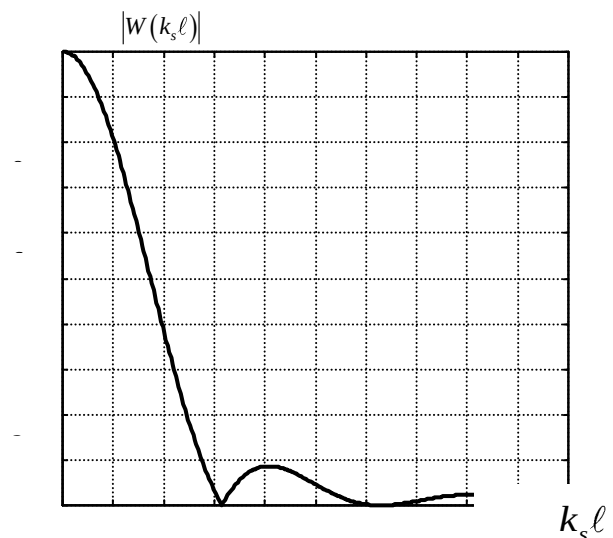


Рис. 5- Зависимость модуля функции $W(k_s \ell)$ от изменения безразмерного волнового числа

поворотов поперечных сечений, которые расположены вне области нагружения стержня внешними крутящими моментами. Такая ситуация соответствует нулевым амплитудам углов поворотов и периодически повторяется с ростом частоты.

Функция $W(k_s)$, частотно-зависимое изменение которой обсуждалось выше, является, по существу, частотной характеристикой рассматриваемого ультразвукового преобразователя и её можно, в принципе, так и называть. Однако это определение не является исчерпывающе полным. Действительно, при одних и тех же значениях частоты и геометрических параметров конструкции значения амплитуд углов поворотов для стержней из различных материалов. Это в достаточной мере очевидно, так как значения функции $W(k_s)$ целиком определяются значениями волнового числа $k_s = \omega / v_s$. С учетом этого обстоятельства представляется целесообразным называть функцию $W(k_s)$ не частотной, а волновой характеристикой ультразвукового преобразователя.

Предлагаемый термин наиболее полно отражает внутреннее содержание аналитического описания процесса возбуждения упругих волн внешними силами, распределенными в объеме деформируемого твердого тела.

Волновая характеристика ультразвукового преобразователя, являющаяся по своей сути математической моделью устройства, имеет не только теоретическое, но и вполне четко определенное практическое значение. Действительно, имея в своем распоряжении достаточно полную (в смысле перечня учитываемых физических и геометрических параметров объекта) математическую модель устройства, можно выполнить необходимые расчеты, имеющие характер оптимизирующих процедур, и, не прибегая к длительному и дорогостоящему натурному моделированию, сформулировать рекомендации по выбору вариантов конструктивного исполнения устройства, обладающего наперед заданными параметрами и характеристиками.

Выводы. 1. На основании гипотезы плоских поперечных сечений построено дифференциальное уравнение вынужденных крутильных колебаний в предварительно намагниченном в окружном направлении полем ферромагнитного стержня.

2. Дана количественная оценка эффекту увеличения жесткости стержня на скручивание (ΔE -эффект при кручении), который обусловлен согласным (связным) действием сил упругости и сил магнитного взаимодействия между магнитными доменами.

Показано, что при умеренных значениях (менее 10 кА/м) напряженности кругового магнитного поля эффекты связности упругих и магнитных полей можно не учитывать.

3. Выполнено общее решение уравнения вынужденных крутильных колебаний для бесконечного стержня, т. е. для режима бегущих крутильных волн. На модельном примере доказана достоверность полученного результата, т. е. формулы для расчета амплитудного значения угла поворота поперечного сечения во фронте бегущей крутильной волны.

4. Рассмотрены особенности частотно-зависимого изменения уровней возбуждаемых крутильных волн и введено понятие «волновая характеристика преобразователя».

Список литературы

1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под ред. В.В. Клюева. Т.3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. – Москва : Машиностроение, 2004. – 864 с.
2. Ермолов И.Н. Неразрушающий контроль: практ. пособие: в 5 кн., кн. 2. Акустические методы контроля / И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.И. Потапов; под ред. В.В. Сухорукова. – Москва : Высшая школа, 1991. – 283 с.

3. Петрищев О.Н. Гармонические колебания пьезокерамических элементов. Часть 1. Гармонические колебания пьезокерамических элементов в вакууме и метод резонанса – антирезонанса. Киев: Аверс, 2012. – 300 с.
4. Власов К. Б. Некоторые вопросы теории упругих ферромагнитных (магнитоэластических) сред // Изв. АН СССР. Сер. физическая. – 1957. – Т. 21. – № 8. – С. 1140–1148.
5. Патент України №18475. G01R 33/18. Спосіб визначення фізико-механічних констант полікристалічних магнітострікційних (ферромагнітних) матеріалів // Петрищев О. М., Трохимець А. П., Трохимець В. А. Опубл. 15. 11. 2006. Бюл. №11.
6. Доннел Л.Г. Балки, пластины и оболочки. – М.: Наука, 1982. – 317 с.
7. Кошляков Н. С., Глинер Э. Б., Смирнов М. М. Уравнения в частных производных математической физики. – М.: Высшая школа, 1970. – 710 с.
8. Смирнов В. И. Курс высшей математики. Том III. Часть 2. – М.: Наука, 1974. – 672 с.
9. Миттра Р., Ли С. Аналитические методы теории волноводов. – М.: Мир, 1974. – 327 с.
10. Феодосьев В.И. Сопrotivление материалов. – М.: Наука, 1986. – 512 с.

References (transliterated)

1. I.N. Ermolov, Ju.V. Lange. Nerazrushajushhij kontrol': Spravochnik: Vol. 7. Podred. V.V. Kljueva. T.3. Ul'trazvukovoj kontrol' [Non-destructive testing. Vol.3: Ultrasonic testing]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2004. 864 p.
2. Ermolov I.N., N.P. Aleshin, A.I. Potapov. Nerazrushajushhij kontrol': prakt. posobie: v 5 kn., kn. 2. Akusticheskie metody kontrolya [Non-destructive testing. Vol. 2. Acoustic methods of control]. Moscow. Vysshayashkola Publ., 1991. 283 p.
3. Petrishhev O.N. Garmonicheskie kolebaniya p'ezokeramicheskikh jelementov. Chast 1. Garmonicheskie kolebaniya p'ezokeramicheskikh jelementov v vakuume i metod rezonansa – antirezonansa [Harmonic oscillations of piezoceramic elements. Part 1. The harmonic oscillations of piezoelectric elements and a method of vacuum resonance - antiresonance]. Kiev, Avers Publ., 2012. 300 p.
4. Vlasov, K. B. Some questions in the theory of elastic ferromagnetic (magnetostrictive) media [Some questions in the theory of elastic ferromagnetic magnetostrictive environments]. Math. USSR Academy of Sciences. Ser. Physical, 1957, Vol. 21, no 8, pp. 1140-1148.
5. Petryshchev O. M., Trokhymets' A. P., Trokhymets' V. A. Patent Ukrayiny 18475. G01R 33/18. Sposib vyznachennya fizyko-mekhanichnykh konstant polikrystalichnykh mahnitostriksyinykh (feromahnitnykh) materialiv [Method of determining the physical and mechanical polycrystalline magnetostrictive constants (ferromagnetic) materials]. Opubl. 15. 11. 2006. Byul. 11.
6. Donnel L.G. Balki, plastiny i obolochki [Beams, plates and membranes]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 317 p.
7. Koshlyakov N. S., Gliner E. B., Smimov M. M. Uravneniya v chastnykh proizvodnykh matematicheskoy fiziki [Partial differential equations of mathematical physics]. Moscow: Vysshayashkola Publ., 1970, 710 p.
8. Smimov V. I. Kurs vysshymatematiki Tom III. Chast' 2 [Course of higher mathematics. Vol. 3]. Moscow, Nauka Publ., 1974, 672 p.
9. Mittra R., Li S. Analiticheskie metody teorii volnovodov [Analytical methods of the theory of waveguides]. Moscow, Mir Publ., 1974, 327 p.
10. Feodos'ev V.I. Soprotivleniye materialov [Strength of materials]. Moscow, Nauka Publ., 1986, 512 p.

Поступила (received) 25.05.2017

Бібліографічні описи /Библиографические описания /Bibliographic descriptions

Моделирование электромагнитного возбуждения ультразвуковых крутильных волн в ферромагнитных стержнях / О. Н. Петрищев, Г. М. Сучков, М. Е. Познякова, Н. Н. Юданова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017.- № 4 (1226). – С. 25–34. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-4525.

Моделирование электромагнитного возбуждения ультразвуковых крутильных волн в ферромагнитных стержнях / О. М. Петрищев, Г. М. Сучков, М. Е. Познякова, Н. М. Юданова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. :НТУ «ХПІ», 2017. -№ 4 (1226). – С. 25–34. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-4525.

Modeling of an electromagnetic excitation of ultrasonic torsional waves in ferromagnetic rods population / O. N. Petrishev, G. M. Suchkov, M. E. Poznyakova, N. N. Yudanov// Bulletin of NTU "KhPI". Series: *Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tehnika*. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No.4 (1226). – P. 25–34. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-4525.

Відомості про авторів /Сведения об авторах /About the Authors

Петрищев Олег Миколайович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». професор кафедри «Акустика і акустоелектроніка»; 044-493-66-11; e-mail: petrishev@ukr.net.

Петрищев Олег Николаевич – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт». профессор кафедры «Акустика и акустоэлектроника»; 044-493-66-11; e-mail: petrishev@ukr.net.

Petrishev Oleg Nikolaevich - Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Professor of the Department "Acoustics and acoustoelectronics"; 044-493-66-11; e-mail: petrishev@ukr.net.

Сучков Григорій Михайлович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри «Прилади і методи неруйнівного контролю»; (+38) 098 -595-00-58, (+38) 050-762-02-94; e-mail: suchkov_gm@mail.ru

Сучков Григорий Михайлович - доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», заведующий кафедрой «Приборы и методы неразрушающего контроля»; (+38) 098 -595-00-58, (+38) 050-762-02-94; e-mail: suchkov_gm@mail.ru

Suchkov Grigoriy Mihaylovich - Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Head of the Department "Instruments and methods of nondestructive testing"; (+38) 098 -595-00-58, (+38) 050-762-02-94; e-mail: suchkov_gm@mail.ru.

Познякова Маргарита Євгенівна - Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», асистент кафедри «Прилади і методи неруйнівного контролю»; (+38) 066-315-87-72; e-mail: poznyakova-me@mail.ru.

Познякова Маргарита Евгеньевна - Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ассистент кафедры «Приборы и методы неразрушающего контроля»; (+38) 066-315-87-72; e-mail: poznyakova-me@mail.ru.

Poznyakov Margarita Evgenevna - National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Assistant of the Department "Instruments and methods of nondestructive testing"; (+38) 066-315-87-72; e-mail: poznyakova-me@mail.ru.

Юданова Ніна Миколаївна - Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри «Прилади і методи неруйнівного контролю»; +38(057)707-63-80.

Юданова Нина Николаевна - Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», старший преподаватель кафедры «Приборы и методы неразрушающего контроля»; +38(057)707-63-80.

Yudanov Nina Nikolayevna - National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Senior Lecturer of the Department "Instruments and methods of nondestructive testing"; +38(057)707-63-80.

С. Ю. ПЛЕСНЕЦОВ, Р. П. МИГУЩЕНКО, О. Н. ПЕТРИЩЕВ, Г. М. СУЧКОВ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО – АКУСТИЧЕСКОГО СПОСОБА ВОЗБУЖДЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН. ЧАСТЬ 1

Приведено описание процесса разработки принципов и методов расчета ультразвуковых преобразователей электромагнитного типа для систем неразрушающего контроля и технической диагностики металлопроката, для первичных преобразователей в устройствах электрического измерения неэлектрических величин, для аппаратуры экспериментального исследования физико-механических и структурных параметров металлов. Приведено решение задачи определения характеристик преобразования посредством элементов теории упругости и векторного описания магнитного поля. Показана возможность определения необходимых характеристик преобразователя через функцию «частотная характеристика преобразователя».

Ключевые слова: математическая модель, метод, контроль неразрушающий, электромагнитно-акустическая дефектоскопия

Наведено опис процесу розробки принципів і методів розрахунку ультразвукових перетворювачів електромагнітного типу для систем неруйнівного контролю та технічної діагностики металлопрокату, для первинних перетворювачів в пристроях електричного вимірювання неелектричних величин, для апаратури експериментального дослідження фізико-механічних і структурних параметрів металів. Наведено рішення задачі визначення характеристик перетворення за допомогою елементів теорії пружності і векторного опису магнітного поля. Показана можливість визначення необхідних характеристик перетворювача через функцію «частотна характеристика перетворювача».

Ключові слова: математична модель, метод, контроль неруйнівний, електромагнітно-акустическая дефектоскопія

The description of the development process of principles and methods for calculating ultrasonic transducers of electromagnetic type for systems of nondestructive testing and technical diagnostics of rolled metal, for primary converters in devices for the electrical measurement of non-electrical quantities, for equipment for experimental study of mechanical and structural parameters of metals is given. The solution of the problem of determining the characteristics of the transformation by means of elements of the theory of elasticity and a vector description of the magnetic field is given. The solution for elasticity aspect of the problem has the meaning of the stationary boundary value problem of the theory of elasticity on the excitation of harmonic waves by a system of external forces. The solution from the side of electromagnetic field allows to determine the components of the intensity vector of the internal magnetic field. The possibility of determining the necessary characteristics of the converter through the function "frequency characteristic of the converter" is shown.

Keywords: mathematical model, method, non-destructive testing, electromagnetic-acoustic defectoscopy

Введение. Во многих направлениях физических исследований, для определения свойств электропроводных и (или) ферромагнитных материалов, при дефектоскопии изделий и т.п. широко применяют ультразвуковые волны. При этом, как правило, применяют приборы, реализующие контактный (с применением «контактной» жидкости) способ ввода и приема ультразвуковых колебаний (УЗК) [1]. В некоторых случаях применение контактной жидкости недопустимо или нецелесообразно по экономическим или техническим причинам [2]. Известен способ возбуждения и приема УЗК [3-5] за счет взаимодействия с металлом высокочастотного электромагнитного и поляризующего магнитного полей. Для его описания требуется использование аппаратов электродинамики, теории упругости, ферромагнетизма, акустики, материаловедения. Значительная сложность научных и технических решений не позволяют широко использовать электромагнитно – акустический (ЭМА) способ на практике [1]. Результаты теоретических исследований, приведенные в известной литературе, например [3-7], не являются достаточными для обоснованного конструирования ЭМА преобразователей (ЭМАП), которые при минимуме ограничительных положений могли бы позволить обосновать основные концепции по созданию ЭМАП с заданными характеристиками.

Проведение исследований. Анализ результатов. Под понятием ЭМАП будем считать систему с распределенными параметрами, состоящую из источника постоянного магнитного поля,

источника переменного магнитного поля и некоторого объема металла, где происходят процессы преобразования электромагнитной энергии в энергию УЗК. При этом учитываются магнитострикционные эффекты и (или) пондеромоторное действие электромагнитного поля в ферромагнитных и неферромагнитных электропроводных материалах соответственно.

Процесс возбуждения УЗК различными ЭМАП можно описать следующей цепочкой преобразований. К высокочастотной катушке (индуктору) прикладывается переменное напряжение $U_{\text{ex}}(t)$. В индукторе формируется ток $I^*(t)$, который создает переменное магнитное поле с вектором напряженности $\vec{H}^*(x_k, t)$ в точке с координатами x_k , где $x_k = (x_1, x_2, x_3)$ – координаты точки в праввинтовой системе координат. Переменное магнитное поле взаимодействует с ограниченной областью металла, свойства которой условно можно

представить в виде $\begin{pmatrix} C_{ijkl}^H, \rho_0, r_{nm} \\ m_{pqkl}, \mu_{rs}^e \end{pmatrix}$. В круглых скобках

записаны физико-механические константы металла в области существования переменного и постоянного магнитных полей. В скобках указаны: C_{ijkl}^H – компонент тензора модулей упругости, экспериментально определяемый в режиме постоянства напряженности магнитного поля; ρ_0 – плотность металла; r_{mn} – компонент тензора

электрической проводимости металла; m_{pqkl} – компонент тензора магнитоэлектрических констант; μ_{rs}^e – компонент тензора магнитной проницаемости, экспериментально определяемый в режиме постоянства деформаций при заданном уровне напряженности поля подмагничивания. К этой же области металла прикладывается постоянное поляризующее поле с вектором напряженности $\vec{H}^0(x_k)$. Для металлов неферромагнитной группы ориентация $\vec{H}^0(x_k)$ определяет направление вектора объемной плотности сил Лоренца в точке с координатами x_k . Для ферромагнитного материала вектор $\vec{H}^0(x_k)$ определяет структуру матрицы пьезомагнитных констант (характер напряженно-деформированного состояния металла в ближайшей окрестности точки с координатами x_k). В отмеченной области металла в результате взаимодействия магнитных полей $\vec{H}^*(x_k, t)$ и $\vec{H}^0(x_k)$ формируются деформации. Энергия из области возбуждения уносится УЗК с вектором смещения $\vec{u}(x_m, t)$. Выходной величиной для ультразвукового преобразователя, являются смещения материальных частиц – векторы $\vec{u}(x_m, t)$ в объеме металла с координатами точки x_m , расположенной за пределами области существования переменного магнитного поля. При этом учтем, что индуктор ЭМАП формирует переменное магнитное поле в локальном объеме металла. При выполнении расчетов границы этого объема металла, т.е. области существования переменного магнитного поля, можно считать, что на расстоянии более 3...4 размеров индуктора магнитное поле становится ничтожным в сравнении с полем в зоне его действия.

Положим, что уровни постоянного магнитного поля и значения компонентов вектора напряженности переменного магнитного поля удовлетворяют неравенству

$$\int_{V^*} H_m^0(x_k) H_m^0(x_k) dV^* \gg \int_{V^*} H_m^*(x_k, t_0) H_m^*(x_k, t_0) dV^* \quad (1)$$

где координаты точки $x_k \in V^*$, а V^* – конечный объем области существования переменного магнитного поля, в котором сосредоточена основная доля его энергии; t_0 – любой, произвольно зафиксированный момент времени. Такое соотношение уровней напряженностей магнитных полей дает возможность утверждать, что преобразование $U_{ex}(t) \rightarrow \vec{u}(x_m, t)$ является линейным и, следовательно, можно применить принцип суперпозиции. Если известна реакция системы на гармоническое воздействие, то сумма реакций будет соответствовать сумме гармонических воздействий. Так как импульсный сигнал может быть представлен суммой гармонических сигналов, то

можно утверждать, что по известной реакции линейной физической системы на гармоническое воздействие всегда можно определить отклик этой системы на импульсное воздействие. Последнее позволяет отказаться от постановки сложной в решении и в интерпретации полученных результатов нестационарной задачи об импульсном возбуждении упругих возмущений и перейти к стационарной постановке, в которой воздействие на систему и ее отклик предполагаются гармонически изменяющимися во времени с частотой ω по закону $e^{i\omega t}$ ($i = \sqrt{-1}$).

Если на электрическом входе ЭМАП действует напряжение $U_{ex} = U_0 e^{i\omega t}$, где U_0 – амплитудное значение, то на его механическом выходе формируется отклик $\vec{u}(x_k, t) = \vec{u}(x_k, \omega) e^{i\omega t}$, где $\vec{u}(x_k, \omega)$ амплитуда гармонически изменяющегося во времени вектора смещения материальных частиц. При этом между амплитудами воздействия и отклика преобразователя существует линейная зависимость следующего вида

$$\vec{u}(x_k, \omega) = U_0 \vec{W}(x_k, \omega, P),$$

где компоненты векторной функции $\vec{W}(x_k, \omega, P)$, т.е. величины $W_m(x_k, \omega, P)$, имеют смысл частотных характеристик ЭМАП в режиме возбуждения m -го компонента вектора смещения материальных частиц металла; символом P обозначен набор геометрических и физико-механических параметров ЭМА преобразователя.

Очевидно, что основной целью математического моделирования ЭМА преобразователей в режиме возбуждения УЗК является построение функции $\vec{W}(x_k, \omega, P)$, которая дает возможность определить параметры датчика.

С целью развития единого подхода к построению математических моделей ЭМАП, рассмотрим процессы в токопроводящем ферромагнетике при совместном воздействии на него переменного и постоянного во времени магнитных полей.

Изменяющиеся во времени смещения $u_n(x_k, t)$ материальных частиц в объеме V токопроводящего ферромагнетика удовлетворяют уравнениям движения

$$\sigma_{mn,m} - L_n - \rho_0 \ddot{u}_n = 0 \quad \forall x_k \in V, \quad (2)$$

а электромагнитные поля, возникающие в среде из-за поляризационных эффектов, – уравнениям Максвелла

$$\varepsilon_{lpk} E_{k,p} + \dot{B}_l = 0 \quad \forall x_k \in V, \quad (3)$$

$$\varepsilon_{lpk} H_{k,p} - J_l - \dot{D}_l = 0 \quad \forall x_k \in V, \quad (4)$$

причем компоненты векторов $\vec{B}$ и $\vec{D}$ удовлетворяют условиям

$$B_{l,l} = 0 \quad \forall x_k \in V, \quad D_{l,l} - \rho^e = 0 \quad \forall x_k \in V. \quad (5)$$

В уравнениях (2) – (5) приняты следующие обозначения: σ_{mn} – компонент тензора механических напряжений; запятая между индексами означает дифференцирование записанного до запятой

выражения по координате, индекс которой проставлен после запятой; L_n – n -й компонент силы Лоренца; ρ_0 – плотность ферромагнитного материала; одна или две точки над символом физической величины обозначают первую или вторую производную по времени; ε_{lpk} – компонент тензора Леви-Чивиты, равный +1 или –1 при четных или нечетных перестановках чисел 1, 2, 3 (индексов l, p, k) и равный 0, когда любые два индекса из трех равны между собой; E_k и H_k – компоненты векторов напряженности электрического и магнитного поля; D_l и B_l – компоненты векторов индукции электрического и магнитного поля; ρ^e – объемная плотность свободных электрических зарядов. Символом H_k обозначена напряженность результирующего магнитного поля, т. е. величина $H_k(x_k, t) = H_k^0(x_k) + H_k^*(x_k)e^{i\omega t} + h_k(x_k, t)$, где $h_k(x_k, t)$ – k -ый компонент вектора напряженности внутреннего магнитного поля, которое возникает в объеме деформируемого ферромагнетика. Очевидно, что векторы $\vec{H}^*(x_k)$ и $\vec{H}^0(x_k)$ удовлетворяют уравнениям Максвелла.

Применительно к металлам, т. е. к электропроводящим средам можно считать, что токи смещения с компонентами поверхностной плотности $\vec{D}_l$ в уравнении (4) ничтожно малы (по крайней мере в мегагерцовом частотном диапазоне) по сравнению с токами проводимости (могут достигать сотен ампер). К тому же следует уточнить, что дальнейшее изложение будет вестись в предположении, что плотность сторонних свободных электрических зарядов $\rho^e = 0$. Эти два обстоятельства дают все основания полагать в дальнейшем $\vec{D} = 0$.

Уравнения движения (2) и уравнения Максвелла (3) – (4) связаны между собой уравнениями состояния магнитострикционной среды [8], которые в первом приближении можно представить в следующем виде

$$\sigma_{mn} = c_{mnkl}^H u_{k,l} - \frac{1}{2} m_{pqmn} H_p H_q, \quad (6)$$

$$B_s = m_{nskl} H_n u_{k,l} + \mu_{sm}^e H_m, \quad (7)$$

где c_{mnkl}^H и m_{pqmn} – компоненты тензоров модулей упругости и магнитострикционных констант размагниченного ферромагнетика; μ_{sm}^e – компонент тензора магнитной проницаемости «закатого» (недеформируемого) ферромагнетика. Для поликристаллических материалов тензоры c_{mnkl}^H и m_{pqmn} являются изотропными тензорами четвертого ранга с компонентами $c_{mnkl}^H = \lambda \delta_{mn} \delta_{kl} + G(\delta_{mk} \delta_{nl} + \delta_{ml} \delta_{nk})$ и $m_{pqmn} = m_2 \delta_{pq} \delta_{mn} + \frac{(m_1 - m_2)(\delta_{pm} \delta_{ql} + \delta_{pl} \delta_{qm})}{2}$, где λ и G – константы Ламе; δ_{ij} – символы Кронекера, равные единице при одинаковых индексах i, j и

равные нулю в противном случае; m_1 и m_2 экспериментально определяемые магнитострикционные константы, причем $m_1 \leq 1 \text{ Н/м}^2$ и $-m_1/2 \leq m_2 < 0$. Система уравнений (2) – (7) замыкается обобщенным законом Ома в дифференциальной форме

$$J_l = r_{lk}(E_k + \varepsilon_{kpq} \dot{u}_p B_q), \quad (8)$$

где r_{lk} – компоненты тензоров электрической проводимости ферромагнетика. Тензоры магнитной проницаемости и электрической проводимости имеют матрицы диагонального типа. Следует заметить, что для движущейся токопроводящей среды соотношения (7) и (8) будут содержать добавки, величины которых обратно пропорциональны квадрату скорости распространения электромагнитных возмущений в среде. Очевидно, что в ультразвуковом диапазоне частот этими добавками можно пренебречь.

Объемная плотность сил Лоренца определяется следующим образом

$$L_n = \varepsilon_{nrs} r_{rl}(E_l + \varepsilon_{lpq} \dot{u}_p B_q) B_s. \quad (9)$$

Следовательно, совместное решение уравнений движения (2) и уравнений Максвелла (3), (4) с учетом связывающих и дополняющих их соотношений (5) – (9) дает возможность определить как упругую, так и электромагнитную составляющую единого электромагнитоупругого поля, существующего в объеме деформируемого и поляризованного постоянным магнитным полем металла.

Для упрощения представим совокупность дифференциальных уравнений (2) – (4) и дополняющих их материальных соотношений (5) – (9) в более компактной форме.

Подставим в уравнения движения (2) соотношения (6) и (9):

$$c_{mnkl}^H u_{k,lm} - \frac{1}{2} m_{pqmn} (H_p H_q)_{,m} - \rho_0 \ddot{u}_n - \varepsilon_{nrs} r_{rl} (E_l + \varepsilon_{lpq} \dot{u}_p B_q) B_s = 0 \quad \forall x_k \in V \quad (10)$$

С учетом выражений сформулированных выше предположений уравнение Максвелла (4) приобретает следующий вид:

$$\varepsilon_{lpk} H_{k,p} - r_{lr} (E_r + \varepsilon_{rpq} \dot{u}_p B_q) = 0. \quad (11)$$

Для поликристаллических металлов с матрицей электрической проводимости диагонального типа решение системы уравнений (11) относительно компонентов вектора напряженности электрического поля записывается в следующем виде

$$E_k = \frac{1}{r_{kk}} \varepsilon_{kml} H_{l,m} - \varepsilon_{kpq} \dot{u}_p B_q. \quad (12)$$

По индексу k в правой части выражения (12) не суммировать.

Подставляя определенный формулой (12) компонент вектора $\vec{E}$ в уравнения Максвелла (3), получаем дифференциальное уравнение для

магнитного компонента магнитоупругого поля

$$\varepsilon_{ijk} \left[\frac{1}{r_{kl}} \varepsilon_{klm} H_{l,mj} - \varepsilon_{kpq} (\dot{u}_p B_q)_{,j} \right] + \dot{B}_i = 0 \forall x_k \in V \quad (13)$$

Единственность решения системы уравнений (10) и (13) обеспечивается граничными условиями для упругой и электромагнитной составляющих поля

$$n_n \left(c_{mnkl}^H u_{k,l} - \frac{1}{2} m_{pqmn} H_p H_q + M_{mn} \right) = 0 \forall x_k \in S \quad (14)$$

$$n_s (m_{nsl} H_n u_{k,l} + \mu_{sm}^E H_m - \mu_0 \tilde{H}_s) = 0 \forall x_k \in S \quad (15)$$

$$\varepsilon_{ijk} n_j (H_k - \tilde{H}_k) = 0 \forall x_k \in S, \quad (16)$$

где $\vec{n}$ - вектор единичной нормали к ограничивающей объем V поверхности S ; M_{mn} - компонент тензора напряжений Максвелла, причем $M_{mn} = H_n B_m - (\delta_{mn} H_k B_k)/2$; μ_0 - магнитная проницаемость вакуума; $\tilde{H}_m$ - компоненты вектора напряженности магнитного поля рассеяния, которое излучается в окружающее пространство деформируемым металлом, удовлетворяющие уравнению

$$\nabla^2 \tilde{H} - (1/c_0^2) \ddot{\tilde{H}} = 0 \forall x_k \in (V^\infty - V)$$

в окружающем ферромагнетик пространстве (c_0 - скорость распространения электромагнитного излучения в вакууме) и обращаются в нуль на бесконечности.

При решении граничной задачи (10), (13) - (16) возникают две проблемы, которые можно кратко определить как нелинейность и связность.

Сопряженные с нелинейностью проблемы в значительной мере разрешаются с помощью метода полигармонических разложений [9]. Кроме того, в работе [10] показано, что в присутствии достаточно сильного поля подмагничивания, когда выполняется условие (1), полигармоническую магнитоупругую задачу (10), (13) - (16) можно привести к двум последовательно решаемым гармоническим граничным задачам.

Первая задача имеет смысл стационарной граничной задачи теории упругости о возбуждении гармонических волн системой внешних сил, которые распределены по объему V некоторой конечной области металла с объемной плотностью $\vec{f}^*(x_k) e^{i\omega t}$ и по поверхности S , ограничивающей этот объем, с поверхностной плотностью $\sigma_{ij}^*(x_k) e^{i\omega t}$. Для амплитуд гармонически изменяющихся во времени полей упругих смещений и сил эта задача формулируется следующим образом

$$c_{nmkl}^H u_{k,lm} + \rho_0 \omega^2 u_n - f_n^* = 0 \forall x_k \in V, \quad (17)$$

$$n_j (c_{ijkl}^H u_{k,l} - \sigma_{ij}^*) = 0 \forall x_k \in S. \quad (18)$$

При электромагнитном возбуждении

ультразвуковых волн в металлах неферромагнитной группы $f_n^* = L_n$ и $\sigma_{ij}^* = H_i^* B_j^0 - (\delta_{ij} H_k^* B_k^0)/2$. Для ферромагнетиков $f_n^* = m_{ijnm} (H_i^0 H_j^*)_{,m}$ и

$\sigma_{ij}^* = m_{mnij} H_m^0 H_n^*$. При этом полагаем, что внутренне магнитное поле не влияет на качественные и количественные характеристики процесса возбуждения УЗК в ферромагнетиках.

Вторая задача позволяет определить компоненты вектора напряженности внутреннего магнитного поля по найденным в результате решения граничной задачи (17), (18) компонентам $u_m(x_k) e^{i\omega t}$ вектора смещения материальных частиц ферромагнитного металла.

Формулировка этой задачи в терминах амплитуд гармонически изменяющихся во времени физических полей будет иметь следующий вид:

$$\varepsilon_{mql} \left(\frac{1}{r_{ll}} \varepsilon_{lpk} h_{k,pq} \right) + i\omega \mu_{mp}^E h_p + i\omega m_{pmkl} H_p^0 u_{k,l} = 0 \forall x_k \in V^{(+)} \quad (19)$$

$$\varepsilon_{kmn} n_m (h_n - \tilde{H}_n) = 0 \forall x_k \in S^{(+)}, \quad (20)$$

$$n_m (m_{pmij} H_p^0 u_{i,j} + \mu_{mn}^* h_n - \mu_0 \tilde{H}_m) = 0 \forall x_k \in S^{(+)} \quad (21)$$

где $V^{(+)}$ и $S^{(+)}$ - объем металла и ограничивающая его поверхность за пределами области приложения внешних сил; $\tilde{H}_m$ - компоненты магнитного поля рассеяния. Решение задачи (19) - (21) позволяет определить динамическое магнитное состояние деформируемого ферромагнетика с учетом скин-эффекта и потерь энергии, обусловленных излучением электромагнитных волн в окружающее пространство. Если не учитывать внутреннее магнитное поле, то за пределами области существования переменного магнитного поля ЭМАП амплитудное значение гармонически изменяющейся во времени магнитной индукции деформируемого ферромагнетика, как следует из уравнения (7), будет определяться следующим образом: $B_s = m_{nsl} H_n^0 u_{k,l}$. Это определение динамического магнитного состояния металла противоречит фундаментальному условию отсутствия магнитных зарядов, т. е. условию $B_{m,m} = 0$. Поэтому определение динамического магнитного состояния деформируемого ферромагнетика определим как

$$B_s = m_{nsl} H_n^0 u_{k,l} + \mu_{sp}^E h_p, \quad (22)$$

где h_p - компонент вектора напряженности внутреннего магнитного поля, определенный в результате решения граничной задачи (19) - (21). Соотношение (22) является отправным пунктом при построении математической модели ЭМАП в режиме регистрации УЗК в ферромагнитных металлах.

Последовательное решение граничных задач (17), (18) и (19) - (21) позволяет приближенно описать

напряженно-деформированное и динамическое магнитное состояние поляризованного постоянным магнитным полем ферромагнетика при локальном воздействии на него переменного магнитного поля ультразвукового ЭМА преобразователя. Предлагаемый подход к описанию физического состояния ферромагнитного металла можно назвать методом последовательного приближения.

Деформирование в присутствии постоянного магнитного поля металла неферромагнитной группы сопровождается появлением конвективных электрических токов [11]. Амплитудное значение $j_k(x_m)$ k -го компонента вектора поверхностной плотности этого тока определяется следующим образом

$$j_k(x_m) = i\omega r \mu_0 \varepsilon_{kmn} u_n(x_m) H_m^0(x_m), \quad (23)$$

где r – компонент шарового тензора удельной электрической проводимости, амплитуды компонент вектора смещения которых определяются в результате решения граничной задачи (17), (18). Выражение (23) является основополагающим при построении математической модели преобразователя электромагнитного типа в режиме приема ультразвуковых волн, распространяющихся в металлах неферромагнитной группы.

Таким образом, решение граничной задачи (17), (18) позволяет определить смещения материальных частиц металла при локальном воздействии на него переменным магнитным полем ЭМАП и построить в ходе этого определения частотную характеристику $\tilde{W}(x_k, \omega, P)$, т. е. математическую модель преобразователя. Помимо этого, решения граничной задачи (17), (18) дают возможность определить динамическое электрическое и магнитное состояние деформируемого металла.

Выводы. Разработана математическая модель электромагнитно – акустического преобразования электромагнитной энергии в акустическую для неферромагнитных и (или) ферромагнитных металлов, содержащая связанные между собой волновое уравнение, уравнения Максвелла и обобщенный закон Ома в дифференциальной форме. В математической модели комплексно учтены характеристики электромагнитно – акустического преобразователя, параметры возбуждаемых сигналов и свойства исследуемого материала. На основании установленных связей сформулированы концептуальные подходы по решению задачи конструирования ЭМА преобразователей для возбуждения ультразвуковых колебаний.

Определены исходные положения, необходимые и достаточные для нахождения характеристик смещений упругих колебаний, возбужденных способом электромагнитно – акустического преобразования.

Список литературы

1. Ермолов И.Н. Неразрушающий контроль: Справочник: В

- 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. – М.: Машиностроение, 2004, 864 с.
2. Судакова К.В. О повышении эффективности контроля качества металлургической продукции / К.В. Судакова, И.Л. Казюкевич // В мире неразрушающего контроля. – 2004. – № 3. – С. 8-10.
3. Suchkov G.M. State-of-the-art capabilities of EMA flaw detection // Russian Journal of Nondestructive Testing. December 2005, Volume 41, Issue 12, pp 790–801.
4. Петрищев О.Н. Теоретичні основи розрахунку та проектування ультразвукових перетворювачів електромагнітного типу. Автореф. дис. д.т.н., Київ: НТУУ «КПІ», 2009, 36 с.
5. Yang Lijian. Simulation and Analysis of Surface Wave Based on Finite Element Method / Yang Lijian, Li Chunhua, Liu Mingming, Gao Songwei // Fifth International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems (ICINIS '12) November 01 - 03, 2012. Pp. 209-212.
6. Remezov, V. B. A study of the electromagnetic fields that are generated by a coil emitter // Russian Journal of Nondestructive Testing. July 2013, Volume 49, Issue 7, pp 365–373.
7. Zhichao Cai Microscopic Mechanism and Experiment Research of Electromagnetically Induced Acoustic Emission / Zhichao Cai, Suzhen Liu, Chuang Zhang, Oingxin Yang // IEEE Transactions on Magnetics, Vol., 51, No. 11, November 2015. Code 9401804. - 4pgs.
8. Власов К.Б. Некоторые вопросы теории упругих ферромагнитных (магнитоэластических) сред // Изв. АН СССР. Сер. Физическая, 1957, Т. 21, № 8, с. 1140–1148.
9. Петрищев О.Н. Метод полигармонических разложений – новый подход к решению нелинейных задач магнитоупругости // Акустика и ультразвуковая техника, 1987, Вып. 2, с. 85–90.
10. Петрищев О.Н. Возбуждение волн Рэлея в металлической полосе, поляризованной постоянным магнитным полем // Акустичний вісник, 2005, №1, с. 85 – 95.
11. Бардзокас Д.И. Распространение волн в электромагнитоупругих средах. / Д.И. Бардзокас, Б.А. Кудрявцев, Н.А. Сеник. // М.: Едиториал УРСС, 2003, 236 с.

References (transliterated)

1. Ermolov I.N, Lange Ju.V. *Nerazrushajushij kontrol': Spravochnik: V 7 t. T.3. Ul'trazvukovoi kontrol'* [Non-destructive testing: Handbook in 7 volumes. Vol. 3: Ultrasonic Testing] Ed. V.V. Kljuev, Moscow, Mashinostroenie, 2004, 864 p.
2. Sudakova K.V., Kazjukevich I. L. *O povyshenii jeffektivnosti kontrolja kachestva metallurgicheskoi produkcii* [On improving the efficiency of quality control of metallurgical products], *V mire nerazrushajushhego kontrolja* [In the world of nondestructive testing]. – 2004. – № 3. – p. 8-10.
3. Suchkov G.M. *State-of-the-art capabilities of EMA flaw detection*, Russian Journal of Nondestructive Testing, December 2005, Volume 41, Issue 12, pp 790–801.
4. Petrishhev O. N. *Teoretichni osnovi rozrahunku ta proektuvannya ul'trazvukovih peretvorjuvachiv elektromagnitnogo tipu. Avtoref. dis. d.t.n.* [Theoretic foundations of calculation and construction of ultrasonic transducers of electromagnetic type. Dissertation autoreferate, doctor of sciences dissertation], Kyiv, NTUU «KPI», 2009, 36 p.
5. Yang Lijian, Li Chunhua, Liu Mingming, Gao Songwei. *Simulation and Analysis of Surface Wave Based on Finite Element Method*. Fifth International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems (ICINIS '12), November 01 - 03, 2012. Pp. 209-212.
6. Remezov, V. B. *A study of the electromagnetic fields that are generated by a coil emitter*. Russian Journal of Nondestructive Testing. July 2013, Volume 49, Issue 7, pp 365–373.
7. Zhichao Cai, Suzhen Liu, Chuang Zhang, Oingxin Yang *Microscopic Mechanism and Experiment Research of Electromagnetically Induced Acoustic Emission*. IEEE Transactions on Magnetics, Vol., 51, No. 11, November 2015. Code 9401804. - 4pgs.
8. Vlasov K. B. *Nekotorye voprosy teorii uprugih ferromagnitnyh (magnitostrikcionnyh) sred* [Some questions of the theory of elastic ferromagnetic (magnetostrictive) environments]. Inf. AS USSR. Ser. "Physics", 1957, V. 21, № 8, pp. 1140–1148.
9. Petrishhev O. N. *Metod poligarmonicheskikh razlozhenij – novyj podhod k resheniju nelinejnyh zadach magnitoupugosti* [The method of polyharmonic expansions - a new approach to solving nonlinear problems of magnetoelasticity]. *Akustika i ul'trazvukovaja tehnika* [Acoustics and ultrasonic devices], 1987, Vol. 2, pp. 85–90.

10. Petrishhev O.N. *Vozbuzhdenie voln Rjeleja v metallicheskoj polose, poljarizovannoj postojannym magnitnym polem* [Excitation of Rayleigh waves in a metallic strip polarized by a constant magnetic field]. *Akustichnij visnik* [Acoustics informant], 2005, №1, pp. 85–95.
11. D. I. Bardzokas, B. A. Kudrjavcev, N. A. Senik

Rasprostranenie voln v jelectromagnitoupругih sredah [Propagation of waves in electromagnetoelastic media]. Moscow, Editorial URSS, 2003, 236 p.

Поступила (received) 05.06.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Математичне моделювання електромагнітної - акустичного способу збудження ультразвукових хвиль. Частина 1 / С.Ю. Плєснецов, Р.П. Мигущенко, О.Н. Петрищев, Г.М. Сучков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 4 (1226). – С.35–40. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-4525.

Математическое моделирование электромагнитно – акустического способа возбуждения ультразвуковых волн. Часть 1 / С.Ю. Плєснецов, Р.П. Мигущенко, О.Н. Петрищев, Г.М. Сучков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика и преобразовательная техника. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 4 (1226). – С. 35–40. – Библиогр.: 11 назв. – ISSN 2079-4525.

Mathematical modeling of the electromagnetic - acoustic method of excitation of ultrasonic waves. Part 1 / S.Ju. Plesnetsov, R.P. Migushhenko, O.N. Petrishhev, G.M. Suchkov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Elektroenergetika i preobrazovatelnaya tehnika. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 4 (1226). – P. 35–40. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-4525.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Плєснецов Сергій Юрійович – асистент кафедри «Прилади і методи неруйнівного контролю» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків. Тел +38(057)7076380, e-mail: rastrelly@gmail.com

Плєснецов Сергей Юрьевич – ассистент кафедры «Приборы и методы неразрушающего контроля» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», г. Харьков. Тел +38(057)7076380, e-mail: rastrelly@gmail.com

Plesnetsov Sergey Yurievich – assistant of «Devices and methods of nondestructive control» department, National technical university “Kharkiv polytechnical institute”, Kharkiv. Phone +38(057)7076380, e-mail: rastrelly@gmail.com

Мигущенко Руслан Павлович - доктор технічних наук, проректор з науково-педагогічної роботи, доцент Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків. Тел +38(057)706-32-13, e-mail: omsroot@kpi.kharkov.ua

Мигущенко Руслан Павлович - доктор технических наук, проректор по научно-педагогической работе, доцент Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», г. Харьков. Тел. +38(057)706-32-13, e-mail: omsroot@kpi.kharkov.ua

Migushenko Ruslan Pavlovich – doctor of technical sciences, scientific and pedagogics prorektor, docent National technical university “Kharkiv polytechnical institute”, Kharkiv. Phone +38(057)706-32-13, e-mail: omsroot@kpi.kharkov.ua

Петрищев Олег Миколайович – доктор технічних наук, доцент кафедри «Акустика та акустоелектроніка» Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», м. Київ. Тел +38(044)4549072, e-mail: kafedra@aae.kpi.ua

Петрищев Олег Николаевич – доктор технических наук, доцент кафедры «Акустика и акустоэлектроника» Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев. Тел +38(044)4549072, e-mail: kafedra@aae.kpi.ua

Petryshev Oleg Nikolaevich – doctor of technical sciences, docent of “Acoustics and acoustoelectronics” department, National technical university of Ukraine “Kyiv polytechnical institute”, Kyiv. Phone +38(044)4549072, e-mail: kafedra@aae.kpi.ua

Сучков Григорій Михайлович - доктор технічних наук, завідувач кафедри «Прилади і методи неруйнівного контролю» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків. Тел +38(057)7076380, e-mail: hpi.suchkov@gmail.com

Сучков Григорий Михайлович – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Приборы и методы неразрушающего контроля» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», г. Харьков. Тел +38(057)7076380, e-mail: hpi.suchkov@gmail.com

Suchkov Grigoriy Michailovich - doctor of technical sciences, chairman of “Devices and methods of nondestructive control» department, National technical university “Kharkiv polytechnical institute”, Kharkiv. Phone +38(057)7076380, e-mail: hpi.suchkov@gmail.com

УДК 620.179.17

**С. Ю. ПЛЕСНЕЦОВ, Р. П. МИГУЩЕНКО, Г. М. СУЧКОВ, О. Н. ПЕТРИЩЕВ, Н. М. ЮДАНОВА,
А. В. МИТИН**

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ ВОЛНАМИ РЕЛЕЯ И ЛЭМБА МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ С КРИВИЗНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В данной статье приведены результаты исследований возможности ультразвукового контроля с использованием ЭМА преобразователей. С целью установления возможности проведения эффективного ультразвукового контроля качества поверхности изделий с изменяемой формой поверхности электромагнитно-акустическим ультразвуковым способом выполнены экспериментальные исследования. Определены условия, при которых ультразвуковые поверхностные волны Релея и Лэмба, генерируемые и принимаемые ЭМА преобразователями, позволяют выявлять эхо на наружной поверхности труб.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, ЭМА преобразователь, волны Релея, волны Лэмба

У даній статті наведені результати досліджень можливості ультразвукового контролю з використанням ЕМА перетворювачів. З метою встановлення можливості проведення ефективного ультразвукового контролю якості поверхні виробів із змінною формою поверхні електромагнітно-акустичним ультразвуковим способом виконано експериментальні дослідження. Визначено умови, при яких ультразвукові поверхневі хвилі Релея і Лемба, що генеруються і прийняті ЕМА перетворювачами, дозволяють виявляти відлуння на зовнішній поверхні труб.

Ключові слова: ультразвуковий контроль, ЕМА перетворювач, хвилі Релея, хвилі Лемба

The article presents the results of research of possibilities of ultrasonic inspection using EMAT transducers. In order to establish the possibility of effective ultrasonic surface quality control of products with variable shape of the surface using the electromagnetic acoustic ultrasonic method experimental studies were performed. Substantial difficulties arise during the control of thin metal or, if necessary, when detecting surface defects in accordance with the requirements of normative-technical documentation. For each products surface curvature it is necessary to make a separate piezoelectric transducer. Some tubulars have an outer and inner surface waviness, nicks, indentations, metal nicked, substantially exceeding the established specifications and technical documentation on depth. Costs of control are substantially increased. The conditions under which the ultrasonic Rayleigh and Lamb surface waves generated and received by EMA transducers allow the identification of the echo on the outer surface of the pipe were defined. Much of metal structures and other products used in the industry, have a complex shape and very often not made of thick metal: pipes, sheets, curved profiles, etc.

Keywords: ultrasonic testing, EMA transducer, Rayleigh waves, Lamb waves

Введение. Значительная часть металлоконструкций и других изделий, которые используются в промышленности, имеют сложную форму и очень часто изготавливаются из не толстого металла: трубы, листы, гнутые профили и т.п. Сложная форма таких изделий позволяет уменьшить металлоемкость, но заметно усложняет технологию неразрушающего контроля их качества. Это обусловлено тем, что традиционные методы ультразвукового контроля (УЗК) [1], использующие пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП), при сложной форме поверхности ввода ультразвука требуют изменения формы контактной поверхности ПЭП [2]. Следовательно, для каждой кривизны поверхности изделия необходимо изготавливать отдельный ПЭП. Затраты на проведение контроля существенно увеличиваются. Поэтому чаще всего ограничиваются УЗК сварных швов [3] и редко контролируют основной металл.

Существенные сложности возникают при контроле металлоизделий малой толщины или при необходимости обнаруживать поверхностные дефекты в соответствии с требованиями нормативно-технической документации (НТД), например при УЗК рельсов, труб [4-5] и т.п. Для проведения такого вида

неразрушающего контроля используют ультразвуковые волны Релея или Лэмба (для тонкостенных изделий). Однако, возможность использования ПЭП существенно ограничено из-за наличия контактной жидкости на контролируемой поверхности объекта контроля (ОК) [1]. Капельки жидкости на поверхности ОК приводят к появлению ложных отраженных импульсов и, соответственно, к ложной браковке изделия. Кроме того, например, для случая УЗК труб широкий спектр температур сильно осложняет работу дефектоскопов. Температура труб в условиях эксплуатации колеблется от + 70°С летом до – 35° зимой. Некоторые трубные изделия имеют наружную и внутреннюю поверхность с волнистостью, забоинами, вдавливаниями, надрывами металла, существенно превышающими установленные НТД глубины. Эти неровности поверхности имеют случайные размеры с плавным изменением формы и, как правило, если чрезмерно не уменьшают толщину стенки, не представляют опасности при эксплуатации. При ультразвуковом контроле труб с помощью ПЭП неровности поверхности не типно позволяют выделить эхо сигналы от трещин на внутренней и наружной поверхности даже при контроле прямым лучом. Малейшие изменения положения ПЭП относительно

ОК приводят к резкому ухудшению достоверности контроля [1]. Кроме того, использование традиционных контактных методов УЗК требует применения специальной дорогостоящей очистки поверхности труб.

В последние годы нашли развитие бесконтактные методы возбуждения и приема ультразвуковых импульсов [1, 6-8]. Среди них, на современном этапе, нашел наибольшее применение электромагнитно – акустический (ЭМА) способ возбуждения и приема ультразвуковых импульсов волн различного типа, в том числе импульсов волн Релея и Лэмба [1, 9-10]. ЭМА способ позволяет исключить использование контактных жидкостей для создания акустического контакта, что в свою очередь повышает технологичность контроля, его скорость, надежность и позволяет осуществлять дефектоскопию в условиях любых морозов или жары [6].

Однако сведений о результатах применения импульсов волн Релея и Лэмба для обнаружения дефектов, определения физико – механических характеристик материала металлоконструкций и других изделий, имеющих сложную форму и изготовленных из не толстого металла, ЭМА способом, опубликовано недостаточно.

Цель работы - исследование и определение возможностей новой аппаратуры и ЭМА преобразователей (ЭМАП) для электромагнитно-акустического ультразвукового контроля ОК импульсами волн Релея и Лэмба.

Основная часть. Для достижения поставленной цели были разработаны ЭМАП и стенд для экспериментальных исследований, рис.1. Стенд содержит раздельно совмещенный ЭМАП 1 с протектором 2. Питание ЭМАП 1 импульсами тока осуществлялось генератором 3 зондирующих импульсов (ГЗИ) [8]. ГЗИ 3 был снабжен регуляторами частоты заполнения зондирующих импульсов, их длительности и выходного напряжения. Принятые из ОК импульсы, отраженные дефектом D , усиливались предварительным малошумящим усилителем 4. Усиленные сигналы поступали на серийный дефектоскоп 5. Серийный дефектоскоп 5 синхронизировал работу всех блоков стенда.

При экспериментальных исследованиях была применена следующая методика.

При контроле волнами Релея. На поверхность контрольного образца с заданным дефектом D , величина которого установлена НТД на контроль, размещают ЭМАП 1. Его запитывают от ГЗИ 3 пакетными импульсами тока с частотой заполнения и длительностью, устанавливаемых с помощью соответствующих регуляторов. Напряжение импульсов питания на ЭМАП 1 вначале устанавливается максимальным. Зафиксировав на экране дефектоскопа 5 сигнал, поступивший от усилителя 4, регулируют частоту заполнения и длительность импульса тока питания ЭМАП 1 до получения максимальной амплитуды сигнала отраженного от дефекта. Затем переходят на ОК и выполняют его сканирование. При обнаружении

дефекта фиксируют соответствующую ему величину амплитуды импульса. При данных исследованиях фиксировалась величина отношения амплитуды эхо сигнала от дефекта к амплитуде шума, включая акустические помехи.

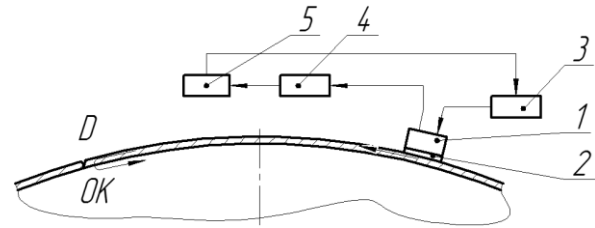


Рис. 1 - Блок-схема стенда для проведения экспериментальных исследований выявляемости дефектов поверхности металлоизделий

1 – ЭМАП; 2 – протектор; 3 – генератор зондирующих импульсов; 4 – усилитель; 5 – серийный дефектоскоп

При контроле волнами Лэмба. При контроле тонкостенных изделий частоту заполнения зондирующих импульсов устанавливают в соответствие с выбранной модой нормальных волн, как правило, устанавливаемой НТД на контроль и рассчитываемой по выражению, приведенному в работе [1]. Ее также устанавливают с помощью соответствующего регулятора ГЗИ 3. Остальные операции проводят также, как и в предыдущем случае.

На первом этапе были выполнены исследования преимущественно на образцах трубчатой формы. Предварительно была оценена дальность распространения поверхностной волны, генерируемой стендом, на обточенных образцах бесшовных труб диаметром 168 мм с различной степенью обработки и на трубах в состоянии поставки с предприятий изготовителей. На частоте 0,9 МГц поверхностные волны Релея, возбужденные ЭМАП в поверхностном слое обточенного образца трубы, фиксировали с отношением амплитуд сигнала и шума на уровне не менее 6 дБ на расстоянии около 5 м от точки ввода. Расстояние рассчитывалось по сигналам многократного обегания импульсами волн Релея трубы по окружности, рис.2.

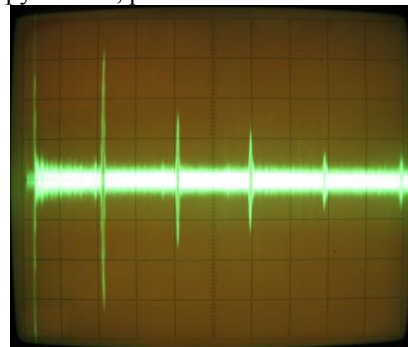


Рис. 2 - Временная развертка на экране с импульсами многократного обегания по наружной окружности трубы, сформированных от одного зондирующего импульса

Проведенными исследованиями установлено, что по мере увеличения шероховатости поверхности образцов трубы расстояние, на котором фиксируется сигнал с амплитудой 6 дБ, уменьшается. Для образцов

бесшовной трубы с поверхностью в состоянии поставки (наличие ржавчины и окалины на поверхности) указанное расстояние уменьшается до 1,5...1,7 м. Этого достаточно для проведения одним ЭМАП ультразвукового контроля эхо методом труб диаметром до 500 мм. При снижении частоты заполнения зондирующих импульсов дальность распространения волн Релея увеличивается из-за уменьшения влияния состояния поверхности ОК на ослабление полезных сигналов. Так, при частоте ультразвуковых колебаний 300 кГц дальность распространения волн Релея увеличивается на обточенном образце до 10...12 м. Т.е. имеется возможность контроля качества поверхности труб практически любого диаметра, применяемых в промышленности.

На втором этапе выполнены исследования по обнаружению моделей дефектов, форма и размеры которых предусмотрены НТД на контроль или изделие, например [4]. Типичные результаты исследований для частоты УЗ колебаний 0,9 МГц и длительности импульса, равной 6 периодам, приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Результаты исследований моделей дефектов в виде пазов с различными параметрами, изготовленных на обточенной поверхности бесшовной трубы с наружным диаметром 168 мм

Модель дефекта	Отношение амплитуд отраженного эхо сигнала импульса волны Релея и шума, дБ
Продольный паз на наружной поверхности длиной 120 мм, раскрытием 15 мм и глубиной, мм:	
1,20	34,49
1,05	33,63
0,83	33,26
0,56	32,04
0,37	30,37
0,22	26,44
Поперечный паз на наружной поверхности 12,5 мм, раскрытием 0,15 мм и глубиной 0,6 мм	28,94
Продольный паз на внутренней поверхности длиной 32 мм, раскрытием 0,15 мм и глубиной 1,7 мм	33,98
Продольное отверстие в стенке вдоль образующей диаметром 2 мм просверленное на глубину 34 мм	30,37

Анализ приведенных исследований показывает, что модели поверхностных дефектов, как правило изготавливаемых в стандартных образцах предприятий для настройки и проверки дефектоскопов,

выявляются надежно.

На третьем этапе исследована выявляемость дефектов, возникающих в процессе производства: трещин, волосовин, закатов, плен и др. Установлено, что поверхностными волнами разработанный стенд уверенно обнаруживает дефекты, имеющие области резкого излома границы металла, т.е. дефекты типа трещин, волосовин. Плены и закаты выявляются не всегда. В то же время хорошо выявляются внутренние дефекты в теле трубы на глубине до 4,5-5 мм (соотношение амплитуд эхо-сигнала и шума превышает 6 дБ).

Исследована выявляемость имитаторов дефектов в виде продольного паза прямоугольного сечения длиной 10 мм раскрытием 0,15 мм и различной глубины на поверхности бесшовной трубы диаметром 168 мм и толщиной стенки 10,4 мм. Исследования показали, что на черновой поверхности трубы с плавными местными неровностями глубиной 1 мм и более поверхностными волнами уверенно выявляются пазы глубиной более 0,2 мм.

Исследована зависимость выявляемости дефектов от расстояния между ЭМАП и дефектом. Установлено, что выявляемость дефекта длиной 12 мм с раскрытием 0,15 мм и глубиной 0,6 мм зависит от расстояния между ЭМАП и дефектом нелинейно, рис.3.

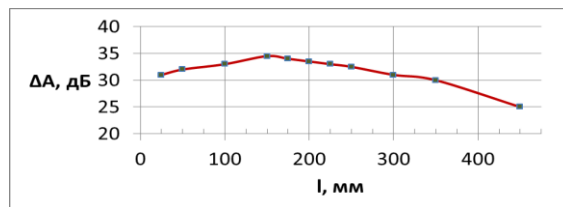


Рис. 3 - Зависимость отношения амплитуд эхо сигналов от дефекта и помех от его расстояния до ЭМАП при использовании волн Релея, частота 500 кГц

Анализ приведенных данных показывает, что сначала выявляемость незначительно растет, а затем плавно уменьшается. На интервале 25...300 мм измеренная амплитуда изменяется всего на 3,5 дБ. Поскольку зависимость не является сильной то в значительном числе случаев такое изменение амплитуды на относительно небольших расстояниях до дефекта можно не учитывать. При строгих требованиях НТД к размеру выявляемых дефектов необходимо такую зависимость определять до проведения контроля и вносить в память компьютера для последующего учета. Установлено, что такая зависимость обусловлена особенностями конструкции раздельно – совмещенного ЭМАП.

Таким образом, из анализа результатов исследований установлено, что по всему периметру трубы наружным диаметром около 170 мм предельно допустимый дефект глубиной 5% от толщины стенки [4] обнаруживается поверхностными волнами эхо методом надежно. При исследовании труб другого диаметра Также надежно обнаруживаются дефекты на поверхности различных труб диаметром от 51 до 420 мм.

Аналогичные результаты получены при контроле тонкостенных изделий волнами Лэмба.

Выводы. В результате выполненных экспериментальных исследований установлена возможность проведения эффективного ультразвукового контроля качества поверхности изделий широкого сортамента с изменяемой формой поверхности электромагнитно-акустическим ультразвуковым способом без применения контактных жидкостей и без специальной подготовки поверхностей.

Установлено, что ультразвуковые поверхностные волны Релея и Лэмба, генерируемые и принимаемые ЭМА преобразователями, позволяют выявлять эхо на наружной поверхности труб диаметром до 420 мм поверхностные дефекты глубиной 5% от толщины стенки трубы и более.

Список литературы

1. Ермолов И.Н. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под ред. В.В. Клюева. Т.3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. – Москва: Машиностроение, 2004. – 864 с.
2. Ермолов И.Н. Неразрушающий контроль: практ. пособие: в 5 кн., кн. 2. Акустические методы контроля / И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.И. Потопов; под ред. В.В. Сухорукова. – Москва: Высшая школа, 1991. – 283 с. 3. Ермолов И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля. – М: Машиностроение, 1981. – 240 с.
4. ГОСТ 632-80. Трубы обсадные и муфты к ним. Технические условия.// Издательство стандартов. М. 1986. С. 66.
5. ТУ У 14-2-1199-87. Рельсы железнодорожные нетермообработанные и поверхностно-закаленные, проконтролированные ультразвуковым методом в зоне, ограниченной толщиной шейки. Технические условия.. Харьков: УкрНИИМет, 1997. С. 14.
6. Сучков Г. М. Теория и практика электромагнитно-акустического контроля. Часть 4. Экспериментальные исследования возможностей ультразвукового контроля ЭМА способом: монография / Г.М.Сучков, О.Н. Петрищев, С.М. Глоба – Х: Щедра садиба плюс, 2015 – 104 с.
7. Мигущенко Р.П. Теория и практика электромагнитно-акустического контроля. Часть 5. Особенности конструирования и практического применения ЭМА устройств ультразвукового контроля металлоизделий: монография / Г.М. Сучков, О.Н. Петрищев, А.В. Десятниченко – Х: ТОВ «Планета-принт», 2016 – 230 с.
8. Suchkov G. M. Generator of Probing Pulses for EMA Flaw Detectors/ O. N. Petrishchev, I. V. Cherednichenko, V. V. Fedorov, A. V. Desyatnichenko, S. V. Khashchina, M. S. Maslova // Russian Journal of Nondestructive Testing (USA). – 2012. – Vol. 48. - No. 9. – Pp. 537 – 540.
9. Сучков Г.М. Повышение возможностей бесконтактной дефектоскопии поверхности катанных ферромагнитных металлоизделий / Г.М. Сучков, О.Н. Петрищев, А.В. Десятниченко и др. // Контроль. Диагностика. – Москва, 2013. – № 4 –с. 31-35.
10. Сучков Г.М. Математическое моделирование процесса регистрации ультразвуковых волн в стальном металлопрокате преобразователем электромагнитного типа. Часть 1 / Г.М. Сучков, М.И. Романюк, О.Н. Петрищев и др. // Электроника и связь. Киев: НТУУ «КПИ», 2012. – № 6. – С. 94-108.
3. Ermolov I. N. Teoriya i praktika ultrazvukovogo kontrolya. – Moscow. Mashinostroenie, 1981. – 240 p.
4. GOST 632-80. Trubyi obsadnye i muftyi k nim. Tehnicheskie usloviya.// Izdatelstvo standartov. Moscow. 1986. pp. 66.
5. TU U 14-2-1199-87. Relsyi zheleznodorozhnyie netermoobrabotannyye i poverhnostno-zakalennyye, prokontrolirovannyye ultrazvukovym metodom v zone, ogranichennoy tolschinoy sheyki. Tehnicheskie usloviya.. Kharkov: UkrNIIMet, 1997. pp. 14.
6. Suchkov G.M. Teoriya i praktika elektromagnitno-akusticheskogo kontrolya. Chast 4. Eksperimentalnyie issledovaniya vozmozhnostey ultrazvukovogo kontrolya EMA sposobom: monografiya / G.M.Suchkov, O.N. Petrishev, S.M. Globa – H: Schedra sadiba plus, 2015 – 104 p.
7. Miguschenko R.P. Teoriya i praktika elektromagnitno-akusticheskogo kontrolya. Chast 5. Osobennosti konstruirovaniya i prakticheskogo primeneniya EMA ustroystv ultrazvukovogo kontrolya metalloizdeniy: monografiya / G.M. Suchkov, O.N. Petrishev, A.V. Desyatnichenko – Hkarkov: TOV «Planeta-print», 2016 – 230 p.
8. Suchkov G. M. Generator of Probing Pulses for EMA Flaw Detectors/ O. N. Petrishchev, I. V. Cherednichenko, V. V. Fedorov, A. V. Desyatnichenko, S. V. Khashchina, M. S. Maslova // Russian Journal of Nondestructive Testing (USA). – 2012. – Vol. 48. - No. 9. – pp. 537 – 540.
9. Suchkov G.M. Povyishenie vozmozhnostey beskontaktnoy defektoskopii poverhnosti katannyih ferromagnitnyih metalloizdeliy / G.M. Suchkov, O.N. Petrishev, A.V. Desyatnichenko i dr. // Kontrol. Diagnostika. – Moscow, 2013. – # 4 –pp. 31-35.
10. Suchkov G.M. Matematicheskoe modelirovanie protsessa registratsii ultrazvukovyih voln v stalnom metalloprokate preobrazovatelem elektromagnitnogo tipa. Chast 1 / G.M. Suchkov, M.I. Romanyuk, O.N. Petrishev i dr. // Elektronika i svyaz. Kiev: NTUU «KPI», 2012. – # 6. – pp. 94-108

Поступила (received) 05.06.2017

References (transliterated)

1. Ermolov I.N. Nerazrushayuschiy kontrol: Spravochnik: Vol.7. Pod red. V.V. Klyueva. T.3: Ultrazvukovoy kontrol / I.N. Ermolov, Yu.V. Lange. – Moscow: Mashinostroenie, 2004. – 864 p.
2. Ermolov I.N. Nerazrushayuschiy kontrol: prakt. posobie: v 5 kn., kn. 2. Akusticheskie metody kontrolya / I.N. Ermolov, N.P. Aleshin, A.I. Potapov; pod red. V.V. Suhorukova. – Moscow: Vysshaya shkola, 1991. – 283 p.

Ультразвуковий контроль хвилями Релея та Лемба металовиробів із викривленням поверхні / Плєснецов С. Ю., Мигущенко Р. П., Сучков Г. М., Петрищев О. Н., Мітін А. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 4 (1226). – С. 41–45. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-4525.

Ультразвуковой контроль волнами Релея и Лэмба металлоизделий с кривизной поверхности / Плєснецов С. Ю., Мигущенко Р. П., Сучков Г. М., Петрищев О. Н., Митин А. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 4 (1226). – С. 41–45. – Библиогр.: 10 назв. – ISSN 2079-4525.

Releigh and Lamb waves ultrasound analysis of metal products with curved surface / S. Yu. Plesnetsov, R. P. Myguschenko, G. M. Suchkov, O. N. Petrishev, A. V. Mitin // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tehnika. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 4 (1226). – P. 41–45. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-4525.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Плєснецов Сергій Юрійович – асистент кафедри «Прилади і методи неруйнівного контролю» Національного технічного університету «ХПІ», м. Харків. Тел +38(057)7076380, e-mail: rastrelly@gmail.com

Плєснецов Сергей Юрьевич – ассистент кафедры «Приборы и методы неразрушающего контроля» Национального технического университета «ХПИ», г. Харьков Тел +38(057)7076380, e-mail: rastrelly@gmail.com

Plesnetsov Sergey Yurievich – assistant of «Devices and methods of nondestructive control» department, National technical university “Kharkiv polytechnical institute”, Kharkiv. Phone +38(057)7076380, e-mail: rastrelly@gmail.com

Мигущенко Руслан Павлович – доктор технічних наук, проректор з науково-педагогічної роботи, доцент Національного технічного університету «ХПІ», м. Харків. Тел+38(057)706-32-13, e-mail: omsroot@kpi.kharkov.ua

Мигущенко Руслан Павлович – доктор технических наук, проректор по научно-педагогической работе, доцент Национального технического университета «ХПИ», г. Харьков. Тел. +38(057)706-32-13, e-mail: omsroot@kpi.kharkov.ua

Migushenko Ruslan Pavlovich – doctor of technical sciences, scientific and pedagogics prorektor, docent National technical university “Kharkiv polytechnical institute”, Kharkiv. Phone+38(057)706-32-13,e-mail: omsroot@kpi.kharkov.ua

Сучков Григорій Михайлович - доктор технічних наук, завідувач кафедри «Прилади і методи неруйнівного контролю» Національного технічного університету «ХПІ», м. Харків. Тел +38(057)7076380, e-mail: hpi.suchkov@gmail.com

Сучков Григорий Михайлович – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Приборы и методы неразрушающего контроля» Национального технического университета «ХПИ», г. Харьков. Тел +38(057)7076380, e-mail: hpi.suchkov@gmail.com

Suchkov Grigoriy Michailovich - doctor of technical sciences, chairman of “Devices and methods of nondestructive control» department, National technical university “Kharkiv polytechnical institute”, Kharkiv. Phone +38(057)7076380, e-mail: hpi.suchkov@gmail.com

Петрищев Олег Миколайович – доктор технічних наук, доцент кафедри «Акустика та акустоелектроніка» Національного технічного університету України «КПІ», м. Київ. Тел +38(044)4549072, e-mail: kafedra@aae.kpi.ua

Петрищев Олег Николаевич – доктор технических наук, доцент кафедры «Акустика и акустоэлектроника» Национального технического университета Украины «КПИ», г. Киев. Тел +38(044)4549072, e-mail: kafedra@aae.kpi.ua

Petryshev Oleg Nikolaevich – doctor of technical sciences, docent of “Acoustics and acoustoelectronics” department, National technical university of Ukraine “Kyiv polytechnical institute”, Kyiv. Phone +38(044)4549072, e-mail: kafedra@aae.kpi.ua

Юданова Нина Миколаївна – старший викладач кафедри «Прилади і методи неруйнівного контролю» Національного технічного університету «ХПІ», м. Харків. Тел+38(057)7076380, e-mail: yudanova@kpi.kharkov.ua

Юданова Нина Николаевна – старший преподаватель кафедры «Приборы и методы неразрушающего контроля» Национального технического университета «ХПИ», г. Харьков. Тел +38(057)7076380, e-mail: yudanova@kpi.kharkov.ua

Yudanova Nina Nikolaevna – senior educator of «Devices and methods of nondestructive control» department, National technical university “Kharkiv polytechnical institute”, Kharkiv. Phone +38(057)7076380, e-mail: yudanova@kpi.kharkov.ua

Мітін Олександр Володимирович – студент кафедри «Прилади і методи неруйнівного контролю» Національного НТУ «ХПІ», м. Харків. Тел +38(057)7076380, e-mail: khpi.ndt@gmail.com

Митин Александр Владимирович - студент кафедры «Приборы и методы неразрушающего контроля» НТУ «ХПИ», г. Харьков. Тел +38(057)7076380, e-mail: khpi.ndt@gmail.com

Mitin Alexander Vladimirovich - student of «Devices and methods of nondestructive control» department, National technical university “KPI”, Kharkiv. Phone +38(057)7076380, e-mail: khpi.ndt@gmail.com

Ю. О. СМОЛІН

ТЕСТОПРИДАТНІСТЬ КІНЦЕВИХ ВУЗЛІВ КОНТРОЛЮ В КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМАХ ДІАГНОСТИКИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

Розглянуто основні критерії кількісної оцінки тестуємості цифрових схем на етапі проектування. Показано, що кінцеві вузли пристроїв контролю і діагностики реалізуються за однією загальною структурною схемою. Обрано метод визначення якості тестування та запропоновано методику розрахунків кількісних показників тестопридатності цифрових схем вузлів контролю комп'ютерних систем діагностики технологічних параметрів. Наведено приклад цифрової комбінаційної схеми і результати її аналізу тестуємості за запропонованою методикою. Розглянуто шляхи підвищення показників тестопридатності в кінцевих вузлах контролю. Визначені переваги та недоліки пропонуємої методики.

Ключові слова: тестопридатність, керованість, спостережливість, контроль, діагностика, комп'ютерна система.

Рассмотрены основные критерии количественной оценки тестируемости цифровых схем на стадии проектирования. Показано, что конечные узлы устройств контроля и диагностики реализуются по одной общей структурной схеме. Выбран метод определения качества тестирования и предложена методика расчетов количественных показателей тестопригодности цифровых схем узлов контроля компьютерных систем диагностики технологических параметров. Приведен пример цифровой комбинационной схемы и результаты ее тестируемости по предложенной методике. Рассмотрены пути повышения тестопригодности в оконченных узлах контроля. Определены преимущества и недостатки предложенной методики.

Ключевые слова: тестопригодность, управляемость, наблюдаемость, контроль, диагностика, компьютерная система.

The analysis of ways to increase the level of reliability of the nodes of computer monitoring and diagnostic systems, as well as the causes of errors in these systems. The main basic criteria of a quantitative estimation of digital circuits testability at the design stage such as controllability, observability and testing ability are evaluated. The method of determining testing quality quantitative evaluation is selected and its milestones are highlighted. The method of control unit digital circuits quantity indicators calculation for computer systems of technical parameters diagnostics is proposed based off the upgraded version of CAMELOT system. It is shown that the final nodes of the monitoring and diagnostic devices are implemented according to one general structural scheme. A generalized block diagram of the end control node in systems of testing and diagnostics based on their features is given. An example of calculation logic element scheme, which is a part of the control unit, is given as well. The ways of testing ability increase in the end control nodes due to the introduction of additional hardware and additional control points are considered. The advantages and disadvantages of the proposed methodology are determined.

Keywords: testability, controllability, observability, control, diagnostics, computer system.

Вступ. Неухильне зростання складності цифрових вузлів комп'ютерних систем контролю і діагностики тягне за собою підвищення вимог до їх надійності. Досягнення високого рівня надійності, в цьому випадку, забезпечується рядом технічних, експлуатаційних та організаційних засобів. Серед їх багатовидів відокремлюють методи технічного діагностування, як окремих вузлів та пристроїв, так і систем в цілому. Одним із поширених різновидів діагностування цифрових блоків та вузлів комп'ютерних систем є тестове діагностування. Його використання на етапах проектування, виготовлення та експлуатації комп'ютерних систем контролю і діагностики дозволяє визначити, по-перше, їх стан, і по-друге, спрощує процеси пошуку їх несправностей, що призводить до покращення основних показників надійності системи контролю і діагностики.

Постановка проблеми. Разом із зростанням складності схем комп'ютерних систем контролю і діагностики, в силу обмежених можливостей існуючих методів обчислення і складання тестів та обмежень у їх реалізації, ймовірність виявлення несправностей зменшується. Це пояснюється також і тим, що основна вага тестування перепадає на ЗВІС і мікроконтролерні підсистеми, складність яких приводить до збільшення частки тимчасових несправностей, що виявляються тільки при роботі системи [1,2]. Крім того існує ще одна досить розповсюджена причина виникнення помилок. Вона

міститься в тому, що кожен етап проектування і виробництва комп'ютерних систем контролю характеризується коефіцієнтом виду придатних виробів B ($0 < B \leq 1$), а його проектування часткою виявлення дефектів, які називають повнотою перевірки P ($0 < P < 1$).

Частка дефектних виробів у загальному обсязі випуску для даного етапу виробництва (передбачається, що дефекти розподілені рівномірно і незалежні): $D = 1 - B^{(1-P)}$ [3].

Із за цього, що тести кожного етапу мають повноту перевірки $P < 1$, частина дефектів проходить на наступний етап перевірки і зрештою проникає на етап експлуатації.

Щоб зменшити вплив перелічених факторів на достеменність діагностування за допомогою комп'ютерних систем і підвищити надійність самих систем, необхідно при проектуванні системи контролю і діагностики вміти кількісно оцінювати можливості підвищення повноти їх перевірки і скорочування трудомісткості тестування.

Мета роботи. Обрати метод визначення кількісних показників якості тестування цифрових схем і на його основі розробити методику розрахунків тестопридатності цифрових вузлів контролю – кінцевих вузлів комп'ютерних систем контролю і діагностики.

Основна частина. Тестопридатність схем закладається на етапі їх проектування.

Тестопридатними називаються схеми з функціонально надлишковими додатковими засобами, що призначені для підвищення перевірки і зменшення трудомісткості тестування. Тестопридатність досягається або структурною модифікацією початкових схем, або введенням додаткової апаратури і ліній керування, що спрощує процес перевірки і підвищує повноту перевірки [3]. Тобто існує два методи проектування тестопридатних схем: аналіз структурно-функціонального виконання вузла, числова оцінка керованості та спостережуваності як міри тестопридатності схеми; структурне проектування тестопридатних схем, на межі бажання самотестуємих, заснованих на використанні властивостей скануемого шляху, що забезпечує доступ до внутрішніх точок схеми [4].

Для підвищення тестопридатності вузлів контролю комп'ютерних системі діагностики, перший метод є більш переважним, по-перше, за рахунок простоти метода при аналізі послідовних схем, тому що відсутня необхідність розв'язувати систему лінійних рівнянь. По-друге, тому що структура кінцевого вузла контролю, як це показано нижче на рисунку 1, є для всіх систем контролю і діагностики загальною і незмінною.

Тому для підвищення тестопридатності досліджуваних вузлів слід використовувати перший метод. Одним із найпоширеніших систем аналізу тестування за цим методом є система CAMELOT [5], яка постійно удосконалюється і доповнюється [4,6].

Метод, що пропонується, є ймовірним методом, який дозволяє здійснювати оцінку тестопридатності шляхом топологічного аналізу схеми вентильного рівня або рівня регістрових передач. За цим методом значення тестопридатності можна обчислити для кожного вузла схеми. При цьому під вузлом розуміються еквівалентні лінії схеми. Показники, що обчислюються, призначені для порівняльного аналізу тестопридатності вузлів розглянутої схеми. Метод складається з трьох етапів: обчислення показників керованості, спостережуваності та тестопридатності [3,6].

Розглянемо два перші показники тестування: керованість і спостереженість.

Керованість C – кількісна міра здібності схеми установлювати на лінії, що розглядається, значення $0 (C^0)$ або значення $1 (C^1)$. Вона характеризує відносну складність установки на лінії потрібного стану, шляхом подачі на схему послідовності вхідних наборів і залежить від логічної функції вентиль та зменшується в залежності від віддалення лінії від зовнішніх входів схеми. Керованість може приймати відносні значення, що знаходяться в інтервалі $[0;1]$.

$C=1$ в тому разі, коли маємо зовнішній вхід схеми, через який можна встановити логічний «0» та «1». $C=0$ в тому разі, коли маємо лінію, яку не можна встановити ні в один з логічних станів. Тому практичні завдання керованості більшості ліній лежать в межах інтервалу $[0,1]$.

Для n -входового вентиль «АБО», що має входи $X_1 \dots X_n$ і вхід Y , керованість визначається як [6]:

$$C^0(Y) = 1 - C^1(Y); \quad (1)$$

$$C^1(Y) = 1 - \prod_{i=1}^n C^1(X_i). \quad (2)$$

Для n -входового вентиль «І»:

$$C^1(Y) = 1 - C^0(Y); \quad (3)$$

$$C^0(Y) = 1 - \prod_{i=1}^n C^0(X_i). \quad (4)$$

Для інвертора «НІ»:

$$C^0(Y) = C^1(X); \quad (5)$$

$$C^1(Y) = C^0(X). \quad (6)$$

Значення $C^0(X_i)$ і $C^1(X_i)$ у виразах (1)÷(6) обираються згідно таблиці істинності елемента.

В загальному випадку керованість n -входової комбінаційної схеми визначається за виразом [5]

$$C = C_t \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i, \quad (7)$$

де C_i – відповідно керованість вихідного і вхідного полюсів схеми; C_t – міра, що визначає ступень складності формування значень 0 і 1 на виході схеми для випадку, коли $C_i = 1, i=1$.

$$C_t = 1 - \left| \frac{F(0) - F(1)}{F(0) + F(1)} \right|, \quad (8)$$

де $F(0), F(1)$ відповідно загальне число нульових і одиничних значень функції $Y(X_1, X_2, \dots, X_n)$, що реалізуються комбінаційною схемою.

Спостережуваність O – кількісна міра здібності схеми транспортувати стан лінії, що розглядається, на зовнішні виходи схем. Вона характеризує відносну складність проштотування сигналу в лінії на вихід схеми. Спостережуваність може приймати відносні значення, що знаходяться в інтервалі $[0;1]$.

$O=1$ для зовнішнього входу.

$O=0$, якщо неможливо забезпечити такі умови, при яких зміна значення в узлі приводила би до зміни значення на первинному виході. Практичні значення спостережуваності більшості ліній лежать в межах інтервалу $[0;1]$. Спостережуваність вузлів в схемі зменшуються від первинних виходів.

Спостережуваність несправності на вході схеми в загальному вигляді обчислюється згідно залежності [5]

$$O = O_i O_t C_{tm}, \quad (9)$$

де O_i – спостережуваність несправності в точці її виникнення i ; O_t – міра складності транспортування несправності від точки її виникнення до виходу схеми;

C_{tn} – інтегральна оцінка керованості входів схеми, що забезпечують умову транспортування несправності до виходу.

$$O_i = \frac{P_1}{P_1 + P_2}, \quad (10)$$

де P_1 і P_2 загальне число активних і неактивних шляхів схеми.

$$C_{tn} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i, \quad (11)$$

де C_i – керованість i -того входного полюса; n – загальна їх кількість.

Тестопридатність T є функцією керованості та спостережуваності $T=f(C, O)$ і для визначеного полюса тестопридатність в загальному випадку визначається як

$$T = CO. \quad (12)$$

Для цифрової схеми в цілому вона визначається як

$$T_c = \frac{\sum_{k=1}^K T_k}{K}, \quad (13)$$

де T_k – тестопридатність k -того полюса цифрової схеми; K – загальна кількість полюсів.

Якщо застосувати розглянутий метод аналізу тестопридатності до визначення тестопридатності цифрових схем кінцевих вузлів контролю в комп'ютерних системах діагностики технологічних параметрів, то необхідно урахувати особливості цих схем. Незважаючи на те, щомета контролю і діагностики різна, тобто при контролі визначається відповідність поточних станів об'єктів нормам, а при діагностиці – місця і причини несправностей об'єкта, самі процеси контролю і діагностики мають загальну методологічну основу: в кожному з них здійснюється порівняння величин, що характеризують досліджуємі об'єкти, із зразковими величинами та аналіз результатів порівняння [7,8]. Тому до складу і комп'ютерних систем контролю і комп'ютерних систем діагностики обов'язково надходять кінцеві цифрові вузли контролю на вихід який подаються в цифровій формі величини, що вимірюються і величини верхньої і нижньої межі норми. Результати порівняння у вигляді 0 або 1 (виходить за межу чи не виходить) надходять до схеми збігу, на виході якої і отримують кінцевий результат контролю (норма, не норма) у вигляді 1 або 0. В загальному виді схему, що реалізує процедуру контролю можна представити у вигляді, як це показано на рисунку 1.

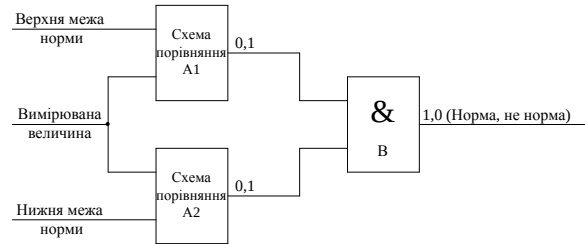


Рис. 1 – Загальна структурна схема кінцевого вузла контролю

Для проектування тестопридатних принципових схем, що реалізують таку структурну схему необхідно вміти кількісно оцінювати її тестопридатність і виявляти місця де помилки, збої та несправності призводять до найбільших похибок.

Розглянемо, в якості прикладу, найпростішу цифрову комбінаційну схему (рисунок 2), яка частково реалізує структуру наведену на рисунку 1.

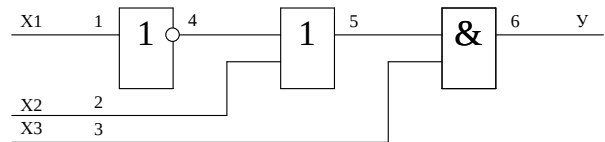


Рис. 2 – Цифрова схема, що надходить до складу вузла контролю

До складу такої схеми надходять найбільш поширені логічні елементи, три входи, вихідна схема збігу і шість полюсів, кожен з котрих, як і схему в цілому, можна оцінити кількісними характеристиками тестуємості. Їх розрахунки слід проводити в такій послідовності:

1) на підставі таблиці істинності логічних елементів визначити загальне число нульових $F(0)$ і одиничних $F(1)$ значень кожної функції, що реалізують логічні елементи. Так для функції «НІ» $F(0)=F(1)=1$; для функції «АБО» $F(0)=1$, $F(1)=3$; для функції «І» $F(0)=3$, $F(1)=1$.

2) за виразом (8) визначити міру складності формування значень 0 та 1. Для елемента «НІ» $C_f=1$, для елемента «АБО» $C_f=0,5$ і для елемента «І» $C_f=0,5$.

3) визначити полюса схеми. В даному випадку їх шість;

4) за виразами (1)÷(6) визначити керованість для кожного полюса;

5) на основі отриманих даних і виразу (10) визначити спостережуваність для кожного полюса;

6) за виразом (12) визначити тестопридатність кожного полюса;

7) за виразами (9) і (11) визначити спостережуваність і керованість, відповідно, для всієї схеми;

8) за виразом (13) визначити тестопридатність для цифрової схеми в цілому.

Результати аналізу тестуємості цифрової схеми, наведеної на рисунку 2, запропонують методикою, приведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати аналізу тестування

Поліус цифрової схеми	Керованість полюса	Спостережливість полюса	Тестопридатність полюса	Тестопридатність схеми
k	C_k	O_k	T_k	T_c
1	1	0,25	0,25	0,35
2	1	0,25	0,25	
3	1	0,75	0,75	
4	1	0,25	0,25	
5	0,5	0,5	0,25	
6	0,375	1	0,375	

Покращити тестуємість будь-якої цифрової схеми можна шляхом введення додаткових схем і контрольних точок [3,6].

Розглянемо, як це можна зробити для цифрових схем вузлів контролю, побудованих за структурою наведеною на рисунку 1. В якості прикладу розглянемо випадок, коли на виході схеми порівняння A1 істинне значення повинне дорівнювати 0, а на виході схеми порівняння A2 – 1, як це відображено на рисунку 3. Тоді 0-керованість (C^0) усього вузла, а конкретніше його схеми збігу В, можна покращити шляхом введення схеми «І» між вузлами A1 та В. Таким же чином можна покращити 1-керованість (C^1) вузла, шляхом введення схеми «АБО» між вузлами A2 та В.

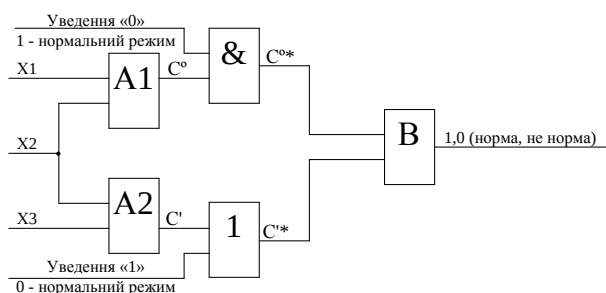


Рис. 3 – Схема вузла контролю з покращеною керованістю

Для покращення спостережуваності схеми збігу В, і отже всього вузла контролю, можна ввести контрольні точки K1 і K2, як це показано на рисунку 4.

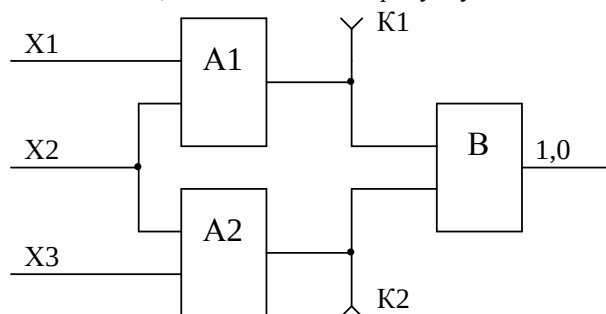


Рис. 4 – Схема вузла контролю з покращеною спостережуваністю

Висновки. Обраний метод визначення якості тестування та пропонуємої методу розрахунків показників тестопридатності можна застосувати при

проектуванні цифрових схем кінцевих вузлів контролю комп'ютерних систем контролю і діагностики. Це дозволяє проводити аналіз на самих ранніх стадіях розробки таких вузлів і знижати кількість дефектів як при імплементації їх в кристал, так і при реалізації їх на ІС.

Достоїнством пропонуємих рішень – є простота при аналізі та синтезі цифрових схем контролю, та відсутність необхідності розв'язувати систему лінійних рівнянь в разі наявності послідовних схем у вузлах контролю. Недоліком є введення додаткових апаратних засобів.

Список літератури

1. Городецкий А. Аспекты тестопригодности в файлах BSDL/A. Городецкий // Компоненты и технологии. – 2009. - №9. – С.13- 15.
2. Руис Р. Создание тестопригодных схем при проектировании SoC/ Р.Руис // Электроника – 2012. - №3(00117). -С. 130-133.
3. Каган Б.М. Основы эксплуатации ЭВМ [Текст] / Б.М. Каган, М.Б.Мкртумян. – М.: Энергоатомиздат, 1988. 432с.
4. Каминская М.А. Повышение качества теста на основе метода анализа тестопригодности устройства на различных уровнях описания / М.А. Каминская, С.А. Зайченко // Радиоэлектроника и компьютерные системы. – 2007.-№7(26).-С.140-146.
5. Ярмолик В.Н. Контроль и диагностика цифровых узлов ЭВМ [Текст] / В.Н.Ярмолик. – Мн.: Наука и техника, 1988. -240с.
6. Кулак Э.Н. Анализ тестопригодности цифровых схем на уровне регистровых передач / Э.Н. Кулак, М.А. Каминская, О.Б. Скворцова // Вестник НТУ «ХПИ»: сб. научн. тр. Темат. Вып.: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ «ХПИ» - 2006. - №23. – С.102-108
7. Цапенко М.П. Измерительные информационные системы [Текст] / М.П. Цапенко. – М.: Энергоатомиздат, 1985. -439с.
8. Бобычевцев А.Д. Элементы общей теории технического контроля [Текст]: монография / А.Д. Бобычевцев, Л.А. Бобычевцева. – Курск: гос. техн. ун-т, 2010.-212с.

References (transliterated)

1. Gorodetsky A. Aspects of testability in BSDL files / A. Gorodetsky// Components and technologies. - 2009. - No. 9. - pp.13-15.
2. Ruiz R. Creation of test-accompanying circuits for the design of the SoC / R. Ruis // Electronics - 2012. -No.3 (00117). -FROM. -pp. 130-133.
3. Kagan B.M. The basis of computer operation [Text] / B.M. Kagan, M.B. Mkrumyan. - M. Energoatomizdat, 1988. 432p.
4. Kaminskaya M.A. Improvement of the quality of the test on the basis of the method of analyzing the testability of the device under various conditions of description / M.A. Kalinskaya, S.A. Zaychenko// Radioelectronics and computer systems. - 2007.No. 7 (26).pp.140-146.

5. Yarmolik V.N. Control and diagnostics of digital computer units [Text] / V.N Yarmolik. - Minsk.: Science and Technology, 1988. - 240p.
6. Kulak E.N. Analysis of testability of digital circuits at the register transfer level / E.N. Kulak, M.A. Kalinskaya, O.B. Skvortsova // Vesnie NTU "KhPI": Sat. Scientific. Tr. Subject. Accomp. .: Informatics and modeling. Accomp. .: Informatics and modeling. - Kharkov: NTU "KhPI" - 2006. - No23. - pp.102 -108.
7. Tsapenko M.P. Measuring information systems [Text] / M.P.Tsapenko. - M.: Energoatomizdat, 1985. -439p.
8. Bolichevtsev A.D. Elements of the general theory of technical control [Text]: monograph / A.D. Bolichevtsev, L.A. Bolichevtseva. - Kursk: zoc Tech. Un-t, 2010.212. p

Надійшла (received) 30.05.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Тестопридатність кінцевих вузлів контролю в комп'ютерних системах діагностики технологічних параметрів / Смолін Ю. А. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 4 (1226). – С. 46–50. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-4525.

Тестопригодность конечных узлов контроля в компьютерных системах диагностики технологических параметров / Смолин Ю.А. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика і преобразовательна техніка. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 4 (1226). – С. 46–50. – Библиогр.: 8 назв. – ISSN 2079-4525.

Testability of final control nodes in computer systems for diagnostics of technological parameters / Yu.A.Smolyn // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tehnika. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No. 4 (1226). – P. 46–50. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2079-4525.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Смолін Ю. А. – кандидат технічних наук, національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики; тел (067)4583735; e-mail: uas8735@gmail.com

Смолин Ю. А. - кандидат технических наук, национальный университет «Харковский политехнический институт», доцент кафедры компьютерных и радиоэлектрических систем контроля и диагностики; тел (067) 4583735; e-mail: uas8735@gmail.com

Smolin Y.A. - Candidate of Technical Sciences, National Technical University "Kharkiv Polytechnical Institute", Associate Professor of the Computer Systems and Radiotechnical Systems of Control and Diagnostics; Bodies (067) 4583735; E-mail: uas8735@gmail.com

Н. М. ЗАЩЕПКИНА, О. А. НАКОНЕЧНИЙ

ВИБІР ЕКСПРЕС МЕТОДИК АНАЛІЗУ КІЛЬКІСНИХ ТА ЯКІСНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОДУКТІВ ХАРЧУВАННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ УФ-ВИПРОМІНЮВАННЯ

Проаналізовано існуючі в даний час інструментальні методи діагностики інформативних параметрів органічних речовин, визначено їх переваги та недоліки. Проведено вибір методів та засобів аналізу органічних речовин, що мають найкращі показники по відношенню затрати/отриманий результат, та відповідають вимогам експрес діагностики, а саме – УФ-спектрофотометрія та люмінесцентна флуориметрія. Обґрунтовано доцільність використання засобів об'єктивного контролю, – телевізійних інформаційно-вимірювальних систем (ТІВС), в процесі визначення параметрів продуктів харчування, та діагностики змін в їх кількісному та якісному складі із застосуванням люмінесцентних методів аналізу.

Ключові слова: телевізійні інформаційно-вимірювальні системи, люмінесценція, продукти харчування, об'єктивний контроль, спектральна яскравість, експрес-метод, пороговий контраст, УФ-спектрофотометрія, люмінесцентна флуориметрія.

Проанализированы существующие в настоящее время инструментальные методы диагностики информативных параметров органических веществ, определены их преимущества и недостатки. Проведен выбор методов и средств анализа органических веществ, имеющих лучшие показатели по отношению затраты/полученный результат, и соответствуют требованиям экспресс диагностики, а именно – УФ-спектрофотометрия и люминесцентная флуориметрия. Обоснована целесообразность использования средств объективного контроля, – телевизионных информационно-измерительных систем (ТИИС), в процессе определения параметров продуктов питания, и диагностики изменений в их количественном и качественном составе с применением люминесцентных методов анализа.

Ключевые слова: телевизионные информационно-измерительные системы, люминесценция, продукты питания, объективный контроль, спектральная яркость, экспресс-метод, пороговый контраст, УФ-спектрофотометрия, люминесцентная флуориметрия.

The article considers review and description of existent presently chemical, physical and combined methods diagnostics of informing parameters of organic substances, determination of their advantages and defects. The choice of methods and facilities of analysis of organic substances that have the best indexes on the relation of expense/result is conducted, and answer requirements express of diagnostics, with providing of sufficient sensitiveness, selectivity, and exactness of measuring. Choice of requirements and technical aspects of application of photometric methods of analysis of organic substances with application of electromagnetic waves of different length, namely – UV-spectrophotometry and fluorescent photometry, as methods that allow to conduct complex diagnostics of foods and fully answer requirements express of analysis. The expediency of use of objective control - television information and measurement systems (TIMS) in the process of determining the parameters of foods, and diagnostics changes in their quantitative and qualitative composition during using fluorescent methods of analysis.

Keywords television information and measurement systems, luminescence, food, objective control, spectral brightness, express method, threshold contrast, UV-spectrophotometry and fluorescent photometry.

Вступ. Контроль інформативних параметрів органічних речовин (до яких відносяться усі без винятку продукти харчування), як природного так і штучного походження, включає три основні етапи: ідентифікація («випробування на справжність») – визначення сортової та видової приналежності досліджуваного зразка, якісний (визначення наявності певної компоненти) та кількісний (концентрація досліджуваної речовини у зразку) аналіз. Процедура контролю здійснюється на усіх етапах переробки і виробництва, та в процесі транспортування і подальшого зберігання придатного до споживання продукту харчування. Внаслідок наявності широкого спектру харчових продуктів як за хімічною природою, так і вимогами до чутливості, правильності, відтворюваності, тривалості методів їх аналізу, застосування тих чи інших методів та засобів визначення кількісних і якісних параметрів харчових продуктів можуть істотно відрізнятися. Ось чому в процесі контролю харчових продуктів використовують як хімічні, так і фізико-хімічні методи, переваги яких загальновідомі. Фізико-хімічні методи все ширше впроваджуються в фундаментальні дослідження органічних речовин і в практику якісного та кількісного аналізу.

Більшість хімічних та фізико-хімічних методик оперативного контролю кількісних і якісних параметрів органічних речовин дозволяє досить точно виявляти наявність та концентрацію включень різної

природи у досліджуваному зразку (молекул, бактерій, надмолекулярних структур), навіть при їх абсолютній концентрації порядку 10^{-6} – 10^{-9} г/г [7].

Однак ці дані про мінімальні концентрації відносяться до речовин що знаходяться в чистому фізіологічному розчині. Для використання цих методів необхідно проводити відбір і очищення проб, що ускладнює їх застосування на практиці. Іншим фактором, що перешкоджає використанню більшості методик в промисловості та побуті, є контактність вимірювань, що призводить до зміни кількісних та якісних параметрів досліджуваного зразка, і відповідно неможливості проведення на ньому широкої серії різнопланових вимірювань.

У даний час найбільш доступними експрес методами для визначення інформативних параметрів органічних речовин є фотометричні методи, зокрема УФ-спектрофотометрія та люмінесцентна флуориметрія, які досліджують взаємодію речовини з електромагнітним випромінюванням в певному інтервалі довжин хвиль та появу внаслідок цього характерного відгуку [11].

Локалізація задачі дослідження. На підставі аналізу існуючих в даний час інструментальних методів та засобів дослідження складу і властивостей органічних речовин можна дійти висновку, що у більшості випадків вони ґрунтуються на застосуванні фізичних, хімічних, біохімічних та інших ефектів контактної взаємодії досліджуваного об'єкту з вимі-

речовинними засобами. У багатьох випадках визначення інформативних параметрів органічних речовин, потребує досить тривалої і затратної пробопідготовки (подрібнення, висушування, формування гелів, золів та суспензій, внесення реагентів та хімічних маркерів та ін.), особливо при визначенні їх якісного складу, та не може в повній мірі відповідати вимогам експрес діагностики. В той же час, до приладів, що використовуються для контролю якості харчових продуктів, пред'являються досить серйозні вимоги по стандартизації та сертифікації [9].

Метою даної статті є вибір і наукове обґрунтування ефективності застосування експрес методик визначення характеристик органічних речовин (а саме – харчових продуктів) із використанням фотометричних методів діагностики.

Для досягнення поставленої мети було сформульовано та вирішено наступні задачі:

- огляд та характеристика існуючих в даний час хімічних, фізичних та фізико-хімічних методів діагностики інформативних параметрів органічних речовин, визначення їх переваг та недоліків;

- проведено вибір методів та засобів аналізу органічних речовин, що мають найкращі показники по відношенню затрати/отриманий результат, та відповідають вимогам експрес діагностики, із забезпеченням достатньої чутливості, селективності, та точності вимірів;

- аналіз вимог та технічних аспектів застосування фотометричних методів аналізу органічних речовин із застосуванням електромагнітного випромінювання різної довжини хвиль, а саме – УФ-спектрофотометрії та люмінесцентної флуориметрії, як методів, що дозволяють проводити комплексну діагностику харчових продуктів та повністю відповідають вимогам експрес аналізу.

Результати розробки та досліджень.

На підставі отриманих даних, зроблено висновок, що найбільш ефективним по відношенню затрати/результат, при визначенні характеристик органічних речовин, є застосування оптичних методів експрес аналізу (в лабораторних та виробничих умовах), з яких найбільш перспективними є саме люмінесцентні методи.

Дані методи застосовують для кількісного визначення органічних сполук, вітамінів, білків, нітратів, сульфідів, ціанідів, токсичних металів у складі харчових продуктів (а саме – у молоці, м'ясі та рибі), для діагностики псування овочів, плодів і виявлення в продуктах консервантів, лікарських препаратів, канцерогенних речовин та ін.

Люмінесцентний аналіз знайшов застосування в різних областях науки і техніки. Такий аналіз здійснюється, в основному, за допомогою візуальних спостережень (або із застосуванням телеметричних засобів). У випадку кількісного визначення компонентів харчових продуктів використовуються методи флуоресценції, які включають в себе різні операції з розділення, очищення складових, обробки продукту флуорохромами, та ін. Абсолютна чутливість люмінесцентного методу досить висока. Відносна концен-

трація речовини також може бути дуже малою, для яскраво люмінесціюючих речовин вона становить величину порядку 10^{-10} г/г [10].

Усі органічні речовини неоднаково поглинають світло різних довжин хвиль. Зазвичай спектри поглинання молекул мають безперервний характер, але виявляють максимуми на тій довжині хвилі світла, де є максимальне поглинання його квантів. Вивчення спектрів поглинання і випромінювання будь-яких біологічних об'єктів, до яких відносяться і продукти харчування, дозволяє з'ясувати, яка речовина відповідає за процес поглинання і випромінювання світла. Крім цього, по розміщенню максимумів на шкалі довжин хвиль, можна визначити довжину хвилі світла, що переважно поглинається цією речовиною.

У загальному випадку, люмінесценцією називається світіння атомів, молекул, іонів та інших більш складних комплексів, що виникає в результаті електронного переходу в цих частинках при їх поверненні із збудженого стану – в стабільний. Схематично цей процес можна представити у вигляді діаграми А. Яблонського [5].

Так як частина збереженої при поглинанні світла енергії переходить в тепло, то енергія кванта люмінесценції завжди буде менше енергії поглиненого кванта. Вона буде менше на величину розтраченої в тепло енергії $E_{\text{тепл.}}$ [5].

$$h\nu_{\text{люм.}} = h\nu_{\text{погл.}} - E_{\text{тепл.}}, \quad (1)$$

де $\nu_{\text{люм.}}$ – частота світла, що випромінюється при люмінесценції.

Отже, світло що випромінюється, матиме меншу частоту і більшу довжину хвилі, ніж поглинене світло. Ця залежність носить назву закону Стокса: довжина хвилі, світла, що випускається при люмінесценції, завжди більше довжини хвилі світла, який її викликав: $\lambda_{\text{люм.}} > \lambda_{\text{погл.}}$ [15].

Інтенсивність люмінесценції оцінюється за допомогою квантового виходу. Під квантовим виходом люмінесценції ϕ розуміється відношення кількості квантів люмінесценції n – до кількості отриманих квантів N [19]:

$$\phi = n/N. \quad (2)$$

Речовини, здатні випромінювати люмінесценцію називаються люмінофорами. Найбільшого поширення на практиці отримала фотолюмінесценція – явище, при якому світіння виникає під дією кванта світла. Даний вид люмінесценції є найбільш придатним на практиці, так як є можливість контролювати умови проведення аналізу шляхом варіювання довжин хвиль збудження. Вибираючи певну довжину хвилі збуджуючого світла, можна підвести енергію до певного компоненту хімічної системи і позбутися, таким чином, від ускладнень, можливих в разі поглинання енергії всією системою [16].

При кімнатній температурі більшість молекул знаходиться на найнижчому коливальному рівні основного електронного стану. При дії на молекулу збуджуючого випромінювання, вона переходить на верхній коливальний рівень будь-якого збудженого

стану, однак, процес випромінювання надлишку енергії завжди відбувається з нижнього рівня першого збудженого стану і тому форма спектра люмінесценції не залежить від довжини хвилі збуджуючого світла. Це явище відоме як правило Вавілова М. І. [5, 14].

Існує кілька типів електронних переходів. Кожному типу електронного переходу відповідає положення смуги в спектрі [6].

Перехід $\sigma \rightarrow \sigma^*$ характерний для сполук з насиченими вуглець-вуглецевими зв'язками (алкани, циклоалкани). Для здійснення цього переходу потрібна найбільша енергія.

Значно меншою енергії вимагають $\pi \rightarrow \pi^*$ переходи, які характерні для ненасичених сполук. Інтенсивність смуг цього електронного переходу максимальна.

Перехід $\pi^* \rightarrow \pi^*$ характерний для кисень-, азот-, сірко- і галогеновмісних з'єднань, в ближній УФ області (~200–250 нм).

Перехід $\pi \rightarrow \sigma^*$ є забороненим, тому його інтенсивність завжди мала (характерний для карбонільних сполук).

Довжина хвилі, на якій відбувається поглинання світла речовиною та інтенсивність характеристичного випромінювання, залежить від наявності в органічній речовині відповідних типів зв'язків і від їх відносної кількості (порівняно до загального об'єму речовини що приймає участь у поглинанні квантів світла) [12].

Групи атомів, що викликають поглинання в УФ і видимій областях спектра отримали назву хромофорних; вони містять кратні зв'язки або атом з вільною парою електронів (C=O, NO, N=NH). Крім хромофорних груп, в протіканні люмінесценції беруть участі аукохромні групи – це функціональні групи, які не мають власного поглинання, проте їх введення в речовину з хромофорними групами може посилювати сигнал або приводити до зсуву сигналу вздовж осі довжин хвиль (ОН, -NH₂, -SH і ін.) [1, 5].

Люмінесцентні методи аналізу включають в себе дослідження з використанням флуоресценції (флуориметрія) і фосфоресценції (фосфориметрія).

В аналітичних цілях люмінесцентний аналіз застосовується для ідентифікації речовин, для виявлення малих концентрацій речовин, для контролю змін, що зазнають речовини, для визначення ступеня чистоти речовин [20]. Висока чутливість методу дозволяє фіксувати малу ступінь перетворення речовин, а іноді по люмінесценції проміжних сполук стає можливим встановити механізм хімічної реакції.

Відомо, що інтенсивність флуоресценції біологічних об'єктів незначна через малу величину квантових виходів і низьку концентрацію флуоресціюючих компонентів. Щоб це компенсувати, потрібне збільшення чутливості вимірювальної апаратури, ретельне фокусування світла, вибір оптимальних умов реєстрації флуоресценції, що дозволяють виключити вплив можливих домішок, вібрації оптики і «засвітків» внаслідок дії сторонніх джерел світла [4].

Завдання якісного аналізу ускладнюється, коли суміш складається з декількох люмінесціюючих речовин; в цьому випадку застосовують світлофільтри або

поєднання люмінесцентного аналізу з хроматографічним. Найбільш інформативні методи аналізу засновані на спектральному розкладанні світла люмінесценції і вивченні спектральних характеристик люмінесценції спектрофотометричним методом.

Кількісний люмінесцентний аналіз заснований на залежності між інтенсивністю люмінесценції і концентрацією аналізованої речовини, тобто на пропорційності інтенсивності люмінесценції кількості поглинаючих і випромінюючих центрів і частці поглиненого світла. Флуометричні вимірювання виконуються як візуально, так і за допомогою апаратурних методів реєстрації викликаного випромінювання [2].

Найбільш широко люмінесцентні вимірювання використовуються як методи аналізу швидко протікаючих хімічних реакцій, а також для кінетичних досліджень реакцій електронно-збуджених молекул. [3]. Особливу роль цей метод грає в дослідженні харчових продуктів. Відомо, що всі харчові продукти, як природного так і синтетичного походження, містять в своєму складі компоненти, здатні до флуоресценції в різних областях. В УФ області – це білки і нуклеїнові кислоти, в видимій області – цукри, природні та штучні барвники, в ближній ІЧ області – компоненти целюлозно-пектинової оболонки, ліпідні комплекси [8].

В той же час, головною проблемою більшості люмінесцентних методів аналізу органічних речовин (як і більшості фотометричних методів загалом) є залежність їх результатів від суб'єктивної оцінки спостерігачем процесу аналізу. Для вирішення даної проблеми доцільно використовувати засоби об'єктивного контролю, серед яких найбільш ефективними виявляються телевізійні інформаційно-вимірювальні системи (ТІВС).

Методики застосування ТІВС полягають в формуванні зображення, яке відображає об'єкт з певними лінійними розмірами, або діагностує в досліджуваному об'єкті зони, що відрізняються своїми оптичними характеристиками. Спектральний діапазон, в якому зазвичай проводяться вимірювання становить 0,3–0,8 мкм, що досить точно відповідає можливому діапазону довжин хвиль вимушеного випромінювання при збудженні люмінесценції УФ-випромінюванням [18].

Особливістю даного методу контролю, є можливість реєстрації ділянок на поверхні досліджуваного зразка з певними геометричними розмірами, які складаються з точок, що мають різну спектральну яскравість $L_\lambda(x,y)$, тобто, випромінюють світловий потік у певному діапазоні довжин хвиль [17]:

$$L_\lambda(x,y) = \rho_\lambda(x,y) \cdot E_\lambda(x,y), \quad (3)$$

де $\rho_\lambda(x,y)$ – спектральний коефіцієнт відбиття поверхні;

$E_\lambda(x,y)$ – освітленість поверхні зразка;

x, y – відповідні координати точок на поверхні досліджуваного об'єкту.

Таким чином, можна із заданою роздільною здатністю виділити ділянки що мають різні значення спектральної яскравості і використовувати явище

порогового контрасту (K_{Π}) визначити їх відносний чи абсолютний геометричний розмір.

В системах формування зображення елементом, який визначає пороговий рівень сигналу що формується на основі відгуків від ділянок із різною спектральною яскравістю, як правило, є світло електричний перетворювач (СЕР). Для кількісної оцінки даного показника необхідно ввести поняття вхідного контрасту (K_{BX}), що характеризує відносний рівень освітленості довільних ділянок певних геометричних розмірів [17]:

$$K_{BX} = (E_{max} - E_{min}) / (E_{max} + E_{min}), \quad (4)$$

де E_{max} і E_{min} – відповідно максимальне і мінімальне значення освітленості точок на поверхні досліджуваного зразка що формують певні ділянки з однаковою середньою спектральною яскравістю.

Враховуючи, що пороговий контраст визначається для заданого значення ймовірності реєстрації сигналу з врахуванням вхідного контрасту, (K_{BX}) та показника ступеня нелінійності робочої ділянки світлосигнальної характеристики СЕР – $\gamma(E)$, можна вважати, що [17]:

$$K_{BX} \cdot \gamma(E) \cdot q(E) \cdot K_{\Pi} = q_{\Pi}, \quad (5)$$

де $q(E)$ та q_{Π} – відповідно відношення сигнал/шум при освітленості E , та порогове;

Для кількісних оцінок порогового контрасту в реальних виробничих або лабораторних умовах можливе використання виразу [17]:

$$K_{\Pi} = (q_{\Pi}(P)) / (K_{BX} \cdot \gamma(E) \cdot q(E)), \quad (6)$$

де K_{BX} – вхідний контраст;

$q(E)$ та $q_{\Pi}(P)$ – відповідно відношення сигнал/шум при освітленості E та порогове, при якому забезпечується задана ймовірність при реєстрації сигналу P ;

$\gamma(E)$ – показник ступеня нелінійності робочої ділянки світлосигнальної характеристики СЕР.

Якщо СЕР працює в діапазоні лінійності, то $\gamma(E)=1$, тоді значення порогового контрасту можна визначити за формулою [17]:

$$K_{\Pi} = (q_{\Pi}(P)) / (K_{BX} \cdot q(E)) \quad (7)$$

В окремих випадках такий підхід не приводить до значних похибок, але пороговий контраст у вихідному різницевого зображенні може залежати від просторової частоти. В той же час літературні джерела, де використовуються просторово-частотний підхід до визначення найменшої роздільної здатності світло-електричного перетворювача, не враховують особливості формування порогового контрасту та умов проведення вимірів [17].

Враховуючи залежність спектральної яскравості L_{λ} від довжини хвилі збуджуючого світла, можна досить точно діагностувати просторове розміщення на поверхні тонких зрізів (субміліметрової товщини) зразків продуктів харчування включень певної природи, що відрізняються спектрами поглинання та вимушеного випромінювання при дії УФ-випромінювання. Це дозволяє визначити природу даних

компонентів та вирахувати їх абсолютні і відносні концентрації в зразках. Подібна методика може бути застосована і при роботі з подрібненими продуктами харчування у вигляді гелів, золів суспензій та емульсій розміщених субміліметровим шаром на скляній пластинці.

До того, ж дані вимірювання можуть проводитися із значно меншими затратами часу, людських та виробничих ресурсів, та повністю відповідають умовам експрес-діагностики. Також, у випадку застосування комплексних автоматизованих інформаційно-вимірювальних систем, що містять засоби об'єктивного контролю, є можливим розробка та впровадження технологічних карт для дослідження параметрів певних груп продуктів харчування, що дозволить автоматизувати процес вимірювань та надасть можливість проводити процес вимірювань користувачами без спеціальної технічної підготовки, що є економічно доцільним.

Висновки. Таким чином, можна дійти висновку, що ТІВС, як засіб об'єктивного контролю у поєднанні з УФ-спектрофотометрією та люмінесцентною флуориметрією мають досить цікаві перспективи для застосування в експрес-діагностиці органічних речовин, а саме – природних та синтетичних продуктів харчування. Дане поєднання дозволяє швидко і точно проводити оцінку якості як готових продуктів харчування, так і сировини в умовах лабораторій під час виробничого процесу.

1. Серед досліджених методів визначення характеристик органічних речовин, тільки оптичні методи, а саме – методи спектрально-флуоресцентного аналізу, дозволяють проводити безконтактний контроль. З викладеного можна зробити висновок, що найбільш перспективними методами дистанційного визначення інформативних параметрів продуктів харчування, є прямі оптичні методи, а саме метод, заснований на використанні ефекту люмінесценції. Незважаючи на окремі переваги інших методів, в даний час лише оптичні методи є єдиною можливою основою для створення як портативних приладів експрес-контролю, так і багатоконпонентних інформаційно-вимірювальних систем (із власними базами даних і можливістю прийняття рішень), що можуть проводити експрес-контроль під час усіх ланок виробничих процесів прийому, переробки, транспортування та передпродажного зберігання харчової продукції та її складових.

2. Промисловий зразок засобу вимірювань що базується на описаних в даному дослідженні люмінесцентних методах діагностики, може бути виконаним у вигляді окремих компактних герметичних модулів та переносним. Програмне забезпечення такого приладу дозволить проводити комплексний попередній аналіз інформативних параметрів продуктів харчування із виводом попередніх результатів в графічному вигляді, а також зберігати отримані дані про певний продукт та умови проведення дослідів у власну базу даних, з подальшою можливістю обробки та аналізу інформації за допомогою сторонніх електронних обчислювальних засобів.

3. Інформаційно-вимірювальна система, принцип дії якої базується на основі люмінесцентних методів аналізу, при наявності інтегрованого блоку автокорекції, відповідно до умов проведення вимірювань, дозволяє економити ресурси, зазвичай необхідні для первинного налаштування вимірювальних засобів в виробничих умовах. У випадку застосування даних методик, блок автокорекції формується на основі даних калібрувальних графіків, і тому може бути включений в базову комплектацію промислового зразка вимірювального засобу без значних додаткових фінансових затрат, що повинно сприяти здешевленню ціни готового промислового виробу.

Таким чином, люмінесцентні методи діагностики продуктів харчування та їх комбінація із засобами об'єктивного контролю та методами обробки отриманих результатів відповідають вимогам експрес-методу та мають економічні перспективи у випадку подальших досліджень.

Список літератури

1. Анисимова Н.А. Идентификация органических соединений: учебное пособие (для студентов, обучающихся по специальности «химия»). – Горно-Алтайск: РИО ГАГУ, 2009. – 95 с.
2. Аранович Г.И., Коршунов Ю.Н., Ляликов Ю.С. Справочник по физико-химическим методам исследования объектов окружающей среды. – Л.: Судостроение, 1979. – 648 с.
3. Барковский В.Ф. и др. Физико-химические методы анализа, Учебник для техникумов. – М.: Высшая школа, 1972. – 344 с.
4. Булычев А.А., Верхотуров В.Н., Гуляев Б.А. и др. Современные методы биофизических исследований: Практикум по биофизике: Учеб. пособие для биол. спец. вузов / под ред. А. Б. Рубина. – М.: Высш. шк. 1988. – 359 с.
5. Булычева Е.В. Определение общего содержания бактерий в природных водах методом флуориметрии. Дис. на получение науч. ступ. канд. тех. наук: спец. 02.00.02 – «Аналитическая химия» / Булычева Елизавета Владимировна; Гос. высш. учебн. зав. «Томский государственный университет». – Томск. – 2015 – 164 с. – рус.
6. Долгов В.В., Ованесов Е.Н., Щетникович К.А. Фотометрия в лабораторной практике. – М.: Российская медицинская академия последипломного образования, 2004. – 142 с.
7. Евелев С.А., Новоселов Н.П. Сравнительный анализ спектров люминесценции избранных органических соединений /С.А. Евелев, Н.П. Новоселов// Сборник трудов Института холодильной промышленности М.: «Локус». – 2008. – С. 35–44.
8. Ельяшевич М.А. Атомная и молекулярная спектроскопия, изд. 2-е. – М.: Эдиториал, 2001. – 896 с.
9. Зацепкина Н.М., Наконечный О.А. Перспективы застосування телевізійних засобів вимірювань в сучасних оптичних методах експрес контролю продуктів харчування. /Н.М. Зацепкина, О.А. Наконечний// Міжн. наук. інт. конф. «Інформація суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення» / 36. тез та доповідей: вип. 16. Тернопіль. – 2016. – С. 86–89.
10. Зацепкина Н.М., Наконечный О.А. Удосконалення люмінесцентних методів контролю якості продуктів харчування із застосуванням телевізійних засобів вимірювань. /Н.М. Зацепкина, О.А. Наконечний// «Технічна творчість»: 36. наук. праць / Укл.: Скиба М.Є., Поліщук О. С., Онофрійчук В.І., Хмельницький: ХНУ, 2016. – №2. – С. 53–56.
11. Земский В.И., Клим О.В., Кафтырева Л.А., Флуоресцентный метод дистанционного контроля качества пищевых продуктов /В.И. Земский, О.В. Клим, Л.А. Кафтырева, // Известия вузов. Приборостроение. 2002. – Т. 45. – №1. – С. 60–62.
12. Лакович Дж. Основы флуоресцентной спектроскопии. – М.: Мир, 1986. – 488 с.
13. Лёвшин Л.В., Салецкий А.М. Люминесценция и ее измерения: молекулярная люминесценция. – М.: Изд-во МГУ, 1989. – 272 с.

14. Константинова-Шлезингер М.А. Люминесцентный анализ / под ред. М.А. Константиновой-Шлезингер. – государственное изд.-во физ.-мат. лит., Москва, 1961. – 400 с.
15. Мандельберг Е.М. В мире холодного света. – М.: Наука, 1968. – 107 с.
16. Паркер С. Фотолуминесценция растворов, перевод с англ. к.х.н. Н.Л. Комиссаровой, к.х.н. Б.М. Ужинов / под ред. д.ф.-м.н. Р.Ф. Васильева. – изд. «Мир», Москва 1972. – 512 с.
17. Порев В.А. Телевізійні інформаційно-вимірювальні системи. Монографія. / В. А. Порев. – К. 2015. – 218 с.
18. Порев, В.А. Імовірнісний підхід до визначення роздільної здатності телевізійних засобів контролю /В.А. Порев, Г.В. Порев, Р.І. Кісіль// Методи та прилади контролю якості. – 2002. – №8. – С. 40–43.
19. Степанов Б.И. Люминесценция сложных молекул. Часть 1. Изд. академии наук БССР, Минск, 1961. – 328 с.
20. Степанов Б.И., Грибовский В.П. Введение в теорию люминесценции. – Изд. академии наук БССР, Минск, 1963. – 444 с.

References (transliterated)

1. Anisimova N.A. Identifikacija organicheskikh soedinenij: uchebnoe posobie (dlja studentov, obuchajushhijhsja po specialnosti «himija»). – Gorno-Altajsk: RIO GAGU, 2009. – 95 p.
2. Aranovich G.I., Korshunov Ju.N., Ljalikov Ju.S. Spravochnik po fiziko-himicheskim metodam issledovanija objektov okruzhajushhej sredy. – L.: Sudostroenie, 1979. – 648 p.
3. Barkovskij V.F. i dr. Fiziko-himicheskie metody analiza, Uchebnik dlja tehnikumov. – Moscow.: Vysshaja shkola, 1972. – 344 p.
4. Bulychiev A.A., Verhoturov V.N., Guljaev B.A. i dr. Sovremennye metody biofizicheskikh issledovanij: Praktikum po biofizike: Ucheb. posobie dlja biol. spec. vuzov / pod red. A. B. Rubina. – Moscow: Vyssh. shk. 1988. – 359 p.
5. Bulycheva E.V. Opredelenie obshhego sodержaniya bakterij v prirodnyh vodah metodom fluorimetrii. Dis. na poluchenie nauch. stup. kand. teh. nauk: spec. 02.00.02 – «Analiticheskaja himija» / Bulycheva Elizaveta Vladimirovna; Gos. vyssh. uchebn. zav. «Tomsnij gosudarstvennij universitet». – Tomsk. – 2015 – 164 p. – rus.
6. Dolgov V.V., Ovanesov E.N., Shhetnikovich K.A. Fotometrija v laboratornoj praktike. – Moscow.: Rossijskaja medicinskaja akademija posleddiplomnogo obrazovanija, 2004. – 142 p.
7. Evelev S.A., Novoselov N.P. Sravnitelnyj analiz spektrov ljuminescencii izbrannykh organicheskikh soedinenij /S.A. Evelev, N.P. Novoselov// Sbornik trudov Instituta holodilnoj promyshlennosti M.: «Lokus». – 2008. – pp. 35–44.
8. Eljashevich M.A. Atomnaja i molekuljarnaja spektroskopija, izd. 2-е. – Moscow: Jeditorial, 2001. – 896 p.
9. Zashhepkina N.M., Nakonechnij O.A. Perspektivi zastosuvannja televizijnih zasobiv vimirjuvan' v suchasnij optichnij metodah ekspres kontrolju produktiv harchuvannja. /N.M. Zashhepkina, O.A. Nakonechnij// Mizhn. nauk. int. konf. «Informacine suspilstvo: tehnologichni, ekonomichni ta tehnični aspekti stanovlennja» / Zb. tez ta dopovidej: vip. 16. Ternopil. – 2016. – pp. 86–89.
10. Zashhepkina N.M., Nakonechnij O.A. Udoskonalennja ljuminescentnih metodiv kontrolju jakosti produktiv harchuvannja iz zastosuvannjam televizijnih zasobiv vimirjuvan. /N.M. Zashhepkina, O.A. Nakonechnij// «Tehnichna tvorchist'»: Zb. nauk. prac / Ukl.: Skiba M.Є., Polishhuk O. S., Onofrijchuk V.I., Hmelnickij: HNU, 2016. – No. 2. – pp. 53–56.
11. Zemskij V.I., Klim O.V., Kaftyreva L.A., Fluorescentnyj metod distancionnoho kontrolja kachestva pishhevyh produktov /V.I. Zemskij, O.V. Klim, L.A. Kaftyreva, // Izvestija vuzov. Priborostroenie. 2002. – Vol.45. – No.1. – pp. 60–62.
12. Lakovich Dzh. Osnovy fluorescentnoj spektroskopii. – Moscow: Mir, 1986. – 488 p.
13. Ljovshin L.V., Saleckij A.M. Ljuminescencija i ee izmerenija: molekuljarnaja ljuminescencija. – Moscow: Izd-vo MGU, 1989. – 272 p.
14. Konstantinova-Shlezinger M.A. Ljuminescentnyj analiz / pod red. M.A. Konstantinovoju-Shlezinger. – gosudarstvennoe izd.-vo fiz.-mat. lit., Moscow, 1961. – 400 p.
15. Mandel'berg E.M. V mire holodnogo sveta. – Moscow: Nauka, 1968. – 107 p.
16. Parker S. Fotoljuminescencija rastvorov, perevod s angl. k.h.n. N.L. Komissarovoju, k.h.n. B.M. Uzhinov/pod red. d.f.-m.n. R.F. Vasileva. – izd. «Mir», Moscow 1972. – 512 p.

17. Porev V.A. Televizijni informacijno-vimirjuval'ni sistemi. Mono-grafija. / V. A. Porev. – Kiev. 2015. – 218 p.
18. Porev, V.A. Imovirnosnij pidhid do viznachennja rozdil'noї zdatnosti televizijnih zasobiv kontrolju /V.A. Porev, G.V. Porev, R.I. Kisil// Metodi ta priladi kontrolju jakosti. – 2002. – No. 8. – pp. 40–43.
19. Stepanov B.I. Ljuminescencija slozhnyh molekul. Chast 1. Izd. akademii nauk BSSR, Minsk, 1961. – 328 p.
20. Stepanov B.I., Gribovskij V.P.. Vvedenie v teoriju ljuminescencii. – Izd. akademii nauk BSSR, Minsk, 1963. – 444 p.

Надійшла (received) 22.05.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Вибір експрес методик аналізу кількісних та якісних параметрів продуктів харчування із застосуванням УФ-випромінювання / Н. М. Защепкіна, О. А. Наконечний // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 4 (1226). – С. 51–56. – Бібліогр.: 20 назв. – ISSN 2079-4525.

Выбор экспрес методик анализа количественных и качественных параметров продуктов питания с применением УФ-излучения / Н. М. Защепкина, О. А. Наконечный // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 4 (1226). – С. 51–56. – Бібліогр.: 20 назв. – ISSN 2079-4525.

The choice of express analysis techniques of quantitative and qualitative parameters of food products using ultraviolet radiation / N. M. Zashchepkina, O. A. Nakonechniy // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tehnika. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 4 (1226). – P. 51–56. – Bibliogr.: 20. – ISSN 2079-4525.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Защепкіна Наталія Миколаївна – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», професор кафедри інформаційних вимірювальних технологій екологічного моніторингу, м. Київ; тел.: +38(044) 204-95-43; e-mail: nanic1604@gmail.com

Защепкина Наталья Николаевна – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», профессор кафедры информационных измерительных технологий экологического мониторинга, г. Киев; тел.: + 38(044) 204-95-43; e mail: nanic1604@gmail.com

Zashchepkina Natalia Mykolajivna – Doctor of Technical Sciences, Professor, National technical university of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute”, Professor at the Department of Information Measuring Technologies for Environmental Monitoring, Kyiv; tel. +38 (044) 204-95-43; e mail: nanic1604@gmail.com

Наконечний Олександр Анатолійович – аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», асистент кафедри інформаційних вимірювальних технологій екологічного моніторингу, м. Київ; тел.: +38(044) 204-95-43; +38(099) 202-21-16; e-mail: alexandr.nackonechny@yandex.ua.

Наконечный Александр Анатольевич – аспирант, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», ассистент кафедры информационных измерительных технологий экологического мониторинга, г. Киев; тел.: +38(044) 204-95-43; +38(099) 202-21-16; e mail: alexandr.nackonechny@yandex.ua.

Nakonechniy Oleksandr Anatolijovich – PhD student, National technical university of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute”, Assistant of the Department of Information Measuring Technologies of Environmental Monitoring, Kyiv; tel. +38 (044) 204-95-43; +38(099) 202-21-16; e mail: alexandr.nackonechny@yandex.ua.

УДК 620.179.14

О. В. ДЕСЯТНІЧЕНКО, Г. М. СУЧКОВ, М. Р. БОЧАРНИКОВ

УДОСКОНАЛЕННЯ АНАЛОГОВИХ ФІЛЬТРІВ З РЕЗОНАНСНОЮ ТА СМУГОВОЮ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Розглянуті основні положення побудови аналогових фільтрів. Запропоновано варіант модернізації аналогових фільтрів за допомогою цифрових потенціометрів. Показані особливості використання потенціометрів в залежності від типу фільтра. Наведені шляхи підвищення точності встановлення центральної частоти. Висвітлені основні моменти побудови блоку цифрового керування. Проведена практична реалізація та випробовування запропонованих рішень. Зроблені висновки щодо доцільності використання побудованих фільтрів.

Ключові слова: цифровий потенціометр, аналоговий тракт, біквадратний фільтр, смуговий фільтр, операційний підсилювач.

Рассмотрены основные положения построения аналоговых фильтров. Предложен вариант модернизации аналоговых фильтров с помощью цифровых потенциометров. Показаны особенности использования потенциометров, в зависимости от типа фильтра. Приведены пути повышения точности установки центральной частоты. Освещены основные моменты построения блока цифрового управления. Проведена практическая реализация и испытания предложенных решений. Сделаны выводы о целесообразности использования построенных фильтров.

Ключевые слова: цифровой потенциометр, аналоговый тракт, биквадратный фильтр, полосовой фильтр, операционный усилитель.

The article represents basic information about analog filters construction. A variant of analog filters modernization by using digital potentiometer have proposed. The article shows main advantages of using potentiometers, depending on the filter type. The article contains ways to improve the accuracy of the central frequency setting. Features of the digital control unit construction have shown. Also article contains the practical implementation and testing of the proposed solutions. Conclusions have been made about the appropriateness of using the constructed filters.

Keywords: digital potentiometer, analog path, biquadratic filter, bandpass filter, operational amplifier.

Вступ. Електромагнітно-акустична (ЕМА) товщинометрія та дефектоскопія широко застосовуються для контролю різноманітних об'єктів, як при виготовленні, так і під час експлуатації. Використання неруйнівних методів контролю під час виробництва дозволяє контролювати геометричні розміри виробів та заздалегідь проводити відбраковування неякісної продукції. Дефектоскопія виробів, що знаходяться в експлуатації дозволяє вчасно виявляти та усувати дефекти (наприклад такі як тріщини). Вимірювання товщини під час експлуатації використовується з метою визначення кількісних характеристик зменшення товщини стінок елементів, для визначення величин корозійного зношування стінки, днища та інших частин конструкцій [1].

На відміну від аналогів, ЕМА прилади дозволяють проводити вимірювання об'єктів без необхідності забезпечення прямого контакту поверхні виробу та датчика. Це дозволяє контролювати об'єкти, що вкриті шаром захисного покриття або іржі, без необхідності попередньої підготовки поверхні. Також можливо контролювати вироби, що розігріті до високих температур без необхідності їх попереднього охолодження [2].

Сучасні ЕМА прилади дозволяють визначати наявність та розташування дефектів в об'єкті контролю за часом приходу ультразвукових сигналів, відбитих від внутрішньої й зовнішньої поверхні або неоднорідності усередині стінки, що дозволяє встановлювати, крім зовнішніх і внутрішніх дефектів металу, різного роду неоднорідності в металі, такі як розшарування та інші включення [3].

Одним з недоліків ЕМА методу є необхідність використання високого рівня амплітуди на передаючому датчику (100 – 3000 В), що спричиняє наявність великої кількості завад у вхідному сигналі, особливо з огляду на досить низький рівень сигналу,

що надходить з прийомного датчика (10 – 2000 мкВ) [4]. Це зумовлює використання вхідних аналогових трактів з низьким рівнем власних шумів та з можливістю фільтрації сигналу. Високу ефективність показало використання смугових та резонансних аналогових фільтрів у таких трактах [5, 6]. Основним недоліком використання таких фільтрів є неможливість змінювати центральну частоту програмним шляхом [7], що унеможливує використання ЕМА перетворювачів з різними резонансними частотами водночасу приладі.

Нижче буде запропоновано варіанти подолання такого недоліку шляхом модернізації існуючих фільтрів за допомогою використання цифрових потенціометрів з метою дати можливість змінювати значення центральної частоти програмним шляхом в діапазоні від 0.5 до 3.0 МГц.

Модернізація аналогового тракту з смуговою характеристикою. Смугові фільтри можуть будуватися шляхом послідовного з'єднання фільтрів нижніх та верхніх частот або на базі фільтрів зі смуговою характеристикою. Смуговий фільтр другого порядку можна реалізувати на основі схеми інвертуючого підсилювача зі зворотнім смугово-пропускаючим зв'язком [8], як це показано на рис. 1.

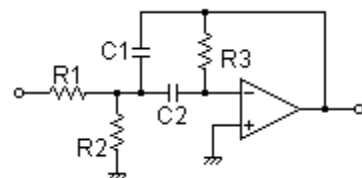


Рис. 1 – Схема смугового активного фільтру

Передатна функція фільтру має вигляд:

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{2\zeta(2\pi f_0)K_s}{s^2 + 2\zeta(2\pi f_0)s + (2\pi f_0)^2} \quad (1)$$

Центральна частота такого фільтру може бути обчислена з наступного виразу:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{R_3 C_1 C_2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}, \quad (2)$$

Добротність фільтру розраховується як:

$$Q = \frac{1}{2\zeta}, \quad (3)$$

Коефіцієнт підсилення K можна обчислити:

$$K = \frac{R_3}{R_1} \frac{-C_2}{C_1 + C_2}, \quad (4)$$

Як видно з формули 2, центральна частота фільтру залежить від опору резистора R_2 . Якщо замість нього використати цифровий потенціометр, що має 256 позицій зміни опору, можна буде змінювати цю частоту дискретним шляхом. З огляду на дискретність зміни опору, залежність центральної частоти від опору цифрового потенціометра буде мати вигляд наведений на рис. 2.

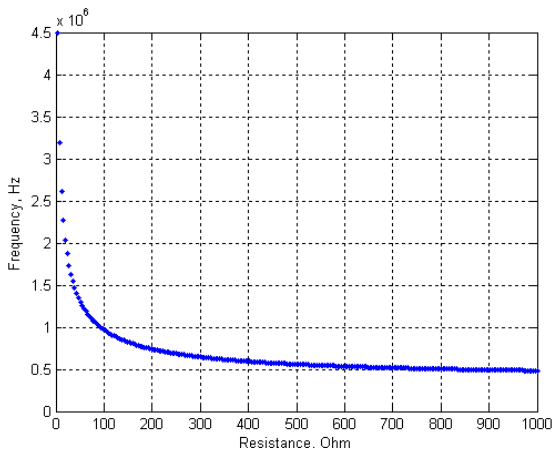


Рис. 2 – Залежність центральної частоти смугового фільтру від опору цифрового потенціометру

Як видно з рисунку, зміна частоти до 2 МГц є досить плавною, але на більш високих частотах не можливо встановити деякі значення. Для покращення ситуації прийнято рішення послідовно з резистором R_2 встановити змінний резистор меншого опору з цифровою настройкою. Нажаль промисловість не випускає цифрові резистори, що здатні працювати на високих частотах з низьким рівнем опору. Тому допоміжний резистор був побудований з паралельно включених постійного резистора на 8 Ом та цифрового потенціометра на 1 кОм. Графік залежності опору блоку допоміжних резисторів від коду наведено на рис. 3

Як видно з рисунку, зміна опору не є лінійною, але в області малих значень кодів керування, все ще можна використовувати близько 20 робочих точок.

Залежність центральної частоти смугового фільтру від опору у разі використання двох цифрових потенціометрів, показана на рис. 4. Як видно з рисунку, значення встановлюваних частот мають високу щільність на усьому діапазоні від 0.5 до 3.0 МГц

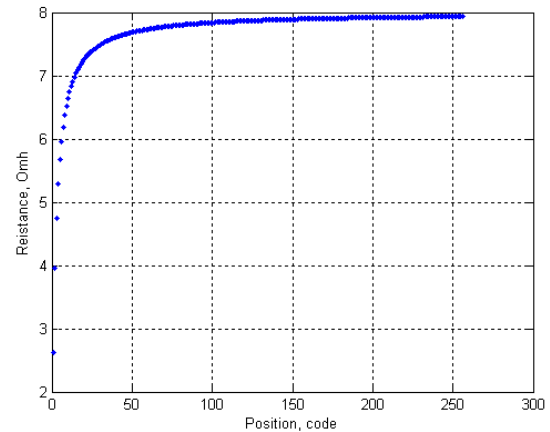


Рис. 3 – Залежність опору блоку допоміжних резисторів від коду

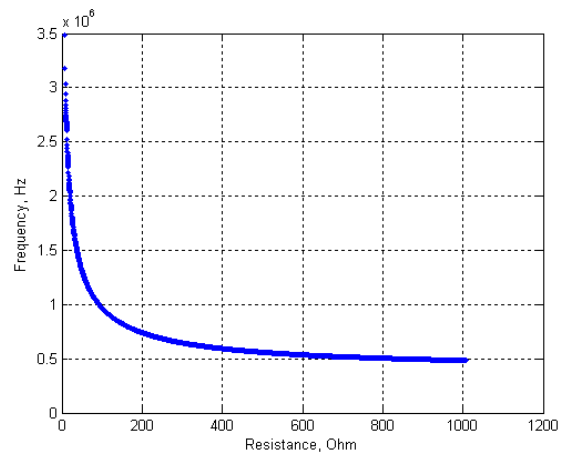


Рис. 4 – Залежність центральної частоти смугового фільтру від опору у разі використання двох цифрових потенціометрів

Модернізація аналогового тракту з резонансною характеристикою. Цей аналоговий тракт побудовано на базі біквадратного активного фільтру, схема якого зображена на рис. 5.

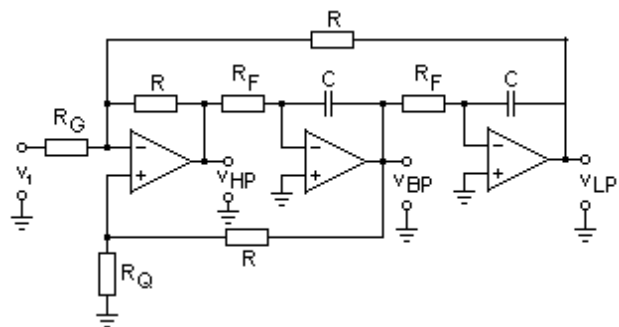


Рис. 5 – Схема біквадратного фільтру

Однією із властивостей біквадратного фільтру є незмінність його смуги пропускання при зміні середньої частоти пропускання, тому в біквадратних фільтрах добротність збільшується з ростом середньої частоти [8]. Схема біквадратного смугового фільтру (рис. 5) складається з сумуючого інтегратора,

сигнал з якого надходить на інвертуючий підсилювач, сигнал з якого в свою чергу іде на другий інтегратор.

Частота резонансу такого фільтру може бути обчислена за формулою:

$$F = 1/2\pi CR_F, \quad (5)$$

Добротність фільтру можна визначити як:

$$Q = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{R}{R_Q} \right), \quad (6)$$

Добротність фільтру розраховується як:

$$K = R/R_G, \quad (7)$$

Розрахункові номінали компонентів схеми становлять: $C=270$ пФ; $R=10$ кОм; $R_Q=100$ Ом.

Центральна частота фільтру залежить від опору резисторів R_f . Опір цих резисторів завжди рекомендується вибирати однаковим. Якщо в якості таких резисторів використати цифрові потенціометри, можна буде змінювати частоту дискретним шляхом. Залежність центральної частоти від встановленого опору цифрового потенціометра буде мати вигляд наведений на рис. 6.

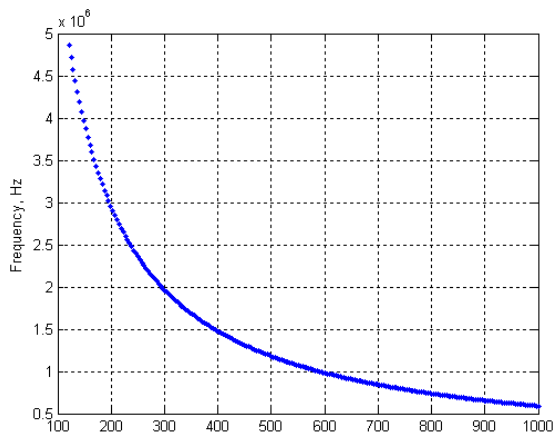


Рис. 6 – Залежність центральної частоти резонансного фільтру від опору цифрових потенціометрів

Як видно з графіку, характеристика залежності ближча до лінійної, на відміну від смугового фільтру. Але дискретність встановлення частот вище 3 МГц досить велика. Знехтуємо правилом, щодо необхідності дотримання строгої рівності опор резисторів R_f та проведемо моделювання схеми для випадку, коли резистори мають майже рівні значення, які відрізняються одне від одного на значення одного кроку 4 Ом (250 Ом та 254 Ом).

Для підвищення достовірності, буде виконуватися паралельне моделювання у двох різних програмних пакетах: Micro-Cap [8] та Multisim [9]. Такий підхід дозволяє значно зменшити ймовірні помилки, що можуть виникати через недосконалість програмних моделей реальних елементів.

На рис. 7 показано графік з результатами моделювання, отриманого завдяки програмі Micro-Cap. Результати, що були отримані у програмі Multisim збігаються з результатами програми Micro-Cap, тому приводитися не будуть.

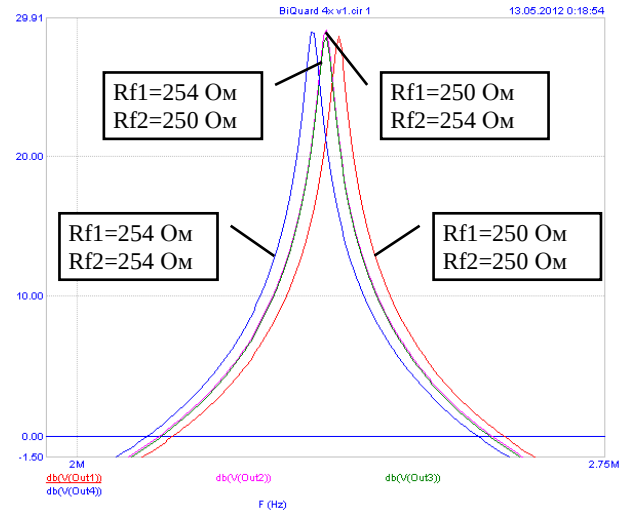


Рис. 7 – Залежність центральної частоти резонансного фільтру від опору цифрових потенціометрів для по чергової зміни опорів

З результатів моделювання можна зробити висновок про припустимість використання по чергової зміни опорів резисторів, при чому не має значення порядок зміни, а розрахункові значення для частоти можна приймати як середнє між цими значеннями. Залежність центральної частоти резонансного фільтру від опору цифрових потенціометрів для по чергової зміни опорів наведено на рис. 8. Як видно, завдяки досить простому способу, вдалося вдвічі підвищити роздільну здатність встановлення частоти фільтру.

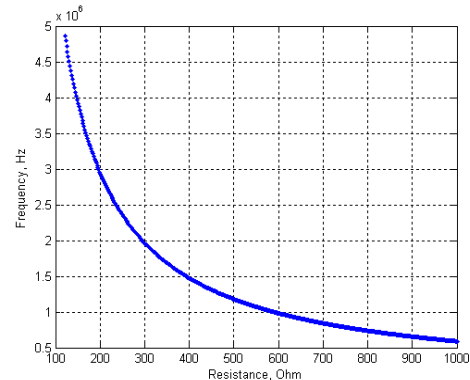


Рис. 8 – Залежність центральної частоти резонансного фільтру від опору цифрових потенціометрів для по чергової зміни опорів

Розробка та моделювання схеми цифрового керування. Схема блоку цифрового керування (рис. 9) побудована на базі мікроконтролера ATmega 16 (U1). Цей контролер працює на частоті 16 МГц та має 4 порти вводу/виводу по 8 ліній кожен, 16 Кбайт вбудованої пам'яті програм. Дисплей під'єднується до контролера через роз'єм P1. Через роз'єм P2 буде під'єднуватися програматор. Роз'єм P3 використовується для під'єднання цифрових потенціометрів. Кнопки керування мембранного типу розташовані на передній панелі, та складають з нею суцільну конструкцію.

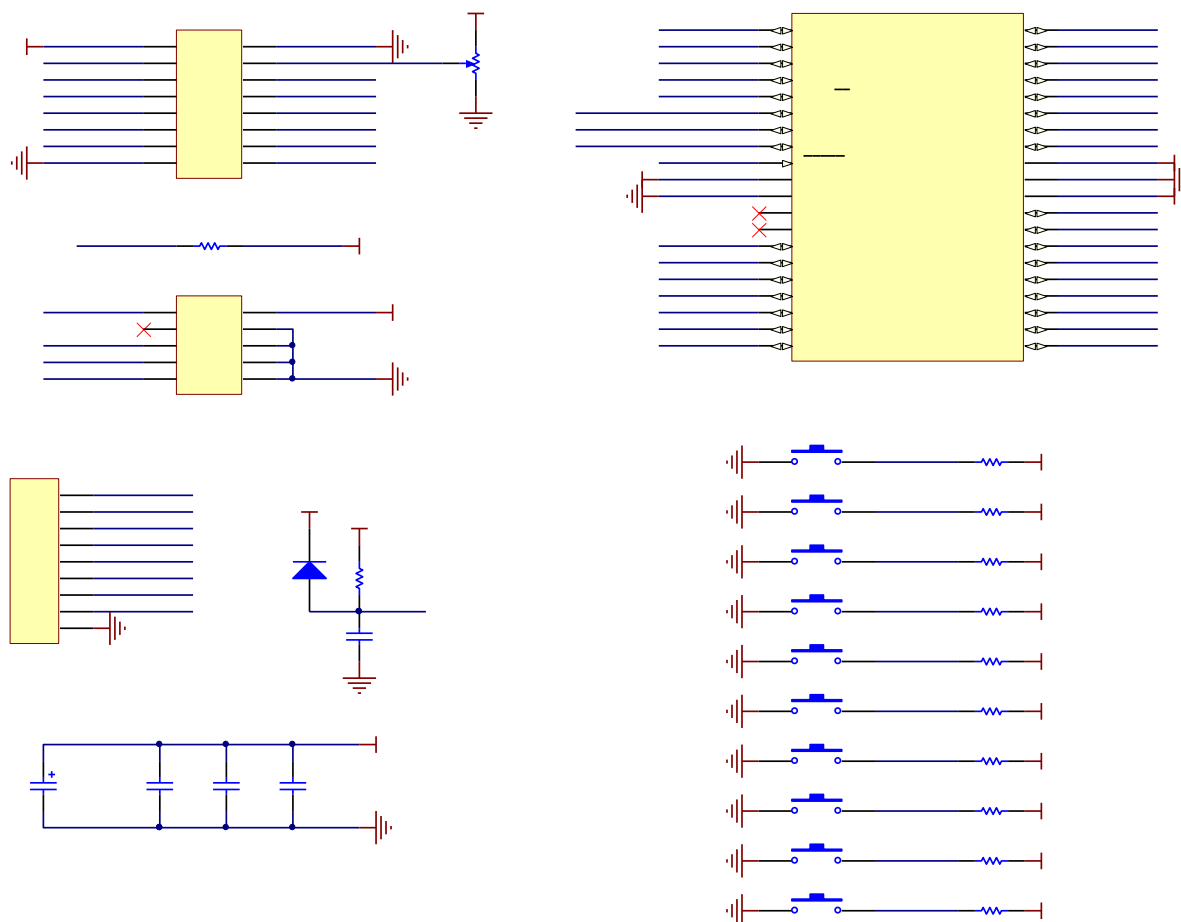


Рис. 9 – Схема блоку цифрового керування

Для перевірки схеми використано програму Proteus [10], яка має широкі можливості моделювання цифрових схем з використанням мікроконтролерів. Проведення програмного моделювання до створення фізичного макету дозволяє значно скоротити час на пошук помилок в програмному коді та уникнути можливого виходу з ладу електронних компонентів, що може бути спричинений такими помилками.

Створення макету пристрою. Для створення процесорного блоку було вирішено не виготовляти окрему плату, а провести монтаж на макеті, адже в процесі налаштування та доопрацювання схема може

бути значно змінена, також можуть бути додані нові компоненти.

Для модернізації фільтрів було обрано цифровий потенціометр AD8400, з опором 1 кОм.

Цифрові потенціометри треба розташовувати як можна ближче до аналогової частини, тому кожен з них буде розташовуватися на малій окремій друкованій платі, розробка якої проводилася за допомогою пакету AltiumDesigner [11].

Друкована плата модуля цифрового потенціометра, схема розташування елементів та її тривимірна модель показані на рис. 10.

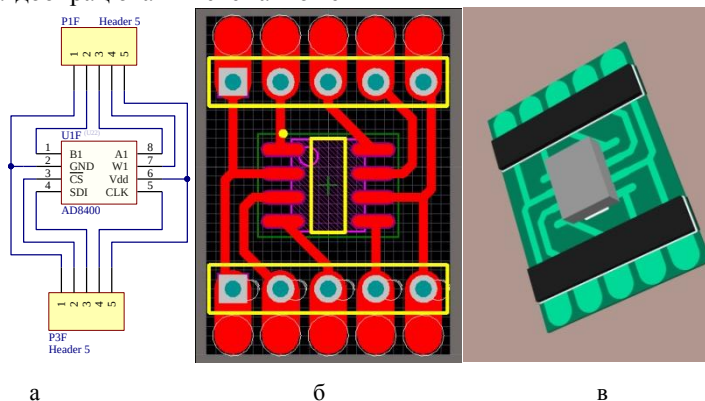


Рис. 10 – Друкована плата модуля цифрового потенціометра:

а – схема модуля цифрового потенціометра; б – схема розташування елементів; в – тривимірна модель

Для зменшення впливу завад від мікроконтролеру на підсилювач використано модуль гальванічного розв'язання цифрової та аналогової частин. Друкована плата модуля гальванічного

розв'язування, схема розташування елементів та тривимірна модель друкованої плати цього модуля показані на рис. 11.

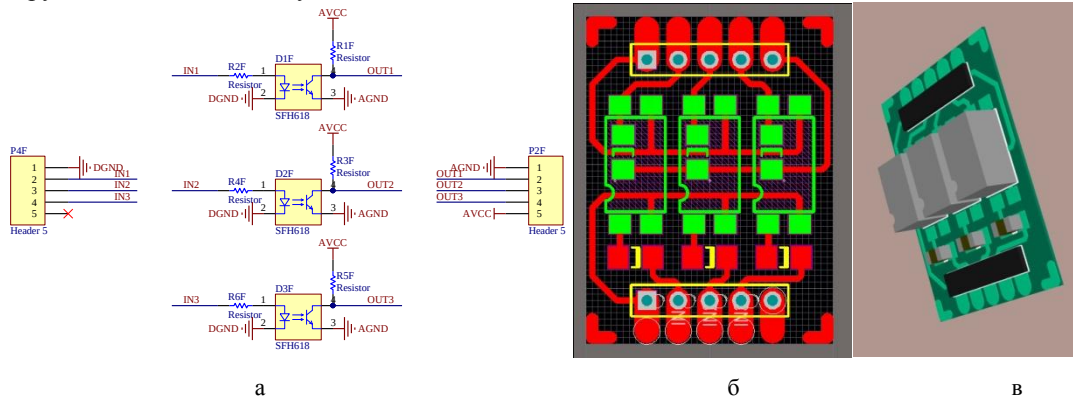


Рис. 11 – Друкована плата модуля гальванічного розв'язування:

а – схема модуля гальванічного розв'язання; б – схема розташування елементів; в – тривимірна модель

Блок цифрового керування виконано у двох екземплярах: для смугового та резонансного підсилювачів. Кожна пара, що складається з блока керування та підсилювача виконана в окремому корпусі з вбудованим блоком живлення. Зовнішній вигляд одного з модернізованих підсилювачів показано на рис. 12.



Рис. 12 – Зовнішній вигляд підсилювача

Висновки. Смуговий та біквдратний аналогові фільтри можуть бути модернізовані за рахунок використання цифрових потенціометрів. Для підвищення точності встановлення середньої частоти смугового фільтру необхідно використовувати декілька цифрових потенціометрів, з'єднаних спеціальним чином. Підвищення точності встановлення середньої частоти для біквдратного фільтру може бути здійснене за рахунок незначного відходу від правила встановлення однакового опору на обох задаючих резисторах.

Список літератури

1. Неразрушающий контроль: справочник: в 7 т. под общ. ред. Клюева В. В. Т.3: Ультразвуковой контроль / В. В. Клюев, И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге – Москва: Машиностроение, 2004. – 864 с.
2. Сучков Г. М. О главном преимуществе ЭМА способа / Г. М. Сучков // Дефектоскопия. – Москва, 2000. – №10. – С.67 – 70.
3. Сучков Г. М. ЭМА товщинометрия. (Обзор) / Г. М. Сучков, О. М. Петрищев, О. В. Десятниченко, Н. М. Юданова // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. – № 12. – С. 110 – 121.
4. Десятниченко О. В. Електромагнітно-акустичний товщиномір для контролю металовиробів з діелектричними покриттями:

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук / О. В. Десятниченко – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – 21 с.

5. Десятниченко О. В. Приймаючий аналоговий тракт зі смуговою характеристикою для засобу неруйнівного контролю ультразвукового приладу / О. В. Десятниченко, Г. М. Сучков, К. О. Рекало // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – № 34. – С. 163 – 173.
6. Десятниченко О. В. Побудова приймаючого аналогового тракту на базі біквдратного фільтру для використання у електромагнітно-акустичній товщинометрії та дефектоскопії / О. В. Десятниченко, Г. М. Сучков, С. В. Хаціна, ЛеЧіХіеу, А. А. Синельникова, Г. Г. Горбашова // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – Харьков, 2013. – № 8 (114), Т. 1. – С. 146 – 150.
7. Десятниченко А. В. Повышение чувствительности электромагнитно-акустического толщиномера за счет настройки резонансной частоты преобразователя / А. В. Десятниченко, К. А. Рекало, А. А. Синельникова // Матеріали III науково-практичної конференції студентів і молодих учених: «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання». – Івано-Франківськ, 2011. – С. 57 – 58
8. Мошниц Г. Проектирование активных фильтров: Пер. с англ. / Г. Мошниц, П. Хорн // Москва: Мир, 1984 – 318с.
9. Амелина М. А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 8 / М. А. Амелина, С. А. Амелин // Горячая линия-Телеком – 464с.
10. Хернхтер М. E. Multisim 7: Современная система компьютерного моделирования и анализа схем электронных устройств. / М. Е. Хернхтер // ДМК. 2006 – 488 с.
11. Васильченко Е. В. Проектирование схем на компьютере. / Е. В. Васильченко, К. С. Наседкин/ Библиотека инженера. 2004–525 с.
12. Сабунин А. Е. Altium Designer. Новые решения в проектировании электронных устройств. / А. Е. Сабунин / Солон-пресс. 2009 – 432 с.

References (transliterated)

1. Nerazrushaiushchy kontrol: spravochnik: Vol. 7. pod obshch. red. Kliueva V. V. Vol.3: Ultrazvukovoi kontrol / V. V. Kliuev, Y. N. Ermolov, Iu. V. Lanhe – Moscow: Mashynostroenye, 2004. – 864 p.
2. Suchkov G. M. O glavnom preimushchestve EMA sposoba / G. M. Suchkov // Defektoskopiya. – Moscow, 2000. – No.10. – pp. 67 – 70.
3. Suchkov G. M. EMA tovshchynomeriia. (Ohliad) / G. M. Suchkov, O. M. Petryshchev, O. V. Desiatnichenko, N. M. Yudanov // Visnyk NTU «KhPI». – Kharkov: NTU «KhPI», 2010. – No 12. – pp. 110 – 121
4. Desiatnichenko O. V. Elektromagnitno-akustychnyi tovshchynomir dlia kontroliu metalovyrobiv z dielektrychny umypokryttiamy:

- dyseratsiynazdobutianaukovohostupeniakandydatekhnichnykh nauk / O. V. Desiatnichenko – Kharkiv: NTU «KhPI», 2015. – 21 p.
5. Desiatnichenko O. B. Pryimaiuchyianalohoviytraktizmuhoivoiukharkystykyoiudliiazasobuneriuvnohokontroliuultrazvukovohopryladu / O. V. Desiatnichenko, G. M. Suchkov, K. O. Rekalo // VisnykNTU «KhPI». – Kharkiv: NTU «KhPI», 2013. – No. 34. – pp. 163 – 173.
 6. Desiatnichenko O. V. Pobudovapryimaiuchohoanalogovohotraktunabazibikvadratnohofiltrudliavykorystanniauelektromahnitno–akustychniitovshchynometriitadefektoskopii / O. V. Desiatnichenko, H. M. Suchkov, S. V. Khashchina, Le Chi Khyeu, A. A. Synelnykova, H. H. Horbashova // Enerhosberezhenye. Enerhetyka. Enerhoaudyt. – Kharkov, 2013. – No. 8 (114), Vol. 1. – pp. 146 – 150.
 7. Desiatnychenko A. V. Povishenyechuvstvytelnostyelektromahnytno–akustycheskohotolshchynomerazaschetnastroikyrezonansnoichastoti preobrazovatel'ia / A. V. Desiatnychenko, K. A. Rekalo, A. A. Synelnykova // MaterialyIII naukovopraktychnoikonferentsiistudentivimolodykhuchenykh: «Metodyzasobyneriuvnohokontroliupromyslovohoobladnannia». – Ivano-Frankivsk, 2011. – pp. 57 – 58.
 8. Moshyts H. Proektyrovanyeaktyvnykhfyl'trov: Per. sanhl. / H. Moshyts, P. Khorn // Moscow: Myr, 1984 – 318 p.
 9. Amelyna M. A. Prohrammaskhemotekhnicheskohomodelyrovaniya Micro-Cap 8 / M. A. Amelyna, S. A. Amelyn // Horiachaialnyia-Telekom – 464 p.
 10. Khernyter M. E. Multisim 7: Sovremennaiiasystemakompiuternohomodelyrovaniya y analizaskhemelektronnikhustroistv. / M. E. Khernyter // DMK. 2006 – 488 p.
 11. Vasylenko E. V. Proektyrovanyeskhemnakompiutere. / E. V. Vasylenko, K. S. Nasedkyn / Byblyotekaynzhynera. 2004 – 525 p.
 12. Sabunyn A. E. Altium Designer. Novieresheniya v proektyrovaniyelektronnikhustroistv. / A. E. Sabunyn / Solon-press. 2009 – 432 p.

Надійшла (received) 09.05.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Удосконалення аналогових фільтрів з резонансною та смужковою характеристиками / O. B. Десятніченко, Г. М. Сучков, М. Р. Бочарніков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 4 (1226). – С. 57–62. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-4525.

Усовершенствование аналоговых фильтров с резонансной и полосовой характеристиками / A. B. Десятниченко, Г. М. Сучков, Н. Р. Бочарников // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 4 (1226). – С. 57–62. – Библиогр.: 12 назв. – ISSN 2079-4525.

Improvement of analog filters with resonant and bandpass characteristics / O. V. Desyatnichenko, G. M. Suchkov, N. R. Bocharnikov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tekhnika – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 4 (1226). – P. 57–62. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2079-4525.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Десятніченко Олексій Володимирович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», інженер кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики, тел.: (063) 64 32 256; e-mail: o.desyatnichenko@gmail.com.

Десятниченко Алексей Владимирович – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», инженер кафедры компьютерных и радиоэлектронных систем контроля и диагностики; тел.: (063) 64 32 256; e-mail: o.desyatnichenko@gmail.com.

Desyatnichenko Oleksiy Volodymirovich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Engineer at the Department of Computer and Electronic Control Systems and Diagnostics; tel.: (063) 64 32 256; e-mail: o.desyatnichenko@gmail.com.

Сучков Григорій Михайлович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики, тел.: (098) 5950058; e-mail: hpi.suchkov@gmail.com.

Сучков Григорий Михайлович – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», заведующий кафедры компьютерных и радиоэлектронных систем контроля и диагностики; тел.: (098) 59 500 58; e-mail: hpi.suchkov@gmail.com.

Suchkov Grigoriy Michaylovich – Doctor of Technical Science, Full Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Chief of the Department of Computer and Electronic Control Systems and Diagnostics; tel.: (098) 5950058; e-mail: hpi.suchkov@gmail.com.

Бочарніков Микита Русланович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент.

Бочарников Никита Русланович – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студент.

Bocharnikov Mykyta Ruslanovych – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", student.

УДК 620.179.14

Ю. В. ХОМЯК, С. Н. ГРИГОРЕНКО, А. Ю. СЛОБОДЧУК, И. В. ГРИГОРЕНКО

ПОВЫШЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ЭКРАНИРОВАННЫМ ОРТОГОНАЛЬНЫМ ВИХРЕТОКОВЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

Предлагается метод повышения точности обнаружения дефектов экранированным ортогональным вихрековым преобразователем, за счет расширения зоны чувствительности, что подтверждено математическим и имитационным моделированием; уменьшить влияние конструктивных особенностей объекта контроля. Описывается способ повышения точности обнаружения поверхностных дефектов с использованием экранированного накладного ортогонального вихрекового преобразователя при контроле металлических изделий с шероховатой поверхностью.

Ключевые слова: вихрековый преобразователь, моделирование, датчик, возбуждающая обмотка, измерительная обмотка, поверхностный дефект, трещина, точность.

Пропонується метод підвищення точності виявлення дефектів екранованим ортогональним перетворювачем, за рахунок розширення зони чутливості, що підтверджено математичним і імітаційним моделюванням; зменшити вплив конструктивних особливостей об'єкта контролю. Описується спосіб підвищення точності виявлення поверхневих дефектів з використанням екранованого накладного ортогонального вихрекового преобразователя при контролі металевих виробів з шорсткою поверхнею.

Ключові слова: вихрострумний перетворювач, моделювання, датчик, збудлива обмотка, вимірювальна обмотка, поверхневий дефект, тріщина, точність.

A method is proposed for increasing the accuracy of detection of defects by a screened orthogonal eddy current transducer, by expanding the sensitivity zone, which is confirmed by mathematical and simulation modeling; Reduce the influence of design features of the object of control. A method for increasing the accuracy of detection of surface defects using a screened overhead orthogonal eddy current transducer is described for the control of metal products with a rough surface.

Keywords: eddy current transducer, simulation, sensor, exciting winding, measuring winding, surface defect, crack, accuracy.

Введение. Контроль качества выпускаемой продукции для изделий из металла, которые являются узлами и звеньями ответственных промышленных объектов, всегда является обязательным гарантом выпуска качественной продукции в соответствии с требованиями нормативной документации. Для качественной оценки таких объектов применяются методы и средства неразрушающего контроля (НК) [1–2].

Среди широкого разнообразия методов и средств НК металлических изделий выделяется один из перспективных методов НК и технической диагностики, а также дефектоскопии и толщинометрии – вихрековый, что позволяет проводить исследования и разработки в данном научном направлении кафедры [3–8]. В качестве источника первичной информации используется вихрековый преобразователь (ВТП).

Поверхность объекта контроля (ОК) может иметь различную шероховатость, которая приводит к появлению ложных сигналов о дефекте.

Следует учитывать, что на амплитуду полезного сигнала ВТП могут влиять такие основные факторы как: электромагнитные помехи, характеристики схем измерения, потери в кабеле, который соединяет датчик (ВТП) и прибор. Поэтому исследование и разработка различных специализированных ВТП и приборов для вихрековой дефектоскопии является актуальной задачей.

Целью работы является повышение точности обнаружения поверхностных дефектов с использованием экранированного накладного ортогонального вихрекового преобразователя при контроле металлических изделий с шероховатой поверхностью.

При дефектоскопии в местах расположения металлических поверхностей уступов, боковых поверхностей, крепежных элементов ОК и т.д. может происходить их влияние на полезные сигналы ВТП, что показано на рис. 1.

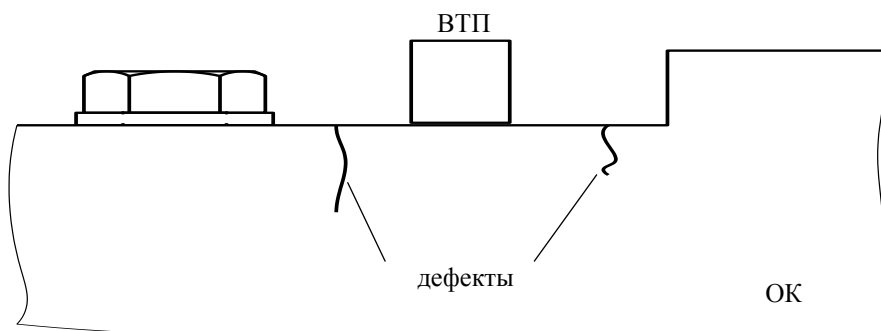


Рис.1 - Контроль дефектов вблизи уступов и конструктивных элементов

С целью уменьшения нежелательного влияния конструктивных особенностей ОК был разработан экранированный накладной ортогональный ВТП, конструкция которого представлена на рис. 2.

Применение электромагнитного экрана позволяет существенно уменьшить влияние указанных конструктивных элементов ОК. Настройка такого ВТП сводится к такому расположению экрана и обмоток (возбуждающей и измерительной) внутри него, при котором начальное напряжение при отсутствии дефекта минимально. Как показали исследования, для экранированных накладных

ортогональных ВТП также характерно уменьшение краевого эффекта.

В промышленности при проведении контроля производят сканирование поверхности ОК по различным схемам и с различным шагом, которые регламентируются технической документацией. Была исследована зависимость выходного сигнала ВТП от координаты перемещения x по поверхности ОК.

Для практической реализации данного метода необходимо определить характер чувствительности ортогонального ВТП в зависимости от положения дефекта.

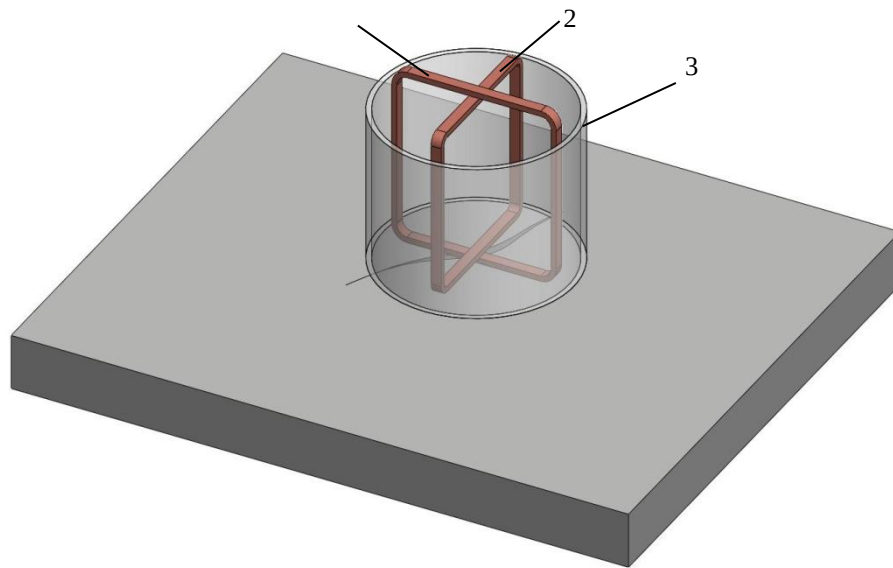


Рис. 2 – Конструкция экранированного накладного ортогонального ВТП:
1 – возбуждающая обмотка; 2 – измерительная обмотка; 3 – экран.

На рис. 3 представлена схема перемещения ВТП по поверхности ОК относительно дефекта.

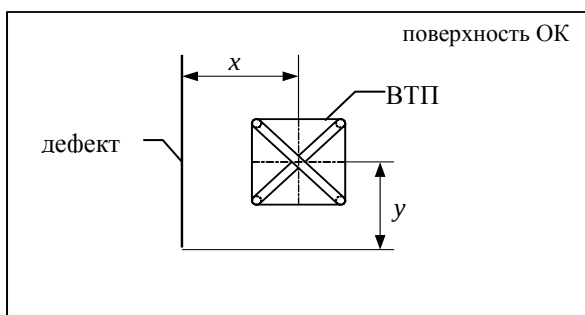


Рис. 3 – Схема перемещения ВТП по поверхности ОК относительно дефекта

Сигнал измерялся при последовательном перемещении датчика относительно дефекта, а координата x отсчитывалась по месту расположения центра ВТП. Зазор поддерживался постоянным.

Измерения были проведены при частоте возбуждающего тока 100 кГц.

Эксперименты проводились на плоском образце из углеродистой стали с искусственным дефектом в виде паза, выполненного электроэрозионным способом.

Дефект имел следующие параметры:

протяженность – 100 мм,

раскрытие – 0,4 мм, глубина – 3 мм.

Результаты измерений могут содержать как систематические так и случайные погрешности. Случайные погрешности можно устранить статистической обработкой результатов измерений. Гораздо сложнее обнаружить и устранить систематические погрешности. Применение тестовых методов коррекции систематических погрешностей средств измерения при бездемонтажном контроле в рабочих режимах с использованием реляционно-разностных моделей операторов коррекции даёт хорошие результаты при решении задач тестового контроля средств измерений [9].

Применение статистической обработки результатов измерений, полученных с помощью вихревого преобразователя даёт возможность повысить точность измерений путём обнаружения и

устранения случайных погрешностей из результата измерения.

Проведём обработку результатов измерения полученных на образце при многократном сканировании дефектной области.

Результаты ограниченного ряда наблюдений за изменением максимальной амплитуды сигнала ВТП A_i случайной величины A рассмотрим как выборку из генеральной совокупности.

Определение оценок параметров распределение случайных величин.

Находим среднеарифметическое значение:

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i = 181,733, \quad (1)$$

где $n = 30$ – количество элементов выборки.

Находим несмещенную оценку дисперсии:

$$\bar{D} = \frac{1}{n-1} \sum (A_i - \bar{A})^2 = 61,200, \quad (2)$$

Вычислим несмещенную оценку СКО по формуле:

$$\bar{S} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (A_i - \bar{A})^2} = 7,823, \quad (3)$$

Рассчитаем центральные моменты 2, 3, 4 порядка:

$$m_2^0 = \frac{1}{n} \sum (A_i - \bar{A})^2 = 59,160, \quad (4)$$

$$m_3^0 = \frac{1}{n} \sum (A_i - \bar{A})^3 = 185,282, \quad (5)$$

$$m_4^0 = \frac{1}{n} \sum (A_i - \bar{A})^4 = 9459,217, \quad (6)$$

Определим выборочное значение коэффициента вариации, которое является относительной изменчивости наблюдаемой величины:

$$V_x = \frac{\bar{S}}{\bar{A}} \cdot 100 = 4,305 \%, \quad (7)$$

Выполняя проверку наличия аномальных ошибок по критерию Стюдента:

$$\tau_p = \frac{|A_i - \bar{A}|}{\bar{S}} = 2,018, \quad (8)$$

В результате проведения проверки выяснено что, $\tau_p \leq \tau(5\%, n)$ ($2,018 < 2,048$), следовательно, грубых результатов нет.

Выполняем предварительную проверку гипотезы о нормальности закона распределения.

Критерий среднего абсолютного отклонения.

$$CAO = \frac{1}{n} \sum |A_i - \bar{A}| = 6,291, \quad (9)$$

$$\left| \frac{CAO}{\bar{S}} - 0,7979 \right| < \frac{0,4}{\sqrt{n}}, \quad (10)$$

$$0,006 < 0,073.$$

Условие выполняется, следовательно, гипотеза о нормальном законе распределения подтверждается.

На рис. 4 представлена модель данного экранированного накладного ортогонального ВТП, которое проводилось с помощью современного программного обеспечения для моделирования трёхмерных электромагнитных полей методом конечных элементов.

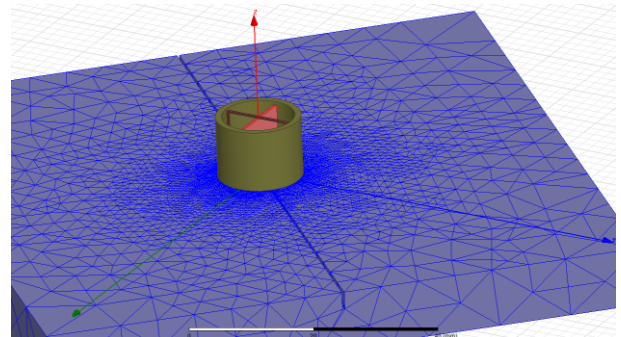


Рис. 4 – Моделирование экранированного накладного ортогонального ВТП

На рис. 5 приведены зависимости сигнала ВТП от координаты x , полученные на плоском образце с искусственными дефектами. Максимальное значение амплитуды сигнала достигается непосредственно над центром дефекта.

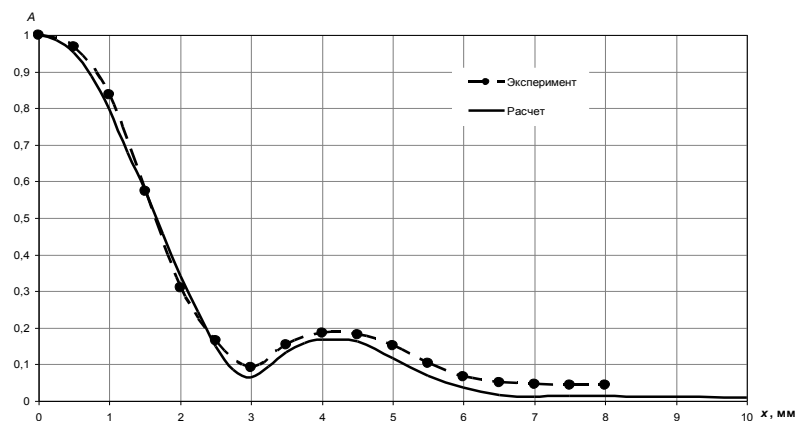


Рис. 5 – Зависимости сигнала ВТП от x , полученные на плоском образце ОК с искусственными дефектами

Выводы. Применение экрана в конструкции накладного ортогонального вихретокового преобразователя дало возможность повысить точность обнаружения дефектов за счет расширения зоны чувствительности, что подтверждено математическим и имитационным моделированием, а также уменьшить влияние конструктивных особенностей объекта контроля.

Список литературы

1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 2: В 2 кн. Кн 2: Вихретоковый контроль. – М.: Машиностроение, 2006. – 688 с.
2. Клюев В. В. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / В. В. Клюев, Ф. Р. Соснин, А. В. Ковалев и др.; Под ред. В. В. Клюева. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2005. – 656 с.
3. Пат. 55471 U (Україна), МПК (2009) G01N 27/90. Накладний вихорострумний перетворювач для неруйнівного контролю / Г. М. Сучков, Ю. В. Хомяк; Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут" (UA). – № u201008320; заяв. 05.07.2010; опубл. 10.12.2010, Бюл. № 23.
4. Сучков Г. М. Развитие возможностей вихретоковой дефектоскопии / Г. М. Сучков, Ю. В. Хомяк // Методы та прилади контролю якості. – 2006. – № 17. – С. 3–7.
5. Сучков Г. М. Повышение возможностей вихретокового контроля поверхности непрерывно литых слывов из ферромагнитных сталей / Г. М. Сучков, Ю. В. Хомяк. // Дефектоскопия. – Екатеринбург. – 2013. – № 1. – С. 78–83.
6. Глоба Светлана. Применение моделирования в вихретоковой дефектоскопии / Светлана Глоба, Григорий Сучков, Юрий Хомяк, Юрий Хорошайло, Антон Слободчук // Proceeding of 24th National Scientific Symposium with International Participation "METROLOGY AND METROLOGY ASSURANCE 2014", September 07–11, 2014, Sozopol, Bulgaria. – pp. 139–143.
7. Сучков Г. М. Вихретоковый дефектоскоп с низкой чувствительностью к шероховатости поверхности объекта контроля / Г. М. Сучков, Ю. В. Хомяк, С. Н. Глоба, Ю. К. Тараненко, А. Ю. Слободчук // Методы та прилади контролю якості. – 2015. – № 1. – С. 14–18.
8. Глоба С. М. Моделирование накладного вихрострумного перетворювача для контролю металовиробів / С. М. Глоба, Ю. В. Хомяк, С. Г. Семенов, А. Ю. Слободчук, С. О. Акулов // Актуальні проблеми автоматики та приладобудування: матеріали II Всеукр. наук.-техн. конф., 10–11 грудня 2015 р. – Х.: НТУ "ХПІ", 2015. – С. 106–108.
9. Григоренко И. В. Методы додаткових вимірювань при корекції

систематичних похибок засобів вимірювання / И. В. Григоренко, С. М. Глоба, С. И. Ко-драшов // Метрологія та прилади. – Харків: "Національний університет радіоелектроніки". – № 1 (57), 2016. – С. 22–26.

References (transliterated)

1. Non-destructive testing: Handbook: Vol.8. / Под общ. Ed. V. V. Klyuyeva. Vol. 2: In 2 books. Kn 2: Eddy current testing. – Moscow, Mechanical Engineering, 2006. – 688 p.
2. Klyuev V.V. Non-destructive testing and diagnostics: reference book/ V.V. Klyuev, FR Sosnin, AV Kovalev et al.; Ed. V. V. Klyuyeva. – 3rd ed., Pererab. And additional. – Moscow, Mechanical Engineering, 2005. – 656 p.
3. Pat. 55471 U (Ukraine), IPC (2009) G01N 27/90. Vihorostumovy remnants of pereotvoluvach for non-verifiable control / GM Suchkov, Yu. V. Khomyak; National Information Technology University "Kharkiv Politechnical Institute" (UA). – No. u201008320; Claiming. 05/07/2010; Publ. 10.12.2010, Bul. No. 23.
4. Suchkov G.M Development of eddy current flaw detection capabilities / GM Suchkov, Yu. V. V. Khomyak // Methods to control the anchor. – 2006. – No. 17. – pp. 3-7.
5. G. Suchkov. Increase in the potential for eddy current control of the surface of continuously cast slabs from ferromagnetic steels / GM Suchkov, Yu. V. Khomyak. // Defectoscopy. – Ekaterinburg. – 2013. – No. 1. – pp. 78-83.
6. The Globa Svetlana. Application of simulation in eddy current flaw detection / Svetlana Globa, Grigory Suchkov, Yuri Khomyak, Yuri Horoshaylo, Anton Slobodchuk // Proceeding of the 24th National Scientific Symposium with International Participation "METROLOGY AND METROLOGY ASSURANCE 2014", September 07-11, 2014, Sozopol, Bulgaria. – pp. 139-143.
7. Suchkov G.M An eddy current defect-scop with a low sensitivity to the surface roughness of the control object / GM Suchkov, Yu. V. Khomyak, SN Globa, Yu. K. Taranenko, A. Yu. Slo -bodchuk // Methods and control of the anchor. – 2015. – No. 1. – pp. 14-18.
8. Globa S.M Modeluvannya an overhead virohrosumovoy peretvoyuvaucha for control of meta-polymers / SM Globa, Yu. V. Khomyak, S.G. Semenov, A. Yu. Slobodchuk, S.O. Akulov // News Problems of automatics and that of adjudication: the material of the II All-Ukr. Sciences: -techn. Conference., 10-11 грудня 2015 р. – Kharkov, NTU "KhPI", 2015. – pp. 106-108.
9. I.V. Grigorenko. Methodology of dodatkovykh vimiryuvan at korektsii systematic kidnapping zasobiv vimiryugannya / IV Grigorenko, S.N. Globa, SI Kondrashov // Metrologiya ta priladi. – Kharkov, "National University of Radioelektroniki". – No. 1 (57), 2016. – pp. 22-26.

Поступила (received) 23.06.2017

Бібліографічні описи /Библиографические описания /Bibliographic descriptions

Повышение вероятности обнаружения дефектов экранированным ортогональным вихретоковым преобразователем / Ю. В. Хомяк, С. Н. Григоренко, А. Ю. Слободчук, И. В. Григоренко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 4 (1226). – С. 63–67. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-4525.

Підвищення ймовірності виявлення дефектів екранованим ортогональним перетворювача / Ю. В. Хом'як, С. М. Григоренко, А. Ю. Слободчук, І. В. Григоренко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. - Х.: НТУ «ХПІ», 2017. - № 4 (1226). - С. 63-67. - Бібліогр. : 9 назв. - ISSN 2079-4525.

Increased probability of detection of defects by a screened orthogonal eddy current transducer / Yu. V. Khomyak, S. N. Grigorenko, A. Yu. Slobodchuk, I. V. Grigorenko // News of NTU "KhPI". Серія: : Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tehnika. - – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. - No. 4 (1226). - P. 63-67. - Bibliography: 9 . ISSN 2079 4525.

Відомості про авторів /Сведения об авторах /About the Authors

Хомяк Юрий Валентинович – кандидат технических наук (2013), доцент кафедры компьютерных и радиоэлектронной систем контроля и диагностики, электромашино-строительный факультет, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", г. Харьков; тел.: (095) 883-17-90; e-mail: homyak.yv@gmail.com.

Khomyak Yuriy Valentinovich - Candidate of Technical Sciences (2013), Associate Professor of the Department of Computer and Radio Electronic Control and Diagnostics Systems, Electric Machine-Building Faculty, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkov; tel. : (095) 883-17-90; e-mail: homyak.yv@gmail.com.

Григоренко Светлана Николаевна – кандидат технических наук (2000), доцент (2005); доцент кафедры компьютерных и радиоэлектронной систем контроля и диагностики, заместитель заведующего кафедрой компьютерных и радиоэлектронной систем контроля и диагностики, электромашиностроительный факультет; учёный секретарь специализированного учёного совета Д 64.050.09 по специальности 05.11.13 – приборы и методы контроля и определения состава веществ; Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"; тел.: (050) 137-77-73; e-mail: sngloba@gmail.com.

Hrihorenko Svetlana Nikolaevna - candidate of technical sciences (2000), associate professor (2005); Associate Professor of the Department of Computer and Radio Electronic Control and Diagnostics Systems, Deputy Head of the Department of Computer and Radio-Electronic Control and Diagnostics Systems, Electric Machine-Building Faculty; Scientific secretary of the specialized scientific council D 64.050.09 on the specialty 05.11.13 - instruments and methods for monitoring and determining the composition of substances; National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute"; tel.: (050) 137-77-73; e-mail: sngloba@gmail.com.

Слободчук Антон Юрьевич - аспирант кафедры компьютерных и радиоэлектронных систем контроля, электромашино-строительный факультет, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", г. Харьков. тел. : (066) 027-22-48; e mail: slobodchuk_ay@mail.ru.

Slobodchuk Anton Yuryevich - post-graduate department of computer and electronic monitoring and diagnostics, electrical and construction faculty, National Technical University 'Kharkiv Polytechnic Institute', m. Kharkiv; tel. : (066) 027-22-48; e mail: slobodchuk_ay@mail.ru.

Григоренко Игорь Владимирович – кандидат технических наук (2010), доцент (2011); профессор кафедры кафедры информационно-измерительных технологий и систем, заместитель декана по научной работе факультета автоматики и приборостроения; Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"; тел.: (050) 642-75-02; e-mail: grigmaestro@gmail.com.

Hrihorenko Igor Vladimirovich - candidate of technical sciences (2010), associate professor (2011); Professor of the Department of the Department of Information and Measurement Technologies and Systems, Deputy Dean for Research at the Faculty of Automation and Instrument-Making; National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute"; Tel. : (050) 642 75 02; E mail: grigmaestro@gmail.com.

В. А. СВЕТЛИЧНЫЙ, Ю. Е. ХОРОШАЙЛО, М. А. АМПИЛОГОВ**МОДЕЛЬ РЕЗОНАНСНОГО ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТОНКИХ НЕФЕРРОМАГНИТНЫХ ПЛЕНОК**

Тонкие ферромагнитные пленки широко используются в электронике в виде резистивных и емкостных элементов интегральных схем, устройств для записи и хранения информации, хемотронных приборах, в авиационной и космической технике, в оптике, микроволновой технике, применяются в качестве покрытия для защиты от электромагнитного излучения, а также используются в декоративных целях. В работе рассмотрены вопросы теории резонансных вихрековых преобразователей предназначенных для контроля тонких ферромагнитных пленок. Выполнен анализ влияния внутреннего сопротивления источника питания преобразователя и параметров структуры тонких ферромагнитных пленок на входные и выходные параметры и характеристики преобразователя. Выполнено сравнение чувствительности модели резонансного преобразователя с моделью апериодического.

Ключевые слова: возбуждающая, измерительная индукционная катушка, характеристика преобразования, введенный импеданс, функция преобразования, резонансный вихрековый преобразователь.

Тонкие ферромагнитные пленки широко применяются в электронике в виде резистивных и емкостных элементов интегральных схем, устройств для записи и хранения информации, хемотронных приборах, в авиационной и космической технике, в оптике, микроволновой технике, применяются в качестве покрытия для защиты от электромагнитного излучения, а также используются в декоративных целях. В работе рассмотрены вопросы теории резонансных вихрековых преобразователей предназначенных для контроля тонких ферромагнитных пленок. Выполнен анализ влияния внутреннего сопротивления источника питания преобразователя и параметров структуры тонких ферромагнитных пленок на входные и выходные параметры и характеристики преобразователя. Выполнено сравнение чувствительности модели резонансного преобразователя с моделью апериодического.

Ключевые слова: возбуждающая, измерительная индукционная катушка, характеристика преобразования, вносимый импеданс, функция преобразования, резонансный вихрековый преобразователь

Thin non-ferromagnetic films are widely used in electronics in the form of resistive and capacitive elements of integrated circuits, devices for recording and storing information, hemotron devices, in aviation and space technology, in optics, microwave technology, used as coatings for protection against electromagnetic radiation, and also used in decorative purposes. The paper deals with the theory of resonance vibration current converters for the control of thin ferromagnetic films. The analysis of the influence of the internal resistance of the power supply of the converter and the parameters of the structure of thin non-ferromagnetic films on the input and output parameters and characteristics of the converter is performed. A comparison of the sensitivity of a resonant converter model with an aperiodic model is performed

Keywords: excitation, measuring induction coil, transformation characteristic, introduced impedance, transformation function, resonant eddy current converter.

Постановка проблемы. Разнообразие, сложность геометрических форм деталей современного электротехнического оборудования, увеличение электромагнитных нагрузок и связанная с этим необходимость учета нелинейности среды, определяют предельно жесткие требования к точности расчетов электромагнитных полей. Анализ отечественной и зарубежной литературы позволяет констатировать, что для выявления структурных дефектов тонких ферромагнитных пленок вихрековым методом неразрушающего контроля применяются различные разновидности апериодических и резонансных вихрековых преобразователей (ВТП).

Анализ исследований и публикаций. Однако величина внутреннего сопротивления источников питания преобразователей и параметры структуры тонких ферромагнитных пленок, а также их влияние на параметры преобразования, как правило игнорируются [1]. Такое допущение, с нашей точки зрения не совсем корректно и зачастую приводит к рассогласованию экспериментальных и практических данных полученных при дефектоскопии тонких ферромагнитных пленок вихрековым методом. Поэтому в данной работе, так же как и в работе [1], выполнена попытка оптимизации и адекватной доработки теории ВТП с учетом вышеуказанных факторов.

Для выявления чувствительности резонансных

ВТП к структурным дефектам тонких ферромагнитных пленок, в работах [2–3] рассмотрены и проанализированы различные модели резонансных вихрековых преобразователей. Согласно [2], если в колебательный контур включена возбуждающая катушка L_1 , то такой ВТП определяем как – ВТП первого вида, если измерительная катушка L_2 , то второго вида. Кроме того ВТП первого вида могут отличаться схемой питания колебательной цепи – последовательной или параллельной. Таким образом, достаточно рассмотреть три варианта резонансных ВТП: последовательный резонансный ВТП первого вида; параллельный резонансный ВТП первого вида; резонансный ВТП второго вида

Основная часть. В соответствии со схемой показанной на рис. 1 для режима холостого хода, $Z_H = \infty$, и идеального генератора напряжения $E_i = 0$.

Основная характеристика преобразования резонансного ВТП может быть представлена выражением $\dot{P}_1 = U_2 / U_{20} = \dot{F} / (1 + Z_{1BH} / Z_1)$,

где $Z_1 = r_1 + j(\omega L - 1/\omega C)$, – импеданс контура, а r_1 и $(\omega L - 1/\omega C)$ – соответственно, активное и реактивное сопротивление контура последовательно резонансного ВТП первого вида.

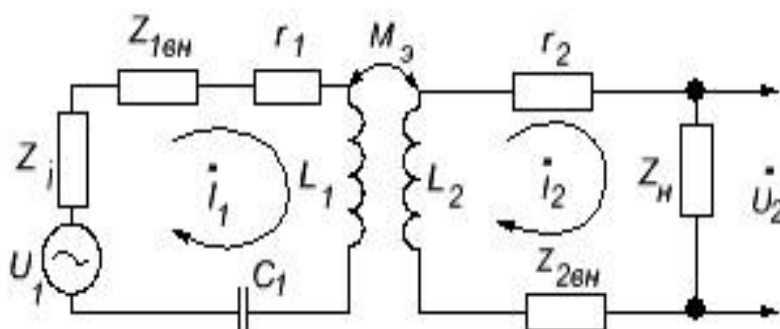


Рис. 1 – Эквивалентная схема последовательного резонансного ВТП первого вида

На резонансной частоте значение частоты значение

$$P_{10} = \dot{F} / (1 + Z_{1BH} / r_1), \quad (1)$$

где $\dot{F}$ – функция преобразования ВТП, рассмотрена нами в работе [3], а Z_{1BH} – вносимый импеданс.

Можно показать, что для данного ВТП справедливо следующее соотношение:

$$Z_{1BH} / r_1 = j \frac{\omega K_1 L_1}{r_1} \phi_1 = j K_1 \phi_1. \quad (2)$$

Так как активные потери в конденсаторе малы по сравнению с потерями в катушке индуктивности L_1 , поэтому добротности катушки и в всего колебательного контура численно равны.

Введем понятие «добротность» ВТП V_1 , под которой будем понимать произведение добротности катушки индуктивности Q_1 , и коэффициента связи K_1 [1],

$$V_1 = K_1 Q_1 = V_{10} e^{-3\alpha_1/2}, \quad (3)$$

где V_{10} – максимальное значение добротности V_1 при $\alpha_1 = 0$, $V_{10} = K_{10} Q_1$.

Подставив (3) в (2) и (1) получим общее выражение для неполной характеристики преобразования

$$P_{10} = \frac{\dot{F}}{1 + j V_1 \phi_1}. \quad (4)$$

Воспользовавшись выражениями $\dot{F}$ и ϕ для первого приближения, после некоторых математических преобразований, для условия $R_1 = R_2 = R$, получим

$$P_{10} = \frac{6\mu^4 \sqrt{9 + j4\beta^2}}{6\mu \sqrt{9 + j4\beta^2} \operatorname{ch}^4 \sqrt{9 + j4\beta^2} + (9\mu^2 + 9 + j4\beta^2) \operatorname{sh}^4 \sqrt{9 + j4\beta^2} + 1} \times \frac{1}{(9\mu^2 + 9 + j4\beta^2) \operatorname{sh}^4 \sqrt{9 + j4\beta^2} + j K_1 Q_1 (9\mu^2 - 9 - j4\beta^2) \operatorname{sh}^4 \sqrt{9 + j4\beta^2}} \quad (5)$$

Чувствительность резонансного ВТП определяется модулем, аргументом и их производными. Анализ большинства встречающихся на практике случаев контроля, когда толщина тонких

неферромагнитных пленок значительно меньше радиуса возбуждающей катушки и глубины проникновения плоской электромагнитной волны $\zeta \ll 1, \zeta \beta \ll 1, \mu = 1, [1, 2]$, показывает что характеристика (5) может быть представлена в более простом виде.

$$P_{10} = \frac{6}{6 + V_1 \gamma + j \gamma}. \quad (6)$$

Модуль и аргумент функции (6) можно представить в следующем виде:

$$P_{10} = \frac{6}{\sqrt{\left(6 + \gamma V_{10} e^{\frac{-3}{2}\alpha_1}\right)^2 + \gamma^2}}, \quad (7)$$

$$\phi_{P0} = -\arcsin(\gamma P_{10} / 6). \quad (8)$$

Представляет интерес проанализировать зависимости модуля P_{10} и аргумента ϕ_{P0} , а также их производных P'_{10} и ϕ'_{P0} , от тех же параметров γ и α_1 как и в [1], для различных значений добротности V_{10} .

Продифференцировав функции (7) и (8) по параметру γ получим значения:

$$P'_{10} = -\frac{6V_1 + \gamma(V_1^2 + 1)}{36} P_{10}^3, \quad (9)$$

$$\operatorname{tg} \gamma'_{P0} = -\frac{1}{6} P_{10}^3. \quad (10)$$

На рис. 2 представлены графики зависимости модуля $P_{10}(\gamma)$ и его производной $P'_{10}(\gamma)$ при различных значениях добротности резонансного преобразователя

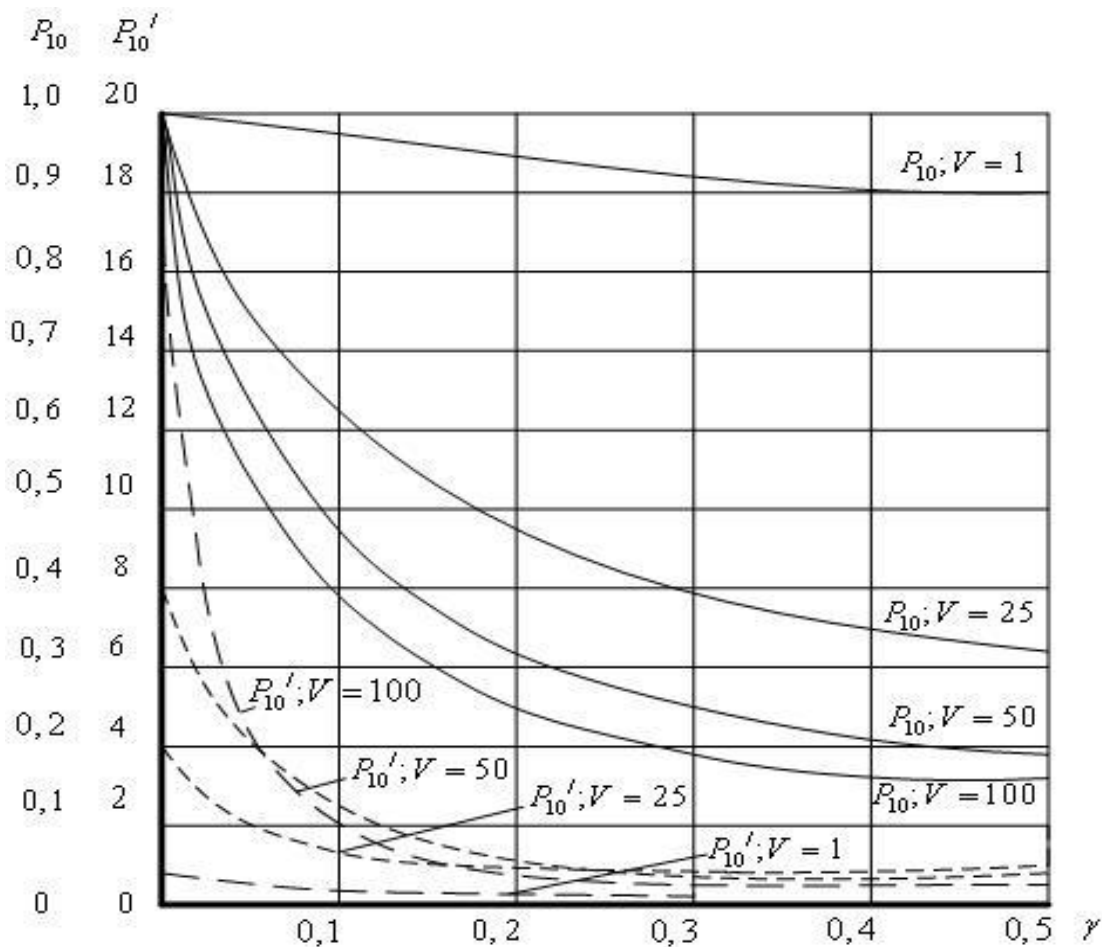


Рис. 2 – Зависимость модуля $P_{10}(\gamma)$ и производной $P_{10}'(\gamma)$ от параметра γ для резонансного ВТП первого вида

Анализ выражений (7) и (9) показывает, что с увеличением значения γ характеристика функции P_{10} уменьшается, т.е. имеет отрицательную производную с максимумом по отрицательному значению при $\gamma = 0$. Согласно (9)

$$\lim_{\gamma \rightarrow 0} P_{10}' = -V_1/6. \quad (11)$$

Численные значения модуля общей характеристики преобразования P_{10} , и аргумента (фазового сдвига), показал, что для резонансного преобразователя следует использовать амплитудный метод выделения полезной информации, который технически проще реализовать чем фазовый метод.

Анализ работы резонансных ВТП в ряде электрических режимов показывает, что включение возбуждающей обмотки ВТП в последовательный или параллельный контуры дает одинаковые функции преобразования, при условии если первый питать от генератора с малым внутренним сопротивлением ($R_i = 0$), а второй - с большим ($R_i = \infty$).

Выводы. Анализ функции преобразования для резонансной системы и апериодической систем, ранее рассмотренной нами в работе [1], показывает, что в рабочей области ВТП, производная функции

преобразования P_{10}' , резонансного ВТП, имеет сравнительно большее значение аналогичной функции для апериодического ВТП [3]. Смещение параметра γ в зону малых величин означает, что для выявления структурных дефектов тонких неферромагнитных пленок с помощью резонансного ВТП, оптимальная частота питающего тока может быть на 1–2 порядка ниже чем апериодического. При этом максимальное значение производной функции преобразования резонансного ВТП, значительно больше аналогичной производной функции преобразования апериодического ВТП. Сравнивая значение (11) и выражения для апериодического ВТП, ранее показанное в работе [1], следует, констатировать, что:

- чувствительность резонансного ВТП определяется его добротностью;

- максимальная чувствительность резонансного ВТП больше чем такая же чувствительность апериодического ВТП в 2 и более раз.

Анализ предельных значений фазы и ее производной выходного сигнала других типов исследуемых резонансных ВТП, рассмотренных нами в [3], показывает, что они не обладают существенно

большей чувствительностью к выявлению дефектов тонких неферромагнитных пленок, при значительно более сложном конструктивном исполнении и настройке в рабочий режим.

Таким образом для выявления структурных дефектов тонких неферромагнитных пленок более эффективно применять последовательный резонансный ВТП первого вида.

Список литературы

1. *Світличний В.А.* Аналіз моделі аперіодичного екранного вихрострумового перетворювача для контролю тонких неферомагнітних плівок / В.А. Світличний, Ю.Е. Хорошайло // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2013. – № 51, – С. 117–125.
2. *Хорошайло Ю.Е.* Вихретоковый контроль тонких электропроводящих пленок и неэлектропроводящих покрытий / Ю.Е. Хорошайло, Г.М. Сучков, В.А. Светличный, В.Н. Ерошников // Монография - Харків: «Щедра садиба плюс», 2014 –с.228.
3. *Світличний В.А.* Резонансна вихрострумова дефектоскопія тонких неферомагнітних плівок :

дисертація на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.11.13 / Світличний Віталій Анатолійович; М-во освіти і науки України, НТУ «ХПІ» ; наук. кер. Хорошайло Ю.Е. – Харків, 2015. – 196 с.

References (transliterated)

1. Svetlychny V.A. Analysis of the model of the aperiodic screen eddy current converter for control of thin non-ferromagnetic films / VA Svetlychny, Yu.E. Good news // Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". - Kharkiv: NTU "KhPI", 2013. – No. 51, - pp. 117-125.
2. Khoroshailo Yu.E. Eddy current control of thin electrically conductive films and non-conducting coatings / Yu.E. Khoroshailo, G.M. Suchkov, V.A. Svetlichny, V.N. Eroschenkov // Monograph - Kharkiv: "Generous Estate Plus", 2014 - 228 p.
3. Svetlychniy V. A. Resonance eddy-current defectoscopy of thin non-ferromagnetic films: a thesis for obtaining sciences. Degree Candidate Tech. Sciences: 05.11.13 / Svitlychniy Vitaliy Anatoliyovich; Ministry of Education and Science of Ukraine, NTU "KhPI"; Sciences Manager Khoroshailo Yu.E. - Kharkiv, 2015. - 196 p.

Поступила (received) 10.06.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Модель резонансного вихрострумового перетворювача призначеного для контролю тонких неферомагнітних плівок / В. А. Світличний, Ю. Є. Хорошайло, М. А. Ампилогов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 4 (1226). – С. 68–71. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-4525.

Модель резонансного вихретокового преобразователя предназначенного для контроля тонких неферомагнитных пленок / В. А. Светличный, Ю. Е. Хорошайло, М. А. Ампилогов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 4 (1226). – С. 68–71. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-4525.

Model of resonant eddy current converter designed for control of thin non-ferromagnetic films / V. A. Svetlichny, Yu. E. Khoroshailo, M.A. Ampilogov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tehnika. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 4 (1226). – P. 68–71.– Bibliogr.: 3. – ISSN 2079-4525.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Світличний Віталій Анатолійович – кандидат технічних наук, викладач кафедри, Харківський національний університет внутрішніх справ, м. Харків; тел.: (057) 739-88-22; e-mail: vit.svet@ukr.net.

Светличный Виталий Анатольевич - кандидат технических наук, преподаватель кафедры, Харьковский национальный университет внутренних дел, г. Харьков. тел. : (057) 739 88 22; e-mail: vit.svet@ukr.net.

Svetlichny Vitaliy Anatolyevich - Candidate of Engineering Science, Lecturer of the department, Kharkiv National University of Internal Affairs, Kharkov. Tel: (057) 739 88 22; E mail: vit.svet@ukr.net.

Хорошайло Юрій Євгеньєвич, кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, тел.: (057)–702–14–22.

Хорошайло Юрий Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, г. Харьков, тел.: (057) 702-14-22.

Khoroshaylo Yury Evgenievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department, Kharkov National University of Radio Electronics, Kharkov, tel. : (057)–702–14–22.

Ампилогов Михайло Олександрович, студент, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, тел.: (057)–702–14–22.

Ампилогов Михаил Александрович, студент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, г. Харків, тел. : (057)–702–14–22.

Ampilogov Mikhail Aleksandrovich, student, Kharkov National University of Radio Electronics, Kharkov, tel.: (057)–702–14–22.

В. А. СВЕТЛИЧНЫЙ, Ю. Е. ХОРОШАЙЛО, О. В. МУЛЯВКА, А. В. СОВА

ОСОБЕННОСТИ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ТОНКИХ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ПЛЕНОК

У результаті вивчення властивостей і структури тонких плівок, показано що властивості і структура плівок значно відрізняється від тих же параметрів об'ємного матеріалу. Фізичні процеси, що відбуваються під час утворення плівок обумовлюють індивідуальну специфіку властивостей і структури. Тому, одним з основних показників якості металевих тонких плівок є відсутність дефектів. У роботі розглянуті питання теорії появи дефектів тонких електропровідних плівок. Виконано аналіз впливу головних електричних параметрів плівок на наявність дефектів структури плівок. Показані інші можливі види дефектів плівок і визначені способи їх виявлення

Ключові слова: тонка електропровідна плівка, товщина і форма плівки, пористість структур, поверхнева щільність островців

В результате изучения свойств и структуры тонких пленок, показано что свойства и структура тонких пленок значительно отличается от тех же параметров объемного материала. Физические процессы происходящие во время образования пленок обуславливают индивидуальную специфику свойств и структуры. Поэтому, одним из основных показателей качества металлических тонких пленок является отсутствие дефектов. В работе рассмотрены вопросы теории появления дефектов тонких электропроводящих пленок. Выполнен анализ влияния главных электрических параметров пленок на наличие дефектов структуры пленок. Показаны иные возможные виды дефектов пленок и определены способы их выявления

Ключевые слова: тонкая электропроводящая пленка, толщина и форма пленки, пористость структур, поверхностная плотность островков

As a result of studying the properties and structure of thin films, it is shown that the properties and structure of films differ significantly from the properties and structure of bulk material of the same composition. The physical processes that occur during the formation of films cause the individual specificity of the properties and structure. Therefore, one of the main indicators of the quality of metallic thin films is the absence of defects. The paper deals with the theory of the appearance of defects in thin electrically conductive films. The analysis of the effect of the main electrical parameters of the films on the presence of defects in the structure of the films is performed. Other possible types of defects of films are shown and methods for their detection

Keywords: thin electroconductive film, film thickness and shape, porosity of structures, surface density of islands

Постановка проблемы. Качество изделий на основе тонкопленочных структур зависит от обеспечения заданных параметров пленок, что связано с необходимостью использования эффективных методов контроля параметров таких структур в процессе производства. Основные требования, предъявляемые к этим методам и приборам: автоматичность, оперативность, не разрушаемость, необходимая точность, надежность контроля.

Всем этим требованиям отвечают электромагнитные и радиоволновые методы неразрушающего контроля. Однако анализ отечественного и мирового рынка приборов неразрушающего контроля показывает отсутствие универсальных приборов позволяющих эффективно контролировать толщину, электропроводность и структуру тонких электропроводящих пленок.

Отдельные разработки и приборы [1 – 5], выполненные на уровне макетов, не отвечают перечисленным выше требованиям. Таким образом существует острая потребность в приборах для измерения параметров тонких электропроводящих пленок (толщиной от 1 мкм и менее) на диэлектрических и металлических основаниях.

Решение данной проблемы должно основываться на комплексном подходе к развитию теории электромагнитных и радиоволновых методов неразрушающего контроля тонкопленочных проводящих структур. Учет микроструктурных особенностей тонких пленок, на основе обобщения их свойств в электромагнитных полях от инфракрасного до высокочастотного диапазонов, позволит реализовать соответствующую разработку теории

проектирования радиоволновых, вихретоковых и емкостных средств неразрушающего контроля. Что в конечном итоге позволит осуществить создание и освоение промышленного выпуска приборов.

Основная часть. Свойства и структура тонких пленок значительно отличается от свойств и структуры объемного материала того же состава. Физические процессы происходящие во время образования пленок обуславливают индивидуальную специфику свойств и структуры. Поэтому, одним из основных показателей качества металлических тонких пленок является отсутствие дефектов. Тонкими принято считать пленки, толщина которых начинается от 1 мкм и менее. [5]. У таких пленок в зависимости от толщины слоя меняется: удельное электрическое сопротивление, температура плавления, степень переохлаждения, по сравнению с массивными объектами, что определяет значительную плотность дефектов структуры. Последние прямо пропорционально зависят от физической толщины пленок. Зачастую пленка в действительности не является сплошной, а состоит из большого количества малых островков, расположенных близко друг к другу. Совокупность островков в практическом применении выглядит как сплошная пленка, однако, система проявляет иные свойства и дефекты структуры [5].

В соответствии с теорией зародышеобразования и наблюдений с помощью электронных микроскопов, процесс рождения и роста пленки включают в себя следующие этапы: [6-8]: появление адсорбированных атомов; образование субкритических кластеров разного размера; образование кластеров критического

размера (этап зародышеобразования); рост этих кластеров до сверхкритических размеров с результирующим обеднением атомами зон захвата вокруг них; образование критических зародышей на площадях не обедненных атомами; зародыши соприкасаются друг с другом и срастаются, образуются новые островки, занимающие площадь меньше, чем сумма площадей объединившихся зародышей, это приводит к увеличению свободной поверхности подложки; атомы адсорбируются на этих освободившихся участках и в результате наступает процесс «вторичного» образования зародышей; большие островки срастаются, оставляя каналы или полости в пленке; каналы и полости заполняются в результате вторичного зародышеобразования и в результате образуется сплошная пленка [9].

В зависимости от стадии завершения процесса образования пленки могут быть мелкозернистыми островковыми, крупнозернистыми островковыми, сеточными и пористыми, сплошными.

В общем случае свойства пленки определяются как внешней так и внутренней структурой (кристаллическое строение островков, размеры кристаллитов, тип кристаллической решетки, наличие дефектов, примесей в островках и т. д.). Анализ известной литературы показывает, что в настоящее время нет однозначного инженерного описания электрофизических свойств и структуры тонких пленок. Работы в этой области отражают экспериментальные исследования свойств и структуры пленок и попытки их интерпретации с помощью различных теорий.

Для получения тонких плёнок используется множество разнообразных методов: химическое осаждение, пиролитическое разложение, электролиз, катодное распыление, термовакuumное распыление. Для получения высокочистых плёнок наиболее эффективным является последний метод. Подложка пленки и испаритель помещаются в вакуумную систему, в которой осуществляется напыление [6, 9].

Главным электрическим параметром тонкой пленки является электрическое сопротивление, и оно непосредственно зависит от толщины пленки [9], (рис. 1).

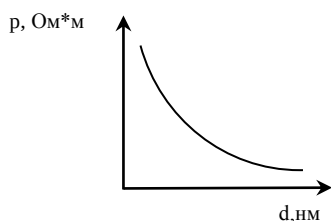


Рис. 1 – Электрическое сопротивление металлических пленок

При этом следует учитывать, что характер размерных зависимостей определяется условиями и методикой измерения, например температурой материала или напряженностью электрического поля (при определении электрофизических свойств).

Главными геометрическими параметрами тонкой

пленки являются толщина и форма пленки. В общем случае, тонкую пленку можно рассматривать как среду, ограниченную двумя поверхностями Z_1 и Z_2 . Однако, участки поверхностей Z_1 и Z_2 в общем случае могут и совпадать (на этих участках покрытие отсутствует).

Выполненный анализ работ [6-10] показывает, что для практического контроля структуры тонких пленок необходимо и достаточно контролировать следующие основные параметры: геометрическая и эффективная толщина пленки; пористость структуры (поверхностная плотность островков), адгезия пленки к подложке.

Под понятием геометрической толщины пленки понимают [9]:

$$d_{\text{пленки}} = \frac{1}{S_0} \int (Z_1 - Z_2) dS \quad (1)$$

где S_0 – площадь поверхности подложки, Z_1 – поверхность пленки, Z_2 – поверхность материала подложки,

dS – дифференциальный элемент этой поверхности.

Геометрическую толщину пленки измерить достаточно сложно. На практике, чаще используется понятие эффективной толщины. Эффективная толщина – это толщина однородного слоя вещества, обладающего теми же свойствами, что и реальная тонкая пленка.

Для определения эффективной толщины пленки известны следующие методы: микровзвешивание, электрический способ, оптические методы и т.д.

Метод микровзвешивания состоит в определении приращения массы подложки после нанесения на нее пленки. При измерении толщины пленки микровзвешиванием допускают, что плотность нанесенного вещества равна плотности массивного вещества. Метод достаточно прост, но требует, чтобы форма и структура материала подложки была однородной, а ее поверхность очищена от загрязнений. Кроме того, на точность измерений влияет удельная масса нанесенного материала, которая может изменяться в зависимости от условий технологических режимов (остаточного давления, загрязнений молекулами газа и др.) [9].

При определении толщины электрическим способом с помощью измерения сопротивления нанесенной пленки допускают, что удельное сопротивление пленки равно удельному сопротивлению массивного металла. В этом случае под эффективной толщиной пленки понимают ту толщину, которую имел бы слой, если бы удельное сопротивление его было равно удельному сопротивлению массивного металла.

Оптические методы определения толщины, основаны на исследовании таких параметров, как коэффициенты отражения и прозрачности, фазовые сдвиги вносимые присутствием пленки, угловые зависимости этих сдвигов и т. п. Исходя из

выбранного оптического параметра, определяют эффективную толщину пленки. В общем случае, эффективная толщина и оптическая толщина совпадают, когда пленка сплошная и однородная. В противном случае, при измерении толщины одной и той же пленки получаются разные значения [8-10].

Однако, перечисленные методы являются косвенными и приближенными, так как не позволяют определить толщину пленки с приемлемой точностью, если не используются громоздкие и трудоемкие вычисления и графические построения.

Допущения о соответствии параметров пленки (плотности, удельного сопротивления, оптических свойств) параметрам массивного металла справедливо только для толстых непрозрачных слоев, а для более тонких пленок эти параметры являются функцией толщины и зависят от условий образования пленки. Таким образом, значение полученное любым из приведенных выше способов, будет отличаться от значения «истинной» толщины. Кроме того, значения эффективных толщин тонкой пленки, полученные различными методами, также будут отличаться. При этом не один из них не способен выявлять и контролировать однородность структуры пленки.

Под понятием пористости структуры (поверхностной плотности островков) принято понимать среднюю плотность $n_0 = \frac{N_{\text{п}}}{S_{\text{п}}}$, (2)

где $N_{\text{п}}$ – число островков, $S_{\text{п}}$ – площадь островков.

Адгезия пленки к подложке также является очень важной характеристикой определяющей долговечность и надежность покрытия. Прочность или величину адгезии, в общем виде можно охарактеризовать работой, необходимой для отделения пленки покрытия. Простой и эффективный метод определения величины адгезии заключается в наложении на поверхность пленки специальной испытательной липкой ленты для последующего исследования процесса отрыва. При слабой адгезии лента отрывается от подложки вместе с пленкой, при сильной – пленка остается полностью на подложке. Для количественной оценки адгезии применяют метод липкой ленты и метод царапания иглой под определенной нагрузкой, методы имеют ряд методических сложностей.

Величина адгезии очевидно определяется природой связи частиц пленки и подложки. Физическая адсорбция определяет слабую адгезию, а хемосорбция – сильную. Активные по отношению к кислороду металлы образуют химические связи с подложками, например со стеклом, что приводит к повышению адгезии. Для повышения адгезии нередко специально наносят подслои окисла, современные технологии позволяют также осуществлять плавный

переход состава пленки от окисла до чистого металла, что может обеспечить максимальную адгезию.

Таким образом влияние вышеперечисленных параметров на этапе рождения и роста тонких пленок может вызывать следующие разновидности дефектов [11]:

- Точечные дефекты – их размеры соизмеримы с периодом решетки вещества. К ним относятся межузловые атомы, примеси замещения/внедрения, вакансии, кластеры и их скопления.
- Линейные дефекты – цепочки точечных дефектов, дислокации (полное или частичное отсутствие цепочек атомов), двойниковые дислокации, зерноограниченные дислокации, межфазные дислокации.
- Поверхностные дефекты – это дефекты границы двойников и зерен, межфазные границы и поверхности пленки.
- Объемные дефекты – поры, трещины, включения других фаз.

Указанные дефекты возможно обнаружить визуально с помощью специализированных электронных микроскопов, к которым относятся: просвечивающий электронный микроскоп, растровый электронный микроскоп, атомный силовой микроскоп, сканирующий туннельный микроскоп.

С помощью просвечивающего электронного микроскопа высокого разрешения выявляют точечные, линейные дефекты, поры и трещины. Применяя растровый электронный микроскоп (рис. 2), атомный силовой микроскоп, сканирующий туннельный микроскоп, выявляют дислокации, поры, трещины, включения других фаз и т.д.



Рис. 2 – Растровый электронный микроскоп РЭМ-106И

Для получения интегральной оценки наличия дефектов в пленке используют рентгеновский дифракционный анализ. Однако, в условиях производства при формировании из поверхностей тонких пленок законченных узлов, деталей и электронных схем, применять для контроля поверхностей электронные микроскопы не

рационально из-за их сложности, трудоемкости и сложности автоматизации технологического процесса выявления дефектов.

Выводы. Для качественной оценки таких дефектов применяются методы разрушающего контроля и неразрушающего контроля. Основными достоинствами всех разновидностей первого метода является то, что они позволяют непосредственно и при этом, количественно оценить контролируемые параметры объекта, например размеры и местоположение нарушения сплошности. [1, 5, 9-12]. При этом действия вызывают повреждение либо разрушение тонких пленок, что не позволяет гарантировать качество всего количества контролируемой продукции, так как осуществляется выборочно и связь результатов контроля с качеством продукции статистическая. Кроме того, такие методы требуют предварительной, как правило ручной подготовки изделия и не подразумевают автоматизации. Поэтому все виды разрушающего контроля неэффективны, малопроизводительны и в условиях промышленного производства экономически нецелесообразны.

Вторая группа методов контроля обеспечивает – неразрушающий контроль надежности основных рабочих свойств и параметров объекта или отдельных его элементов, узлов, не требует выведения объекта из работы либо его демонтажа [1, 5]. Производительность методов неразрушающего контроля значительно более высокая и они всегда автоматизированы.

К главным *достоинствам* видов неразрушающего контроля относятся:

- осуществление контроля всей партии электропроводящих тонких пленок;
- осуществление контроля в процессе их изготовления и эксплуатации;
- возможность многопараметрового контроля;
- большая скорость выполнения контроля, дистанционность, возможность осуществления контроля в любых условиях и т.д.

Перечисленные преимущества определяют широчайшее распространение видов неразрушающего контроля в технике.

К главным *недостаткам* НК относятся:

- отсутствие во многих случаях, прямой связи результатов контроля с параметрами тонких пленок (т.к. выполняются косвенные измерения);
- не всегда возможно определить срок службы контролируемых изделий из тонких пленок (из-за отсутствия контроля разрушающих факторов);
- часто требуется настройка, калибровка на специальных (контрольных) образцах и исследование рабочих условий для интерпретации результатов контроля.

В зависимости от используемых физических явлений и природы зондирующих полей, согласно действующему стандарту [13] неразрушающий

контроль принято подразделять на 9 обособленных видов: визуально-оптический, проникающими веществами, магнитный, ультразвуковой, электрический, радиоволновой, тепловой, радиационный и вихрековый. Однако, наличие неоднородности структуры пленок не позволит: упростить граничные условия при решении задач электродинамики, избавиться от необходимости расчета полей внутри пленок, получить приемлемые аналитические выражения для вносимых параметров пленок, учесть отстройку от мешающих факторов. В результате, реально пригодными для автоматизации контроля электропроводящих пленок можно признать методы неразрушающего контроля базирующиеся на использовании электромагнитных полей от инфракрасного до СВЧ – диапазонов. Данным требованиям соответствуют емкостные, радиоволновые, вихрековые и частично оптические методы неразрушающего контроля.

Наибольшую результативность по выявлению дефектов структуры пленок обеспечивают вихрековые резонансные методы, особенно для материалов с малым электрическим сопротивлением. Для контроля измерения параметров тонкопленочных структур со значительно большим электрическим сопротивлением вихрековые методы непригодны из-за необходимости использования частот выше 100 МГц, что технически сложно реализовать [11]. Для контроля параметров таких структур целесообразно использовать радиоволновые и емкостные ВЧ-методы контроля. Таким образом, можно констатировать, что комбинация вихрековых, радиоволновых и емкостных методов позволяет создавать как универсальные так и узко специализированные приборы для измерения толщины и контроля дефектов тонких электропроводящих пленок.

Список литературы

1. Учанин В. Н. Автогенераторные вихрековые дефектоскопы: основные принципы, классификация, сравнительный анализ (обзор) / В. Н. Учанин // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2010. – № 2. – С. 18 – 23.
2. Федосенко Ю. К. Становление, современное состояние и перспективы развития вихрекового контроля / Ю. К. Федосенко // Контроль. Диагностика. – 2005. – № 5. – С. 71 – 75.
3. Учанин В. Н. Развитие вихрековых методов контроля: задачи, решения, перспективы / В. Н. Учанин // Матеріали V Національної науково-технічної конференції виставки «Неруйнівний контроль та технічна діагностика» (НКТД-2006). – К., 2006. – С. 46 – 54.
4. Ю. К. Федосенко, В. Ф. Мужижкий // В мире неразрушающего контроля. – 2007. – № 2. – С. 4 – 9.
5. Светличный В. А. Некоторые вопросы построения вихрековой аппаратуры неразрушающего контроля / В. А. Светличный // Збірник тез доповідей 3-ої науково-практичної конференції «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання», м. Івано-Франківськ, 29-30 листопада 2011 р. ; ФЕ і ІВТ, ІФНТУНГ. – Івано-Франківськ, 2011. – С. 134–136.
6. Куров Г. А. Кинетика образования сквозных макроскопических пор в тонких пленках и пленочных структурах / Г. А. Куров,

- Э.А. Жильков, В.М. Дубодель // Физика твёрдого тела. 1974, т. 16, №10, с. 2873-2878.
7. Куров Г.А. Макроскопические дефекты в тонких металлических пленках / Г.А. Куров, Э.А. Жильков, В.М. Дубодель // Доклады академии наук СССР. 1974, т. 219, №3, с. 582-585.
 8. Дукаров С.В. Влияние температуры на рост пор в поликристаллических плёнках легкоплавких металлов / С.В. Дукаров, С.И. Петрушенко, В.Н. Сухов, И.Г. Чурилов // Вопросы атомной науки и техники. – Харьков : Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», 2014. – № 1(89), – С. 110–114.
 9. Светличный В. А. Показатели качества металлических тонких пленок / В. А. Светличный // Наука сегодня: теория, методология, практика/ Naukadziś: teoria, metodologia, praktyka.; сборник научных докладов междунар. науч.-техн. конф. «Naukadziś: teoria, metodologia, praktyka», 28.09.2013 – 30.09.2013. – Wrocław : Wydawca: Sp. z o.o. Diamondtradingtour, 2013. – С. 60–61.
 10. Светличный В. А. Некоторые особенности применения вихревого метода неразрушающего контроля / В. А. Светличный, Ю. Е. Хорошайло, В. М. Райков // Экономика, наука, производство: сборник научных трудов. – М.: Издательство ФГБОУ ВПО «Московский государственный открытый университет имени В.С. Черномырдина», 2011. – № 24. – С. 137–141.
 11. Світличний В.А. Резонансна вихвострумова дефектоскопія тонких неферромагнітних плівок : дисертація на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.11.13 / Світличний Віталій Анатолійович; М-во освіти і науки України, НТУ «ХПІ»; наук. кер. Хорошайло Ю.Е. – Харків, 2015. – 196 с.
 12. Хорошайло Ю.Е. Вихревой контроль тонких электропроводящих пленок и неэлектропроводящих покрытий / Ю. Е. Хорошайло, Г. М. Сучков, В. А. Светличный, В. Н. Ерошенко // Монография - Харків: «Шедра садиба плюс», 2014 – 228 с.
 13. Контроль неруйнівний. Терміни та визначення: ДСТУ 2865-94; чинний від 1996-01-01. – К. : Держстандарт України, 1995. – 52 с.
- equipment", Ivano-Frankivsk, November 29-30, 2011; m. Ivano-Frankivsk, 30 листопада 2011 р. ; ФЕ і IBT, ІФНТУНГ. - Ivano-Frankivsk, 2011. -pp. 134-136.
6. Kurov G. A. Kinetics of the formation of through macroscopic pores in thin films and film structures / G. A. Kurov, E. A. Zhilkov, V. M. Dubodel // Physics of a solid. 1974, Vol. 16, No. 10, pp. 2873-2878.
 7. Kurov G. A. Macroscopic defects in thin metal films., E. A. Kurov, V. M. Zhilkov, V. M. Dubodel // Reports of the Academy of Sciences of the USSR. 1974, Vol. 219, No. 3, pp. 582-585.
 8. Dukarov S. V. Influence of temperature on the growth of pores in polycrystalline films of low-melting metals / S. V. Dukarov, S. I. Petrusenko, V. N. Sukhov, I. G. Churilov // Questions of Atomic Science and Technology. - Kharkov: National Science Center "Kharkiv Physical-Technical Institute", 2014. - No. 1 (89), - pp. 110 - 114.
 9. Svetlichny V. A. Quality indices of metallic thin films / V. A. Svetlichny // Science Today: Theory, Methodology, Practice / Naukadziś: teoria, metodologia, praktyka.; a collection of scientific papers of the international. Scientific-techn. Conf. "Naukadziś: teoria, metodologia, praktyka", September 28, 2013 - September 30, 2013. - Wrocław: Wydawca: Sp. Z o.o. Diamondtradingtour, 2013. - pp. 60-61.
 10. Svetlichny V. A.. Some features of the eddy current method of nondestructive testing / V. A. Svetlichnyi, Yu. E. Khoroshaylo, V. M. Raikov // Economics, science, production: a collection of scientific papers. - Moscow: Publishing house FBBOU HPE "Moscow State Open University named after B. C. Chernomyrdin", 2011. - No. 24. - pp. 137-141
 11. Svitlichny V. A. Resonant eddy current flaw detection of thin non-ferromagnetic films: dissertation for the scientific degree of candidate of technical sciences: 05.11.13 / Svetlichnyi Vitaliy Anatolevich; Ministry of Education and Science of Ukraine, NTU "KhPI"; Supervisor of studies Khoroshaylo Yu.E. - Kharkov, 2015. - 196 p.
 12. Khoroshaylo Yu. E. Eddy current control of thin electrically conductive films and non-conductive coatings / Yu. E. Khoroshaylo, G. M. Suchkov, V. A. Svetlichny, V. N. Eroschenkov // Monograph - Kharkiv: "Shedra Sadiba Plus", 2014 - 228 p.
 13. Non-destructive testing. Terms and definitions: DSTU 2865-94; Valid from 1996-01-01. - Moscow: State Standard of Ukraine, 1995. – 52 p.

References (transliterated)

Поступила (received) 11.05.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Особенности выявления дефектов тонких электропроводящих пленок / В. А. Светличный, Ю. Е. Хорошайло, О. В. Мулявка, А. В. Сова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 4 (1226). – С. 72–77. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2079-4525.

Особливості виявлення дефектів тонких електропровідних плівок / В. А. Світличний, Ю. Є. Хорошайло, О. В. Мулявка, А. В. Сова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 4 (1226). – С. 72–77. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2079-4525.

Features of the detection of defects in thin electrically conductive films / V. A. Svetlichnyi,

Yu. E. Khoroshaylo, O.V. Mulyavka, A.B. Sova // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tehnika. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 4 (1226). – P. 72–77. – Bibliogr.: 13. – ISSN 2079-4525.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Світличний Віталій Анатолійович – кандидат технічних наук, викладач кафедри, Харківський національний університет внутрішніх справ, м. Харків; тел.: (057) 739-88-22; e-mail: vit.svet@ukr.net.

Светличный Виталий Анатольевич - кандидат технических наук, преподаватель кафедры, Харьковский национальный университет внутренних дел, г. Харьков. тел.: (057) 739 88 22; e mail: vit.svet@ukr.net.

Svetlichny Vitaliy Anatolyevich - Candidate of Engineering Science, Lecturer of the department, Kharkiv National University of Internal Affairs, Kharkov. Tel: (057) 739 88 22; E mail: vit.svet@ukr.net.

Хорошайло Юрій Євгенович, кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри, Харківський національний університет радіоелектроніки, г. Харків, тел.: (057)–702–14–22.

Хорошайло Юрий Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, м. Харьков, тел.: (057) 702-14-22.

Khoroshaylo Yury Evgenievich, Candidate of Engineering Science, Associate Professor, Professor of the Department, Kharkov National University of Radio Electronics, Kharkov, tel.: (057)–702–14–22.

Мулявка Олег Владиславович, студент, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, тел.: (057)–702–14–22.

Мулявка Олег Владиславович, студент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, г. Харків, тел.: (057)–702–14–22.

Mulyavka Oleg Vladislavovich, student, Kharkov National University of Radio Electronics, Kharkov, tel.: (057)–702–14–22.

Сова Анна Василівна, кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри вищої математики, Харківський національний університет радіоелектроніки, г. Харків, тел.: (057)–702–13–72.

Сова Анна Васильевна, кандидат технических наук, профессор кафедры высшей математики, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, м. Харьков, тел.: (057) 702-13-72.

Sova Anna Vasilevna, Candidate of Engineering Science, Associate Professor, Professor of the Department higher, mathematics Kharkov National University of Radio Electronics, Kharkov, tel.: (057)–703–13–72.

УДК 004.05

Л. В. ГОЛОВКИНА, А. О. МАРТЫНОВ, А. В. ТИХОНЕНКО

УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМАМИ НА ESP

Рішенням задачі для створення системи автоматизованого управління є вибір оптимального типу модулів ESP, визначення способу підключення компонентів системи з урахуванням WiFi і використання одноплатного комп'ютера в якості сервера і сховища мультимедійних файлів, вибору і використання програмного середовища. В якості апаратного рішення був обраний модуль ESP-12-E, в якості програмного рішення використовувалась система домашньої автоматизації MajorDoMo, розгорнута на одноплатному комп'ютері Orange PI.

Ключові слова: ESP, MajorDoMo, Orange PI, автоматизація систем, WiFi, PHP.

Решением задачи для создания системы автоматизированного управления является выбор оптимального типа модулей ESP, определение способа подключения компонентов системы с учетом WiFi и использования одноплатного компьютера в качестве сервера и хранилища мультимедийных файлов, выбора и использования программной среды. В качестве аппаратного решения был выбран модуль ESP-12-E, в качестве программного решения использовалась система домашней автоматизации MajorDoMo, развернутая на одноплатном компьютере Orange PI.

Ключевые слова: ESP, MajorDoMo, Orange PI, автоматизация систем, WiFi, PHP.

Solution of the task of creating an automated control system is the selection of the optimal type of ESP modules, the definition of ways to connect the system components based on WiFi and use of single board computer as a server, and storage of multimedia files, selection and use of the software environment. The ESP-12-E module was chosen as a hardware solution. To this module has been connected relay module, and four-buttons keyboard for control subsystems. As a software solution has been used home automation system MajorDoMo, deployed on Orange PI single-board computer. In result of our work we have a fully automated lighting system, and video surveillance system, what controlled with web-interface.

Keywords: ESP, MajorDoMo, Orange PI, system automation, WiFi, PHP.

Введение. Существующий подход к решению задачи создания системы автоматизированного управления осуществляется на базе различных аппаратно-программных средств, одним из которых является применение современных модулей ESP с соответствующим выбором программного обеспечения.

Задача объединения нескольких компонентов в единую систему для управления различным оборудованием с использованием единого интерфейса при помощи любого мобильного устройства через Wi-Fi являлась основной для реализации и программирования.

Реализация проекта зависит от необходимости

установки в конкретном помещении управляемого оборудования. Не является обязательной централизация управления, а преимущественно рекомендуется использовать принцип децентрализации, когда за работу отдельных «замкнутых» систем отвечает один модуль ESP и специализированное оборудование, а центральный модуль на базе, например, MajorDoMo выполняет функции отображения текущих режимов, а также установки оптимальных параметров функционирования этих систем. При выходе из строя основного контроллера MajorDoMo, все системы будут работать в штатном режиме, но с потерей контроля более высокого уровня, направленного на оптимизацию параметров работы.

Модули ESP8266 – это дешевое решение для построения системы управления и домашней автоматизации с использованием WiFi. Данные модули являются альтернативой различным дорогим решениям.

Для работы в качестве самостоятельного контроллера ESP8266 имеет мало ресурсов и его прошивку необходимо дорабатывать. Программирование ESP-модулей довольно трудоемкий процесс, который решается с использованием уже готовых программных платформ. Несмотря на все перечисленное, ESP8266 имеют большие перспективы для автоматизации.

Анализ основных достижений и литературы. В статьях [1, 2] была представлена общая структура модуля ESP с последующей его настройкой и возможностью его подключения к сети WiFi для автоматизации систем.

В работе [3] было указано о возможности использования открытой программной платформы MajorDoMo для взаимодействия с модулем ESP-12-E.

В качестве аппаратного решения для управления освещением и климат-компонентами на объекте рекомендовано использовались модули ESP-12-E с максимально выведенными GPIO. Миниатюрные WiFi модули ESP отличаются возможностью поддержки WiFi протоколов 802.11 b/g/n; наличием WiFi Direct (P2P), soft-AP; наличием встроенного стека TCP/IP; наличием встроенного TR переключателя, balun, LNA, усилителя мощности, встроенного PLL, регуляторов, системы управления питанием.

Именно такие модули следует использовать для автоматизации и управления системами.

Цель и задачи исследования. Целью данного исследования является подбор оптимального оборудования и программного обеспечения (ПО). Для решения задачи создания системы автоматизированного управления необходимо выбрать определенный тип модулей ESP, определить способ подключения компонентов системы с учетом Wi-Fi соединения и использования одноплатного компьютера в качестве сервера и хранилища мультимедийных файлов, а также выбрать наиболее подходящую программную среду.

Методы решения задач. У модулей ESP8266 есть мощные встроенные возможности и порты ввода-

вывода (GPIO), которые позволяют объединить его с различными датчиками и другими специальными устройствами, нуждающимися в сетевом обмене данными.

Технические характеристики модуля ESP-12-E:

- выходная мощность +20.5 дБм в режиме 802.11b;
- поддержка внешних антенн;
- SDIO 2.0, SPI, UART;
- STBC, 1×1 MIMO, 2×1 MIMO;
- A-MPDU & A-MSDU aggregation & 0.4μs guard interval;
- количество GPIO: 13;
- Flash память размером 512 кб;
- RAM данных 80 кб;
- RAM инструкций – 32 кб;
- пробуждение и отправка пакетов за время до 22 мс;
- номинальное напряжение: 3,3 В;
- входное напряжение: 3,7–20 В;
- максимальный потребляемый ток: 220 мА.

Для работы модуля необходим «большой» ток, а преобразователи USB/UART не обеспечивают им данный модуль, было решено использовать внешнее питание. Модуль в режим загрузки прошивки вводился подключением кнопки RESET и установкой перемычки GPIO0 на землю [3].

Для управления системами было решено использовать четырехканальный модуль реле, управляемый непосредственно с выводов микроконтроллера.

Технические характеристики модуля реле:

- ток срабатывания: 15–20 мА при напряжении 5 В;
- 5 В TTL управляющий вход, который может быть подан напрямую с выхода микроконтроллера;
- коммутирующая нагрузка 10 А при 250 В;
- размеры 4.9 см x 5.1 см x 1.8 см.

Как видно из схемы (рис.1), микроконтроллер осуществляет управление реле через следующие выводы:

- D6 (GPIO12);
- D0 (GPIO16);
- D1 (GPIO5);
- D2 (GPIO4).

К реле, в свою очередь были подключены диоды, имитирующие работу системы освещения в нашем макете коттеджа. Подключение диодов производится на нормально разомкнутые контакты реле.

Для управления освещением в ручном режиме для макета коттеджа было решено использовать четырёхкнопочную клавиатуру. Данная клавиатура подключена к модулю ESP через следующие выводы:

- D7 (GPIO13);
- D8 (GPIO15);
- RX (GPIO3);
- TX (GPIO1);
- GND.

Для развёртки сервера было решено использовать одноплатный компьютер Orange PI.

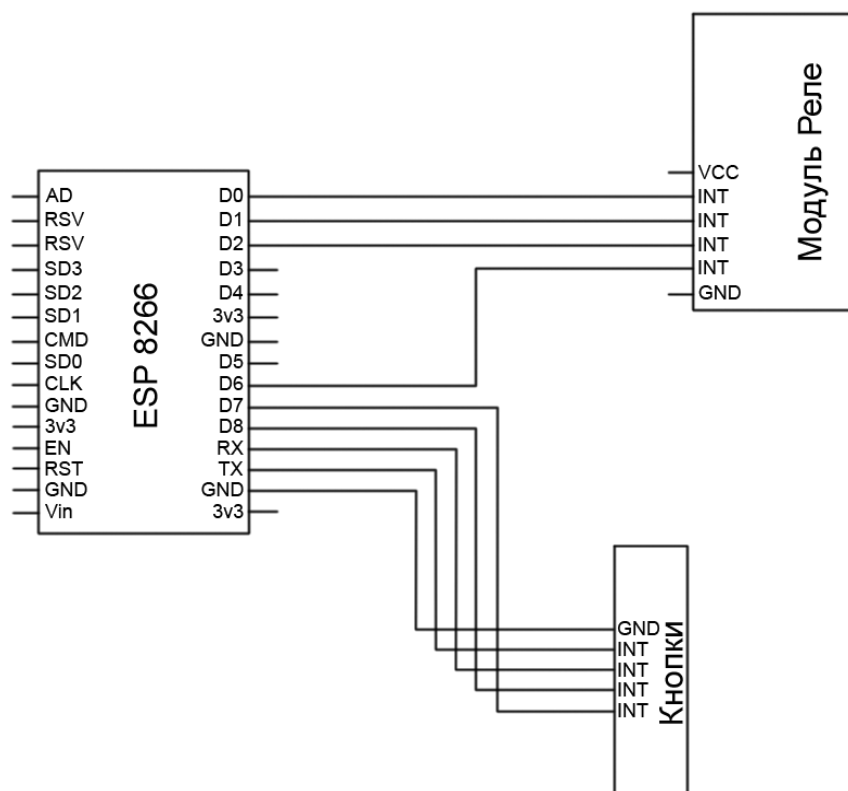


Рис. 1 – Схема подключения модулей

Характеристики данного компьютера:

- процессор: H3 четырехъядерный процессор Cortex-A7 H.265/HEVC 4 K
- GPU: Mali400MP2 GPU @ 600 мГц. поддерживает OpenGL ES 2.0
- оперативная память (SDRAM): 1 Гб DDR3 (совместно с GPU)
- память программ (MMC): micro-SD (макс. 64 Гб)/MMC
- сетевой интерфейс: 10/100 Ethernet RJ45
- видео вход: В CSI входной разъем камеры: поддерживает 8-битные YUV422 CMOS. поддерживает CCIR656 протокола для NTSC и PAL поддерживает видео захват 1080 P @ 30 fps
- аудио вход: Микрофон
- видео выходы: поддержка HDMI выход с поддержкой HDCP
- аудио выход: 3.5 мм разъем и HDMI
- источник питания: вход постоянного тока, USB OTG вход питание не поддерживает
- USB 2.0 порты: три USB 2.0 Host, USB 2.0 OTG
- кнопки: кнопка питания,
- порты ввода/вывода: 40-контактный разъем, совместимый с Raspberry Pi B +
- поддерживаемые ОС: Android lubuntu, debian
- размеры платы: 85 мм × 55 мм
- вес: 38 г

В качестве программной среды использовалась система домашней автоматизации MajorDoMo (Major

Domestic Module или Главный Домашний Модуль) которая представляет собой бесплатную и открытую программную платформу для комплексного управления домашней автоматикой, а также для информационной поддержки жизнедеятельности. Данная система может быть установлена практически на любой персональный, либо одноплатный компьютер (на платформе Windows и Linux) и не требовательна к ресурсам.

Одним из основных преимуществ MajorDoMo является возможность одновременной работы с оборудованием различных стандартов и от разных производителей

В качестве основного языка для программирования сценариев в MajorDoMo используется язык программирования PHP. На этом языке пишутся сценарии реакции системы на различные события, а также с помощью этого языка можно писать собственные модули и расширения. Кроме основных конструкций языка, в системе существует библиотека собственных функций, которые может быть более удобно использовать для автоматизации каких-то процессов. В дополнение к встроенным в систему функциям, можно создавать свои, "пользовательские" функции на языке PHP. Также, для удобства тех, кто слабо знаком с программированием в систему интегрирована возможность визуального программирования на основе Google Blockly.

В рамках данной программной среды в веб-интерфейсе, на визуализации планировки, были размещены и запрограммированы кнопки для включения света в доме.

Результаты исследований. Для проверки изложенных подходов по применению модулей ESP для управления системами был разработан макет, имитирующий коттедж, с подсистемами управления освещением, климат-контролем и мультимедийными данными. Также, при помощи программы ArchiCAD была создана трёхмерная модель, основанная на планировке коттеджа для его визуализации и внедрения данной модели в веб-интерфейс, для упрощения ориентации пользователя в управлении подсистемами.

На языке PHP был написан код, позволивший создать собственные модули и расширения, а также скорректировавший поведение существующих сценариев (рис. 2). В дополнение ко всему, были написаны get-запросы (рис. 3), необходимые для получения информации периферийных устройств.

```
1 $status=$this->getProperty("status");
2 if ($status) {
3     $this->callMethod('turnOff');
4 } else {
5     $this->callMethod('turnOn');
6 }
```

Рис. 2 – Функция «реле» для инициализации переключателей

```
1 getURL('http://192.168.3.100/gpioout?st=1&pin=16', 1);
```

Рис. 3 – Get-запрос получающий сигнал включения для GPIO16

Данный функционал позволит полноценно управлять подсистемами коттеджа из любой его части.

Так же в проекте используется IP-камера D-Link DCS-932L для наблюдения за коттеджем..

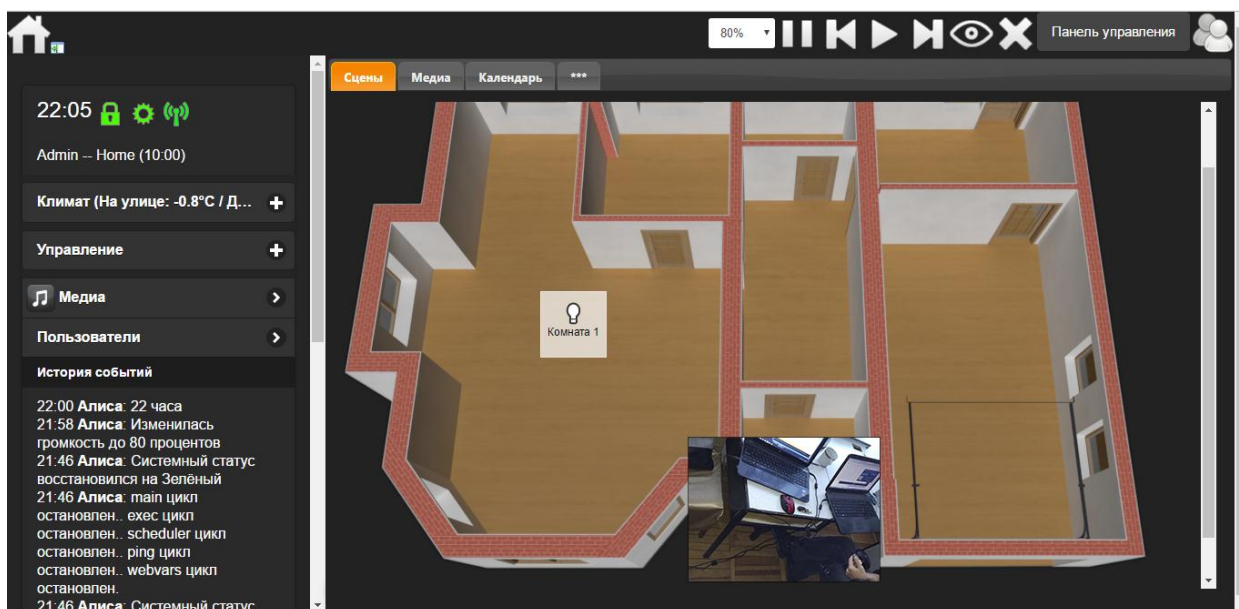


Рис. 4 – Веб интерфейс программы.

Данная камера обладает рядом качеств, таких как поддержка большого количества сетевых протоколов, встроенным сетевым интерфейсом, поддержкой беспроводного соединения, инфракрасной подсветкой и т.д.

Изображение с камеры передаётся в веб-интерфейс (рис.4) и отображается прямо на планировке дома.

Доступ к системе осуществлялся по адресу [http://\[адрес сервера\]/](http://[адрес сервера]/), с мобильного телефона по адресу [http://\[адрес сервера\]/menu.html](http://[адрес сервера]/menu.html).

Выводы. Полученные результаты подтверждают выбор оптимального оборудования и программного обеспечения. Все компоненты системы подключались к ESP-12-E управляемому с сервера, развёрнутого на Orange PI посредством WiFi соединения. Количество компонентов в системе определялось количеством выводов (GPIO) на модуле ESP. Для увеличения

количества подключаемых компонентов, планируется увеличить количество используемых модулей ESP, или задействовать GPIO одноплатного компьютера.

Список литературы

1. Черненко В. Особенности программирования микроконтроллеров с WiFi модулем на примере микроконтроллера ESP8266 от Espressif / Черненко В. // CHIP NEWS Украина – 2016 – №9, вып. 159 – С. 20-23.
2. WiFi модуль ESP6288 ESP07 для домашней автоматизации, 23 февраля 2015. – Режим доступа: <http://mysku.ru/blog/ebay/30626.html>. – Дата обращения: 2 ноября 2016.
3. MajorDoMo и другие, 3 июня 2016. – Режим доступа: <https://wiki-iot.com/?m=wiki&id=24>. – Дата обращения: 22 ноября 2016.

References (transliterated)

1. Chernenko V. *Osobennosti programmirovaniya mikrokontrollerov s WiFi module na primere mikrokontrollera ESP8266 ot Espressif* [Features Microcontroller programming with WiFi module on the example of the microcontroller ESP8266 Espressif]. *CHIP NEWS ukraina* [CHIP NEWS Ukraine] 2016, No. 9 issue 159, pp. 20-23.
2. WiFi modul' ESP6288 ESP07 dlya domashney avtomatizatsii [WiFi module ESP6288 for home automate], 23.02.2015. – Available at: <http://mysku.ru/blog/ebay/30626.html>. (Accessed at: 02.11.2016)
3. MajorDoMo i drugie [MajorDoMo and others], 03.06.2016. – Available at: <https://wifi-iot.com/?m=wiki&id=24> (Accessed at: 22.11.2016)

Поступила (received) 25.05.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Управление системами на ESP / Л. В. Головкина, А. О. Мартынов, А. В. Тихоненко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 4 (1226). – С. 77–81. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-4525.

Управління системами на ESP / Л. В. Головкина, А. О. Мартинов, О. В. Тихоненко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 4 (1226). – С. 77–81. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-4525.

System management on ESP / L. V. Golovkina, A. O. Martynov, A. V. Tikhonenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tehnika. . – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 4 (1226). – P. 77–81. – Bibliogr.: 3. – ISSN 2079-4525.

Відомості про авторів / Сведения о авторах / About the Authors

Головкина Людмила Вячеславовна – кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры ИВСУ; тел.: (057) 702-14-94; e-mail: glvvlg@ukr.net. кандидат технических наук.

Головкина Людмила Вячеславівна – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри ІВСУ; тел.: (057) 702-14-94; e-mail: glvvlg@ukr.net. кандидат технічних наук.

Golovkina Ludmila Viacheslavovna – candidate of technical sciences, associate professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor of the Department ECSE; tel.: (057) 702-14-94; e-mail: glvvlg@ukr.net. Candidate of Technical Sciences.

Мартынов Андрей Олегович – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, студент бакалавр; тел.: (066) 691-97-96; e-mail: andrii.martynov1@nure.ua.

Мартинов Андрій Олегович – Харківський національний університет радіоелектроніки, студент бакалавр; тел.: (066) 691-97-96; e-mail: andrii.martynov1@nure.ua.

Martynov Andrey Olegovich – Kharkiv National University of Radio Electronics, a student of Bachelor; tel.: (066) 691-97-96; e mail: andrii.martynov1@nure.ua.

Тихоненко Александр Виталиевич – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, студент бакалавр; тел.: (096) 620-31-61; e-mail: oleksandr.tykhonenko@nure.ua.

Тихоненко Олександр Віталійович – Харківський національний університет радіоелектроніки, студент бакалавр; тел.: (096) 620-31-61; e-mail: oleksandr.tykhonenko@nure.ua.

Tikhonenko Aleksandr Vitalievich – Kharkiv National University of Radio Electronics, a student of Bachelor; tel.: (096) 620-31-61; e-mail: oleksandr.tykhonenko@nure.ua

**Ю. В. ЛИТВИНОВ, О. М. ГРИГОР'ЄВ, З. В. БІЛИК, М. Є. ПОЛЯНСЬКИЙ,
О. В. САКУН, В. В. МАРУЩЕНКО, І. Ю. ЧЕРНЯВСЬКИЙ**

ДЕЯКІ АСПЕКТИ СТВОРЕННЯ ПРИЛАДУ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРЯМКУ НА ТОЧКОВІ ДЖЕРЕЛА ГАММА-ВИПРОМІНЮВАННЯ

В статті проведено аналіз сучасного стану проблеми визначення напрямку на імпульсне джерело гамма-випромінювання та описано розроблений авторами чотириканальний аналізатор гамма-випромінювання. Детально розглянуто елементи системи реєстрації гамма-квантів з використанням напівпровідникових детекторів на основі CdTe. Визначено їх характеристики, оцінено перспективи використання в приладах визначення напрямку на імпульсні гамма-спалахи.

Ключові слова: телурид кадмію, попередній підсилювач, піковий детектор, аналізатор спектру, напрямок на джерело гамма-випромінювання.

В статье проведен анализ современного состояния проблемы определения направления на импульсный источник гамма-излучения и описан разработанный авторами четырехканальный анализатор гамма-излучения. Детально рассмотрены элементы системы регистрации гамма-квантов с использованием полупроводниковых детекторов на основе CdTe. Определены их характеристики, оценены перспективы использования в приборах определения направления на импульсные гамма-всплески.

Ключевые слова: теллурид кадмия, предварительный усилитель, пиковый детектор, анализатор спектра, направление на источник гамма-излучения.

The article analyzes the current state of the problem of determining the direction of a pulsed source of gamma radiation and describes a four-channel gamma-ray analyzer developed by the authors. The elements of the gamma-ray detection system using semiconductor detectors based on CdTe are considered in detail. Their characteristics are determined, the prospects of using in instruments for determining the direction of pulsed gamma-ray bursts are estimated.

Keywords: cadmium telluride, preliminary amplifier, peak detector, spectrum analyzer, direction on the source of gamma radiation.

Постановка проблеми. Сьогодні існує багато методів та приладів для визначення напрямку на постійні гамма-джерела. Що ж стосується імпульсних джерел гамма-випромінювання (ДГВ), то по ним питання стоїть більш гостро. Так в [1] зазначено, що дослідження гамма-сплесків обіцяє велику кількість відкриттів, якщо космічні обсерваторії зможуть реєструвати мікросекундні гамма-імпульси, з'явиться можливість спостерігати такі деталі фізики космосу, про які не можливо поки мріяти. Початок дослідження гамма-сплесків покладено в 1960-х роках, коли США відправили в космос декілька спеціалізованих супутників сімейства Vela, що призначалися для реєстрації елементарних часток і фотонів дуже високої енергії, хоча ці супутники не мали жодного відношення до астрономії – вони повинні були відстежувати дія Пентагону радянські ядерні дослідження на зворотному боці Луни. В [2] з цього питання зазначені такі факти. Ідея космічного спостереження за наземними вибухами атомних зарядів досить проста: за часовою затримкою імпульсів гамма-випромінювання в декількох детекторах, що розміщені на орбіті та спрямовані на Землю, можна визначити місце, де проведено вибух. Але космічний ядерний моніторинг надав несподіваний результат: сплески приходили не від Землі, а з космічного простору. Їх неможливо було ідентифікувати ні з жодним об'єктом сонячної системи. Маючи великий досвід створення потужних вибухових пристроїв – атомних і термоядерних бомб, вчені швидко прийшли до аналогії з рукотворними зірками, що вибухають: під час випробувань атомної бомби імпульс гамма-випромінювання, що передусь

розльоту розжареної плазмової сфери, є одним з основних вражаючих факторів. Вчених дивувала доволі велика частота спостережень гамма-сплесків. Якщо в перші роки досліджень гамма-сплесків їх спостерігали від 10 до 20 на рік, то тепер, по мірі засвоєння більш чутливих детекторів, їх частота оцінюється на рівні 300 – 800 на рік та більше. Сплески відрізняються різноманітністю своїх часових масштабів – їх тривалість знаходиться в інтервалі від десятків мілісекунд до десятків секунд. Енергетичний спектр гамма-сплесків також як у космічних променів падаючий – зі збільшенням енергії потік монотонно знижується. Він простирається від десятків keV до GeV-них енергій, а іноді спостерігаються TeV-ні частки.

Датчиками іонізуючого випромінювання [3, 4] є іонізаційні камери, пропорційні та газорозрядні лічильники, напівпровідникові та сцинтиляційні детектори, а також піроелектричні детектори [5]. Більш перспективними для дослідження імпульсних джерел гамма-випромінювання є прилади, що базуються на використанні спектрометричної інформації при вимірюванні іонізуючих випромінювань на основі напівпровідникових детекторів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Пристрій, описаний у [6], використовувався для пошуку гамма-сплесків високої енергії. Методи вимірювання кутового розподілу на основі коліматорів зводяться до двох типів пристроїв: гамма-коліматори, що реєструють інтенсивність в узькому напрямі при скануванні всього простору шляхом послідовних вимірювань, та за допомогою камери-

обскури, що дозволяє виявити гамма-джерела в певному тілесному куті [7]. Застосування таких пристроїв [8] пов'язано, зокрема, з дослідженням енергетично-кутових розподілів випромінювання, що створюється ядерними пристроями і постійними радіоактивними джерелами. Отримані за допомогою спектрометрії гамма-випромінювання дані дозволяють розробити оптимальні варіанти захисту та забезпечити радіаційну безпеку. Основною проблемою даних методів та пристроїв є великий час пошуку гамма-джерел.

Відомий пристрій зі сферичною зоною огляду для пошуку фотонних джерел [9]. Він може бути використаний при радіаційному моніторингу в якості засобу пошуку та визначення напрямку на фотонне джерело в тілесному куті 4π стерadian. Даний пристрій містить блок для детектування, що включає захисний екран у вигляді шару та багатоеlementний детектор, електронний перетворювач, що поєднаний з елементами детекторів, та блок електроніки, що поєднаний з електронним перетворювачем. Детектори розташовані по ребрах правильного багатогранника, що утворений платами електронного перетворювача, з внутрішнього боку якого розташований захисний екран, і це дозволяє отримати максимальну чутливість. Недоліком пристрою є залежність отриманих даних від енергії та залежність розподільчої здатності від кількості детекторів та електронних перетворювачів.

В іншому пристрої [10] застосовується кулеподібний поглинач з використанням п'яти CdZnTe детекторів для виміру кутового розподілу інтенсивності гамма-випромінювання. В ньому необхідно провести спрощення процедури переносу інформації в комп'ютер для збільшення швидкості обробки інформації, що поступає, оскільки кожний канал має свою пам'ять. Практична реалізація цього пристрою по визначенню напрямку на гамма-джерела не приведена.

В роботі [11] описано застосування детекторів на основі CdTe і CdZnTe для аналізу джерел гамма-випромінювання, наведені схеми попереднього підсилювача, що є найбільш складною частиною приладу. Але для якісної роботи CdTe датчиків дані схеми потребують суттєвої зміни.

Мета статті: полягає у висвітленні принципу дії та характеристик окремих складових частин аналізатора гамма-випромінювання, розробленого авторами та оцінки можливості його використання для реєстрації імпульсних гамма-спалахів.

Викладення основного матеріалу. Для визначення напрямку на джерела гамма-випромінювання та їх інтенсивності було створено аналізатор гамма-випромінювання (рис. 1), що поєднувався певним чином із кульовим поглиначем або чотирма поглиначами: асиметричним, секторним, циліндричним, півкульовим [12]. До складу аналізатора входять виносні блоки детектування та блок аналізатора імпульсів, який підключається до персонального комп'ютера за допомогою шнура USB. Результати вимірювань обробляються комп'ютером та

відображаються на екрані монітору. Керування здійснюється за допомогою розробленого інтерфейсу користувача. За функціональними можливостями пристрій еквівалентний чотирьом незалежним аналізаторам гамма-випромінювання, що мають спільне керування.

Для реєстрації гамма-випромінювання було розроблено та виготовлено блоки детектування.



Рис. 1 – Аналізатор гамма-випромінювання із блоками детектування

Блок детектування складається із зарядочутливого підсилювача та датчика, що розміщені у металевому корпусі циліндричної форми. Блок детектування з'єднується з аналізатором імпульсів за допомогою екранованого кабелю. Блок детектування та датчик живляться від аналізатора імпульсів. Розміри блока детектування для чотирьох вище зазначених поглиначів складають 35 мм в діаметрі та 80 мм довжиною, а розміри блоків детектування для кульового поглинача складають 20 мм довжиною та 10 мм в діаметрі.

В якості датчика у блоку детектування використовувалися: спектрометричні телурид кадмієві датчики розміром $4 \times 4 \times 2$ мм та спектрометричний телурид кадмієвий датчик розміром $5 \times 5 \times 2$ мм.

Блок аналізатора імпульсів створено з використанням цифрових технологій і на основі сучасної елементної бази. Спрощена схема одного каналу аналізатора імпульсів зображена на рис. 2. Мікроконтролер є загальним для чотирьох каналів.

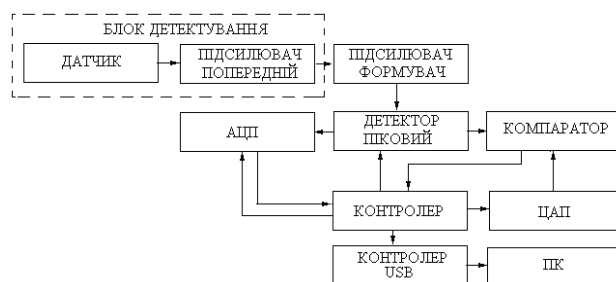


Рис. 2 – Спрощена схема одного каналу аналізатора імпульсів

Дана схема працює наступним чином. На датчик подається напруга зміщення 35 В. В якості датчика для детектування використовується телурид кадмію, опір якого не менше 10^8 Ом. При потраплянні високоенергетичної зарядженої частки в датчик утворюються пари електронів і дірок, що призводить до появи імпульсу електричного струму. Цей імпульс підсилюється попереднім підсилювачем. Величина заряду на обкладинках датчика відповідає енергії частинки. Вихідним сигналом датчику є слабкий імпульс тривалістю декілька десятків наносекунд. При створенні попереднього підсилювача за основу було взято схему, описану в [13], та вдосконалено її з урахуванням характеристик датчика на основі телуриду кадмію. Даний попередній підсилювач призначений для роботи з датчиками випромінювання, що мають ємність в межах 10 пФ–100 пФ. В схемі було змінено ланцюг живлення вхідного транзистору: генератор струму витоку виконаний на одно перехідному транзисторі. Операційний підсилювач AD841 [14] було замінено на AD8033 [15]. Даний попередній підсилювач призначений для роботи з датчиками випромінювання, ємність яких складає від 10 пФ до 100 пФ. Враховуючи малу ємність датчика, що складає одиниці піко фарад, також були змінені параметри зворотного зв'язку: встановлено резистор 40–60 МОм та ємність зворотного зв'язку 0,2 пФ. В порівнянні з AD841 AD8033 має меншу швидкодію, але значно кращі шумові характеристики. Так вихідний шум AD8033 складає $0,7 \text{ фА}/\sqrt{\text{Гц}}$, а для AD841 дана характеристика не регламентована, що каже про її високе значення. В роботі [11] описано попередній підсилювач аналогічного призначення, в якому використовується операційний підсилювач TL071, рівень шуму за вихідним струмом у якого складає $0,01 \text{ пА}/\sqrt{\text{Гц}}$, що перевищує шум AD8033 у сто сорок разів. Операційний підсилювач AD8033 має низький вхідний шум, високий вхідний опір та високу швидкість наростання сигналу. З огляду на це операційний підсилювач AD8033 було обрано для створення попереднього підсилювача. Шумові характеристики попереднього підсилювача в основному визначаються вхідним каскадом, але оскільки вхідний каскад та операційний підсилювач охоплені загальним зворотним зв'язком, власні шуми операційного підсилювача також вносять вклад в характеристики всієї схеми. Схема попереднього підсилювача заряду зображена на рис. 3.

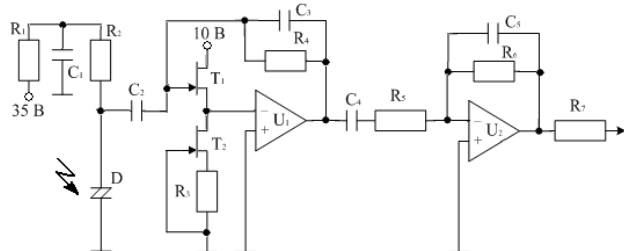


Рис. 3 – Схема попереднього підсилювача заряду

Датчик D живиться напругою зміщення 35 В через резистор R2, що приєднаний між резистором R1 та конденсатором C1. Резистор R1 обмежує струм заряду конденсатора C1. Резистор R2 утворює подільник напруги з детектором D. Сигнал утворюється при потраплянні іонізуючої частинки в чутливу зону детектора D та являє собою імпульс струму з амплітудою, що відповідає енергії частинки.

Вхідний каскад попереднього підсилювача зібраний на транзисторі T1 за схемою повторювача вхідної напруги. Конденсатор C2 відділяє постійну складову сигналу детектора від входу транзистора T1. Транзистор T1 є повторювачем напруги. Генератор струму, що зібраний на транзисторі T2 та резисторі R3, є динамічним навантаженням вхідного каскаду.

З витоку транзистора T1 сигнал потрапляє на інвертуючий вхід операційного підсилювача U1 – AD8033, що створений за схемою інтегратора із зворотним ємнісним зв'язком. В результаті сигнал імпульсів заряду, що накопичується на контактах датчика перетворюється на імпульс струму з напругою пропорційною заряду на затворі транзистору T1. Ланцюг зворотного зв'язку R4 – C3 задає коефіцієнт посилення та форму вихідного сигналу. Його параметри також визначаються ємністю датчика D та необхідною полосою пропускання, що для даного підсилювача становить від 100 кГц до 250 кГц. Для обраних R4 та C3 $\tau=12$ мкс. Цей параметр є визначальним для підсилення імпульсних сигналів. Для постійного струму коефіцієнт підсилення схеми дорівнює одиниці. Якщо генерація заряду в датчику відбувається за час t менше ніж τ , імпульс вихідної напруги задається виразом [16]

$$e_{out}(t) = -\frac{Q_{st}}{C_f} \times e^{-\frac{t}{\tau}},$$

де Q_{st} – сигнал імпульсів заряду з часом,
 C_f – ємність конденсатору зворотного зв'язку.

Сигнал імпульсів заряду Q_s перетворюється в імпульс напруги з амплітудою [16]

$$V_{out} = -\frac{Q_s}{C_f},$$

що затухають із постійною часу τ .

Посилення даної схеми характеризується чутливістю, що є зміною вихідної напруги, яка виражена в мілівольтах, на один МеВ енергії частинок, що опромінюють детектор. Амплітуда отриманого сигналу заряду з датчику визначається вхідною енергією частинки та матеріалом датчику [16]

$$Q_s = \frac{E \times e^-}{\varepsilon},$$

де E – енергія частинки, еВ;

e^- – елементарний заряд, що дорівнює $1,6 \times 10^{-19}$ Кл;

ϵ – необхідна енергія, щоб створити одну пару електрон-дірка, eВ.

Для телурид кадмієвого датчика $\epsilon=4,43$ eВ [17], звідси для частинки з енергією 1 MeВ амплітуда отриманого сигналу заряду $Q_s=3,6 \times 10^{-14}$ Кл. Тоді чутливість попереднього підсилювача буде задаватись рівнянням [16]

$$R_s = \frac{V_{out}}{E} = \frac{\frac{Q_s}{C_f}}{Q_s \times \frac{\epsilon}{e^-}} = \frac{e^-}{C_f} \times \frac{1}{\epsilon}, \text{ (мВ/МеВ)}.$$

В розробленому попередньому підсилювачі його чутливість складає $R_s=0,181$ В/МеВ.

Наступний каскад зібрано на операційному підсилювачі U2 – LM6172, що є першим каскадом підсилювача-формувача. Він має низький вихідний опір, що дає можливість створити схему узгодження опорів для подальшої передачі сигналу за допомогою 50 омного коаксіального кабелю. Підсилювач-формувач звужує полосу пропускання та обмежує посилення в діапазоні низьких та високих частот.

Осцилограма імпульсу, що отримана з розробленої схеми, що описана вище, зображена на рис. 4.

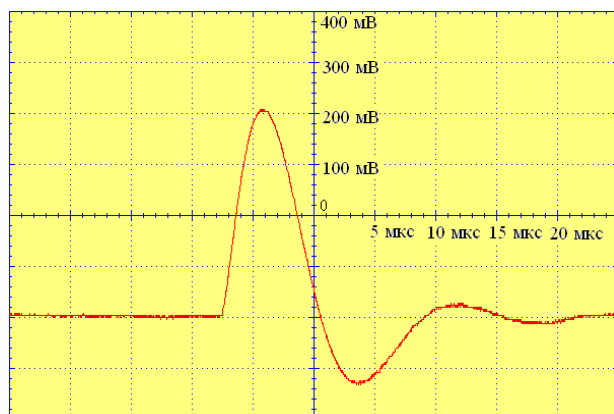


Рис. 4 – Осцилограма імпульсу, що отримана з розробленої схеми попереднього підсилювача

Попередній підсилювач перетворює величину заряду, що накопичується на контактах датчика, в імпульс напруги пропорційний заряду. При цьому на його виході формується основний імпульс позитивної полярності, що супроводжується одним-двома затухаючими імпульсами. Такий режим роботи попереднього підсилювача обраний для спрощення формування базової лінії. Його функція полягає в тому, щоб посилити сигнал з датчика, виділити сигнал в визначеній смузі частот, тобто відсіяти низькочастотні та високочастотні сигнали, що є шумами. Робочому діапазону аналізатора відповідають імпульси, що отримані на виході

попереднього підсилювача амплітудою до 200 мВ. Подальше посилення сигналу та формування базової лінії проводиться в підсилювачі-формувачі. Підсилювач-формувач складається з декількох каскадів із операційним підсилювачем LM6172 [18]. Амплітудно-частотні характеристики підсилювача-формувача визначають спектральний склад сигналу, що потрапляє в коло вимірювання. Підсилювач-формувач має смугу пропускання, що лежить в межах 100-200 кГц. З сигналу видаляються низькочастотні та високочастотні складові, що поліпшує відношення сигнал-шум та зменшує дрейф базової лінії [19]. З підсилювача-формувача сигнал поступає на піковий детектор (рис. 5).

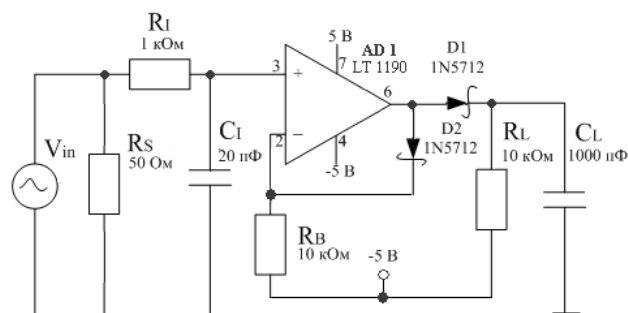


Рис. 5 – Схема пікового детектора

Піковий детектор створено на операційному підсилювачі з високою швидкістю наростання вихідного сигналу. Для операційного підсилювача LT1190 ця швидкість складала 160 В/мкс. Замкнена петля ланцюгу пікового детектора використовує діод Шоттки D21N5712 для підвищення лінійності пікового детектора. Детектування сигналу відбувається за допомогою D11N5712. Для компенсації падіння напруги на діоді детектування у зворотному зв'язку застосовується компенсувальний діод D21N5712. Обидва діоди зміщено від'ємною напругою, що подається через резистор R_L 10 кОм та R_B 10 кОм.

Елементом пам'яті пікового детектора є конденсатор, сигнал з якого подається на повторювач, далі на компаратор. На другий вхід компаратора подається сигнал з цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) MCP4921 [20], величина якого задається в налаштуваннях та визначає поріг спрацьовування схеми вимірювання.

Якщо на вході повторювача сигнал нижче, ніж опорний сигнал компаратора – вимірювання не здійснюється. У випадку, якщо сигнал долає поріг спрацювання компаратора – на його виході з'являється імпульс, що крізь ланцюг логічних елементів запускає роботу АЦП ADS8361 [21]. Після того, як АЦП скінчить процес перетворення та передасть дані на мікроконтролер PIC16F877A [22], останній видасть позитивний імпульс на скинення пікового детектору. Сигнал, що зчитаний з АЦП контролером, передається до USB-контролера FT245BM [23] та виводиться до персонального комп'ютера. Після розряду конденсатора пікового детектора схема переводиться в готовий стан для наступного вимірювання. Кожен з чотирьох каналів

АЦП має свої кола керування та працює незалежно від інших. При одночасній появі сигналу на декількох входах дані вимірювань запам'ятовуються, а потім послідовно обробляються та передаються в комп'ютер. Мінімальний загальний час вимірювання і перетворення за 4 каналами – біля 40 мкс за умови одночасної реєстрації сигналу всіма чотирма датчиками. У разі реєстрації окремих гамма-квантів, прилад працює в режимі аналізатора.

Керування аналізатором і попереднє встановлення параметрів вимірювань робиться за допомогою програмного забезпечення, що встановлене на комп'ютер. Аналізатор гамма-випромінювання було створено на основі досліджень [24-27]. Блоки детектування та аналізатор імпульсів показали працездатність без прорахунків імпульсів від генератора імпульсів $4 \times 8,5$ кГц. Результати вимірювань від одного точкового ДГВ чотирма блоками детектування, які виведені на персональний комп'ютер, зображені на рис. 6, що дозволяє визначати як кількість імпульсів зафіксованих детекторами при визначенні напрямку на постійні точкові ДГВ, так і розподіл гамма-квантів за енергією, що необхідно для визначення напрямку на імпульсні гамма-джерела.

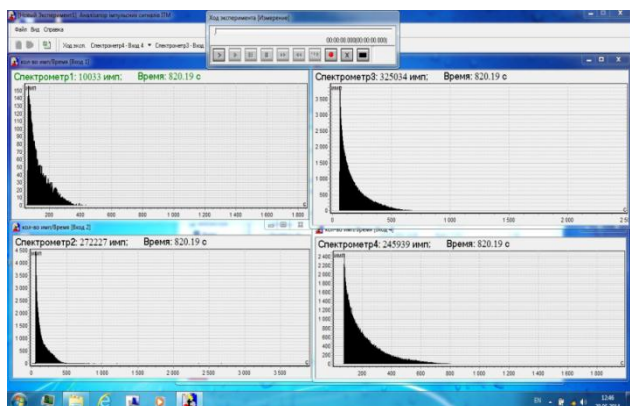


Рис. 6 – Результати вимірювань, що виводяться з аналізатора гамма-випромінювання на персональний комп'ютер

Висновки. У статті розглянуто способи розв'язання деяких технічних проблем, що пов'язані із створенням аналізатора спектру імпульсних сигналів. Зокрема, наведено приклади працездатних схем підсилювача заряду, розробленого для роботи з напівпровідниковими датчиками CdTe, CdZnTe та пікового детектора, обґрунтовано вибір компонентів. Також наведено блок-схему одного каналу аналізатора, схему та загальні пояснення щодо його роботи. Прилад може використовуватись за основним призначенням (аналізатор спектрів гамма-випромінювання) та, для вирішення проблеми визначення напрямку на джерело імпульсного гамма-випромінювання.

Список літератури:

1. Гамма-всплески – самые мощные во Вселенной процессы, сопровождающие гибель или слияние звезд и рождение черных дыр [Электронный ресурс] / А. Левин. – Режим доступа :

- <http://www.popmech.ru/science/11382-khvostatyev-vspyski-gamma-vspleski/>.
2. Гамма-изображение Вселенной [Электронный ресурс] – Режим доступа : <http://nuclphys.sinp.msu.ru/pilgrims/cr09.htm>.
3. Чернявський І. Ю. Військова дозиметрія : підручник / І. Ю. Чернявський, В. В. Марущенко, І. М. Мартинюк. – Харків : ФВП НТУ «ХП», 2012. – 560 с.
4. Альбинов З. А. Детекторы импульсного ионизирующего излучения / З. А. Альбинов, А. И. Веретенников, О. В. Козлов. – Москва : Атомиздат, 1978. – 173 с.
5. Борисенко В. А. Пирозлектрический детектор импульсного гамма-излучения / В. А. Борисенко, Е. З. Новицкий, В. Г. Симаков // Приборы и техника эксперимента. – 2009. – № 4 – С. 81–94.
6. Смирнов Д. В. Поиск гамма-всплесков высокой энергии на установках Андырчи и БПСТ БНО ИЯИ РАН : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.01 / Д. В. Смирнов. – Москва, 2005. – 170 с.
7. Алешин А. М. Измерение угловых распределений гамма-излучения в зонах производства работ по стабилизации объекта «Укрытие» / А. М. Алешин, В. Г. Батий, В. В. Егоров, А. Ю. Закревский, Н. А. Кочнев, В. А. Кузьменко, А. А. Кучмагра, В. П. Михайлюк, Г. И. Одинокин, Л. И. Павловский, В. М. Рудько, А. А. Сизов, А. И. Стоянов, О. И. Шеремет, В. Н. Щербин. – Чернобыль : Укрытие, 2002. – 47 с. – (Препринт / НАН Украины, межотраслевой науч.-технич. центр «Укрытие» ; 02-1).
8. Столярова Е. Л. Прикладная спектрометрия ионизирующих излучений / Е. Л. Столярова. – Москва : Атомиздат, 1964. – 432 с.
9. Устройство со сферической зоной обзора для поиска фотонных источников : пат. 2386146 РФ : МПК G01T1/16 / А. Н. Власенко, В. П. Демченко, О. Е. Лапин, А. Ф. Первишко. – 2008150823/28 ; заявл. 22.12.2008 ; опубл. 10.04.2010.
10. Измерения интенсивности гамма-излучений в полях сложной конфигурации [Электронный ресурс] / А. А. Ключников, В. Н. Щербин, В. М. Рудько, В. Г. Батий, Д. В. Федорченко, А. А. Правдивый, В. В. Егоров, А. И. Стоянов. – Режим доступа: www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=116.
11. Шляхов І. М. Застосування детекторів на основі напівпровідникових сполук CdTe і CdZnTe у задачах аналізу джерел γ-випромінювання : автореф. дис. ... канд. фізико-мат. наук : 01.04.01 / І. М. Шляхов. – Харків, 2010. – 131 с.
12. Григор'єв О. М. Визначення напрямку на точкові джерела фотонного випромінювання в площині, включаючи імпульсні / О. М. Григор'єв, З. В. Білик, О. В. Сакун, В. В. Марущенко // Вісник НТУ «ХП». – Харків : НТУ «ХП», 2012. – № 41. – С. 111–117.
13. Hybrid Charge Sensitive Preamplifier [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.qsl.net/k/k0ff/Preamps/AD841_CSA%5B1%5D.pdf.
14. Analog devices AD841 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD841.pdf>.
15. Analog devices AD8033 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8033_8034.pdf.
16. Hamamatsu Solid State division SD-37 characteristics and use of charge amplifier [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/charge_amp_kacc9001e.pdf.
17. Захарченко А. А. Методы определения параметров переноса заряда в CdTe (CdZnTe) детекторах гамма-излучения / А. А. Захарченко, В. Е. Кутний, Д. В. Наконечный, И. М. Прохорец, А. В. Рыбка, М. А. Хажмуратов // Вісник ХНУ. Сер. фізична «Ядра, частинки, поля». – 2007. – № 784. – Вип. 4 (36). – С. 85–92.
18. Texas Instruments LM6172 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm6172.pdf>.
19. Syed Naeem Ahmed. Physics and Engineering of Radiation Detection / Syed Naeem Ahmed. – Ontario : Queen's University Kingston, 2007. – 764 p.
20. Microchip MCP4921 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?product=MCP4921>.
21. Texas Instruments ADS 8361 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.ti.com/product/ads8361>.

22. Microchip PIC16F877A [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?product=PI C16F877A>.
23. FTDI Chip FT245BM USB FIFO (USB - Parallel) I.C. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_F T245BM.pdf.
24. Helmuth Spieler. Radiation Detectors and Signal Processing / Helmuth Spieler. – Heidelberg : University of Heidelberg, 2001. – 517 p.
25. Хоровиц П. Искусство схемотехники. В 3-х т. Т. 1 : пер. с англ. / П. Хоровиц, У. Хилл. – 4-е изд. перераб. и доп. – Москва : Мир, 1993. – 413 с.
26. Хоровиц П. Искусство схемотехники. В 3-х т. Т. 2 : пер. с англ. / П. Хоровиц, У. Хилл. – 4-е изд. перераб. и доп. – Москва : Мир, 1993. – 371 с.
27. Хоровиц П. Искусство схемотехники. В 3-х т. Т. 3 : пер. с англ. / П. Хоровиц, У. Хилл. – 4-е изд. перераб. и доп. – Москва : Мир, 1993. – 367 с.

References:

1. Levin A. Gamma-vspleski – samye moshchnye vo Vselennoy protsessy, soprovozhdayushchie gibel' ili sliyanie zvezd i rozhdenie chernykh dyr [Gamma-bursts - the most powerful processes in the universe, accompanying the death or fusion of stars and the birth of black holes]. Available at : <http://www.popmech.ru/science/11382-khvostatyte-vspyshki-gamma-vspleski/>.
2. Gamma-izobrazhenie Vselennoy [Gamma image of the universe]. Available at : <http://nuclphys.sinp.msu.ru/pilgrims/cr09.htm>.
3. Chernyavskiy I. Yu., Marushchenko V. V., Martynyuk I. M. Viys'kova dozimetriya i pidruchnyk [Military dosimetry: Tutorial]. Kharkiv, FVP NTU «KhPI», 2012. 560 p.
4. Al'bikov Z. A., Veritennikov A. I., Kozlov O. V. Detektory impul'snogo ioniziruyushchego izlucheniya [Detectors of pulsed ionizing radiation]. Moscow, Atomizdat, 1978. 173 p.
5. Borisenok V. A., Novitskiy E. Z., Simakov V. G. Piroelektricheskiy detektor impul'snogo gamma-izlucheniya [Pyroelectric detector of pulse gamma-ray]. Priboi i tekhnika eksperimenta. 2009, No 4, pp. 81–94.
6. Smirnov D. V. Poisk gamma-vspleskov vysokoy energii na ustanovkakh Andrychi i BPST BNO IYaI RAN : avtoref. dis. na zdobuttya nauk. stupenya kand. fiz.-mat. nauk : spets. 01.04.01 "Priboi i metody eksperimental'noy fiziki" [Search for gamma bursts of high energy in the Andrychi and BPST facilities of the BNO of the Institute of Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences. Abstract of a thesis candidate fiz.-mat. sciences: 01.04.01 "Devices and methods of experimental physics"]. Moscow, 2005. 170 p.
7. A. M. Aleshin, V. G. Batiy, V. V. Egorov, A. Yu. Zakrevskiy, N. A. Kochnev, V. A. Kuz'menko, A. A. Kuchmagra, V. P. Mikhaylyuk, G. I. Odinkov, L. I. Pavlovskiy, V. M. Rud'ko, A. A. Sizov, A. I. Stoyanov, O. I. Sheremet, V. N. Shcherbin Izmerenie uglovyykh raspredeleniy gamma-izlucheniya v zonakh proizvodstva rabot po stabilizatsii ob'ekta «Ukrytie» [Measurement of angular distributions of gamma radiation in the zones of production of works on stabilization of the object "Shelter"]. Preprint NAN Ukrainy, mezhotraslevoy nauch.-tekhnich. tsentr «Ukrytie»; 02-1. [Preprint / NAS of Ukraine, interdisciplinary scientific-technical. Center "Shelter"; 02-1]. Chernobyl : Ukrytie, 2002, 47 p.
8. Stolyarova E. L. Prikladnaya spektrometriya ioniziruyushchikh izlucheniye [Applied spectrometry of ionizing radiation] / Moscow, Atomizdat, 1964. 432 p.
9. Vlasenko A. N., Demchenko V. P., Lapin O. E., Pervishko A. F. Ustroystvo so sfericheskoy zonoj obzora dlya poiska fotonnykh istochnikov [A device with a spherical viewing field to search for photonic sources] Patent RF, No. 2386146, 2010.
10. Klyuchnikov A. A., Shcherbin V. N., Rud'ko V. M., Batiy V. G., Fedorchenko D. V., Pravdivyy A. A., Egorov V. V., Stoyanov A. I. Izmereniya intensivnosti gamma-izlucheniya v polyakh slozhnoy konfiguratsii [Measurements of gamma-ray intensity in fields of complex configuration]. Available at : <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=116>.
11. Shlyakhov I. M. Zastosuvannya detektoriv na osnovi napivprovodnykovykh spoluk CdTe i CdZnTe u zadachakh analizu dzhherel hamma-vyprominyuvannya : avtoref. dys. na zdobuttya nauk. stupenya kand. fizyko-mat. nauk : 01.04.01 "Fizyka pryladiv, elementiv, system" [The use of detectors based on semiconductor compounds CdTe and CdZnTe in the problems of the sources of gamma radiation. Abstract of a thesis candidate physics and math. sciences: 01.04.01 "Physics of devices, components, systems"] Kharkov, 2010. 131 p.
12. Hryhor'yev O. M., Bilyk Z. V., Sakun O. V., Marushchenko V. V. Vyznachennya napryamku na tochkovi dzhherela fotonnoho vyprominyuvannya v ploshchyni, vkluchayuchy impul'sni [Determining the direction on a point sources of photon radiation in the plane, including pulse]. Visnyk NTU "KhPI". [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2012, No. 41. pp. 111–117.
13. Hybrid Charge Sensitive Preamplifier. Available at : http://www.qsl.net/k0off/Preamps/AD841_CSA%5B1%5D.pdf.
14. Analog devices AD841. Available at : <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD841.pdf>.
15. Analog devices AD8033. Available at : http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8033_8034.pdf.
16. Hamamatsu Solid State division SD-37 characteristics and use of charge amplifier. Available at : https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/charge_amp_kacc9001e.pdf.
17. Zakharchenko A. A., Kutniy V. E., Nakonechnyy D. V., Prokhorets I. M., Rybka A. V., Khazhmuradov M. A. Metody opredeleniya parametrov perenosy zaryada v CdTe (CdZnTe) detektorakh gamma-izlucheniya [Methods for determining the parameters of charge transfer in CdTe (CdZnTe) gamma-ray detectors]. Visnik KhNU. Ser. fizichna «Yadra, chastinki, polya». [Bulletin of the KhNU. Series physical "Nuclei, Particles, Fields"]. – Kharkiv, KhNU Publ., 2007, No. 784, issue 4 (36), pp. 85–92.
18. Texas Instruments LM6172. Available at : <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm6172.pdf>.
19. Syed Naeem Ahmed. Physics and Engineering of Radiation Detection / Syed Naeem Ahmed. – Ontario : Queen's University Kingston, 2007. – 764 p.
20. Microchip MCP4921. Available at : <http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?product=MCP4921>.
21. Texas Instruments ADS 8361. Available at : <http://www.ti.com/product/ads8361>.
22. Microchip PIC16F877A. Available at : <http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?product=PI C16F877A>.
23. FTDI Chip FT245BM USB FIFO (USB - Parallel) I.C. Available at : http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_F T245BM.pdf.
24. Helmuth Spieler. Radiation Detectors and Signal Processing. Heidelberg : University of Heidelberg, 2001, 517 p.
25. Khorovyts P., Khyll U. Yskusstvo skhemotekhniky [The art of circuitry]. V 3-kh t. Vol. 1 : per. s anhl., 4-e yzd. pererab. y dop., Moskva, Myr Publ., 1993, 413 p.
26. Khorovyts P., Khyll U. Yskusstvo skhemotekhniky [The art of circuitry]. V 3-kh t. Vol. 2 : per. s anhl., 4-e yzd. pererab. y dop., Moskva, Myr Publ., 1993, 371 p.
27. Khorovyts P., Khyll U. Yskusstvo skhemotekhniky [The art of circuitry]. V 3-kh t. Vol. 3 : per. s anhl., 4-e yzd. pererab. y dop., Moskva, Myr Publ., 1993, 367 p.

Надійшло (received) 28.04.2017

УДК 681.2:[623.454.836+623.454.84+623.454.86]

Деякі аспекти створення приладу визначення напрямку на точкові джерела гамма-випромінювання / Ю. В. Литвинов, О. М. Григор'єв, З. В. Білик, М. Є. Полянський, О. В. Сакун, В. В. Марущенко, І. Ю. Чернявський // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 4 (1226). – С. 82–89. – Бібліогр.: 27 назв. – ISSN 2079-4525.

УДК 681.2:[623.454.836+623.454.84+623.454.86]

Некоторые аспекты создания устройства для определения направления на точный источник гамма-излучения / Ю. В. Литвинов, А. Н. Григорьев, З. В. Билик, Н. Е. Полянский, А. В. Сакун, В. В. Марущенко, И. Ю. Чернявский // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 4 (1226). – С. 82–89. – Бібліогр.: 27 назв. – ISSN 2079-4525.

UDC 681.2:[623.454.836+623.454.84+623.454.86]

Some aspects of creating device for determining direction on a point source of gamma radiation / Yu. V. Litvinov, A. N. Grigoryev, Z. V. Bilyk, N. E. Polyansky, A. V. Sakun, V. V. Marushchenko, I. Yu. Chernyavsky // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tekhnika. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 4 (1226). – P. 82–89. – Bibliogr.: 27. – ISSN 2079-4525.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Литвинов Юрій Вікторович - старший викладач Харківського Національного університету імені В.Н. Каразіна, м. Харків, тел.: +38067-57-80-290.

Литвинов Юрий Викторович – старший преподаватель Харьковского Национального университета имени В.Н. Каразина, г. Харьков, тел.: +38067-57-80-290.

Litvinov Yury Viktorovich - senior lecturer of Kharkiv National University V.N. Karazin, Kharkiv; tel.: +38067-57-80-290.

Григор'єв Олександр Миколайович - кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, пенсіонер, м. Харків.

Григорьев Александр Николаевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, пенсионер, г. Харьков.

Grigoryev Aleksandr Nikolayevich - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Research Fellow, pensioner, Kharkiv.

Білик Захар Валентинович - науковий співробітник факультету військової підготовки імені Верховної Ради України Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: +380936415266; e-mail: z1940@ukr.net.

Билик Захар Валентинович – научный сотрудник факультета военной подготовки имени Верховной Рады Украины Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, тел.: +380936415266; e-mail: z1940@ukr.net.

Bilyk Zakhar Valentinovich - research fellow of Military Training Department of National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov; tel.: +380936415266; e-mail: z1940@ukr.net.

Полянський Микола Єгорович - інженер I категорії Харківського Національного університету імені В.Н. Каразіна, м. Харків.

Полянский Николай Егорович – инженер I категории Харьковского Национального университета имени В.Н. Каразина, г. Харьков.

Polyansky Nikolay Yehorovich - engineer I category of Kharkiv National University V.N. Karazin, Kharkiv.

Сакун Олександр Валерійович - кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник, начальник кафедри факультету військової підготовки імені Верховної Ради України Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків.

Сакун Александр Валериевич - кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, начальник кафедры факультета военной подготовки имени Верховной Рады Украины Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», г. Харьков.

Sakun Aleksandr Valeryevich - Candidate of Biology, Senior Research Fellow, Head of the Chair military, toxic chemicals Department of National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkiv

Марущенко Володимир Васильович - кандидат біологічних наук, доцент, начальник кафедри факультету військової підготовки імені Верховної Ради України Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків.

Марущенко Владимир Васильевич - кандидат биологических наук, доцент, начальник кафедры факультета военной подготовки имени Верховной Рады Украины Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», г. Харьков.

Marushchenko Vladimir Vasilyevich - Candidate of Biology, Associate Professor, Head of the Chair of Combat Employment of Radiation, Chemical and Biology Defense Forces of Military Training Department of National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkiv.

Чернявський Ігор Юрійович – кандидат технічних наук, професор факультету військової підготовки імені Верховної Ради України Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків.

Чернявский Игорь Юрьевич – кандидат технических наук, профессор факультета военной подготовки имени Верховной Рады Украины Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», г. Харьков.

Chernyavsky Igor Yuryevich - candidate of technical sciences, professor of Military Training Department of National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov.

УДК 681.2:[623.454.836+623.454.84+623.454.86]

**З. В. БЛИК, О. М. ГРИГОР'ЄВ, Ю. В. ЛИТВИНОВ, М. Є. ПОЛЯНСЬКИЙ,
О. В. САКУН, В. В. МАРУЩЕНКО, І. Ю. ЧЕРНЯВСЬКИЙ**

ВИЗНАЧЕННЯ НАПРЯМКУ НА ІМПУЛЬСНЕ ГАММА-ДЖЕРЕЛО З ВИКОРИСТАННЯМ СФЕРИЧНОГО ПОГЛИНАЧА

Проведено аналіз проблеми по визначенню параметрів ядерних вибухів та відомих методів їх вимірювання. Метод визначення напрямку на точкові джерела гамма-випромінювання моделюється з використанням світла. Експериментально показана можливість вимірювання напрямку на точкове джерело електромагнітного випромінювання, що пройшло крізь кульовий поглинач, трьома блоками детектування на основі кремнієвих фотодіодів. Використовувалися постійне джерело світла та сферичний поглинач, що обертався. Кожному куту в просторі між джерелом світла та блоком детектування відповідали різні інтенсивності на детекторах.

Ключові слова: визначення напрямку на ядерний вибух, електромагнітне випромінювання, багатоканальний аналізатор імпульсів.

Проведен анализ проблемы по определению параметров ядерных взрывов и известных методов их измерения. Метод определения направления на точечные источники гамма-излучения моделируется с использованием света. Экспериментально показана возможность измерения направления на точечный источник электромагнитного излучения, которое прошло через шаровой поглотитель, тремя блоками детектирования на основе кремниевых фотодиодов. Используется постоянный источник света и сферический поглотитель, который вращается. Каждому углу в пространстве между источником света и блоком детектирования соответствовали разные интенсивности на детекторах.

Ключевые слова: определение направления на ядерный взрыв, электромагнитное излучение, многоканальный анализатор импульсов.

Analysis the problem to determine the parameters of nuclear explosions and known methods for their measurement been carryd out. The method for directionfinding the point source of gamma radiation is modeled with the use of light. Experimentally proved the possibility of measuring the direction to a point source of electromagnetic radiation, that has passed through the ball absorber. The constant source of light and continuously rotating spherical absorber have been used. This been detected three detection assembly based on silicon photodiodes . Every corner of the space between the source light and detection unit corresponds to a different intensity on the detectors.

Keywords: determining the direction of a nuclear explosion, elektromagnitne viprominyuvannya, multi-channel pulse analyzer.

Постановка проблеми. На сьогодні все людство стало свідками відкритого протистояння багатьох наддержав – Росії та Сполучених Штатів Америки разом з об'єднаною Європою, продовжується війна Палестини та Ізраїлю, Северна Корея проводить випробування балістичних ракет, перебування терористичних збройних формувань на території Сирії та України. Швидкими темпами нарощують свій економічний потенціал Китай та Індія, що у найближчому часі не зможуть задовольнятися своїм теперішнім статусом. До цього, актуальним є і конфлікт Індії та Пакистану [1]. Наявність ядерної зброї у вищезазначених держав свідчить не лише про можливість її застосування, а й про необхідність розробки та створення систем виявлення параметрів ядерних вибухів та захисту від них.

Інформацію, що отримують від засобів засічки ядерних вибухів, використовують, в першу чергу, для оперативної оцінки стану боєздатності підрозділів, з якими втрачений зв'язок. При цьому точність визначення координат ядерних вибухів різними джерелами інформації може змінюватися в широких межах: похибка для світлотехнічних засобів складає 0,2 км, радіотехнічних засобів – до 1 км, постами візуального спостереження – до 1,5 км. Однак всі вони

морально застарілі та зняті з виробництва.

Як показали дослідження, при неможливості ідентифікувати тип боєприпасу (ядерний термоядерний, нейтронний) неможливо мати достовірні дані про спектрально-кутові характеристики імпульсного гамма-нейтронного випромінювання проникаючої радіації, що впливає на особовий склад, і, відповідно, виникають значні похибки в оцінці радіаційного ураження підрозділів і частин за даними прогнозу.

Тому проблема розробки пристроїв виявлення застосування противником ядерної зброї, її параметрів та максимального захисту від неї є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для виявлення факту наявності імпульсних точкових джерел, таких як ядерний вибух, та визначення напрямку на них відомі наступні методи та пристрої. Так в пристрої визначення радіонуклідів для контролю підземних ядерних вибухів [2] в якості блоку детектування благородних газів, що утворюються при ядерному вибуху, використовують решітчасту комірку пластику, яка покрита наночастками срібла та скінтілятор з внутрішнім

каналом, а в якості пристрою обробки – багатоканальний аналізатор імпульсів. В способі ідентифікації ядерного вибуху за ізотопами криптону та ксенону [3] пропонується визначати наявність факту ядерного вибуху за вимірними активностями радіоактивних благородних газів, що з'являються в атмосфері після вибуху. В іншому обладнанні ядерного виявлення та контролю з функцією дозиметрії в реальному часі [4] визначається миттєва доза випромінювання ядерного вибуху та виконується захист електроніки та електронної апаратури. Ці пристрої [2, 3, 4] фіксують факт наявності імпульсного джерела, але не визначають напрямку на нього.

В [5] описано пристрій, метод і програма для приблизної оцінки джерела, що генерує вибух, які основані на спостереженні за формою хмари вибуху. Необхідно відмітити, що даний пристрій має невисоку розподільчу здатність, а також залежність отриманих даних від погодних умов. В [6] запропонована система контролю та метод для визначення даних про вибух ядерного заряду та оцінки втрат живої сили та техніки, що включає блок детектування у вигляді кулі, на поверхні якого розташована велика кількість температурних датчиків – термопар, датчиків тиску, декілька датчиків гамма-випромінювання, декілька датчиків нейтронного випромінювання та електронний процесор сигналів. Метод визначення напрямку на ядерний вибух полягає в визначенні термопар, що нагріваються швидше, ніж інші. При цьому виникає проблема визначення напрямку на наступний ядерний вибух, оскільки необхідно, щоб температура в місці розташування термопар знизилась.

З урахуванням недоліків вище описаних методів та пристроїв авторами було запропоновано метод [7] та пристрій [8] для визначення напрямку на джерела гамма-випромінювання. Вони основані на використанні чотирьох багатоканальних аналізаторів імпульсів із блоками детектування з телурид кадмієвими детекторами розміром $5 \times 5 \times 2$ мм, що розташовані в кульовому або асиметричних поглиначах та працюють одночасно. Детектори вимірюють амплітуду енергії гамма-імпульсу, що реєструється як одиночний імпульс, і за відношенням вимірних амплітуд однієї до іншої визначається напрямок на гамма-джерело.

Мета статті: перевірити можливість використання способу визначення напрямку на імпульсні гамма-джерела, що запропонований

авторами, шляхом моделювання його на імпульсному джерелі світла та блоці детектування з кульовим поглиначем та кремнієвими детекторами.

Викладення основного матеріалу. Проблемою при проведенні експерименту для визначення напрямку на імпульсні гамма-джерела є необхідність в використанні (для іспитів) ядерного вибуху або імпульсного прискорювача. Тому, оскільки гамма-випромінювання і звичайне світло є електромагнітною хвилею з різною енергією, експеримент був проведений на постійному джерелі світла з проходженням його крізь поглинач, що його частково поглинає, та реєстрацією світла, що пройшло, кремнієвими детекторами ФД 337А. Дані детектори мають наступні корисні властивості: 1) відкрита поверхня площею 1 см^2 ; 2) технологія виготовлення р-п-переходу – дифузія бромом, що дозволяє розраховувати на підвищену радіаційну стійкість [9]; 3) товщина р-п-переходу може досягати 0,3 мм, що дозволяє вимірювати енергію бета-частинок до 300 кеВ, альфа часток до 10 МеВ; 4) невисока ціна за рахунок крупносерійного виробництва. Автори припускають, що взаємодія оптичного випромінювання та гамма-квантів з кремнієвими детекторами буде аналогічною, а амплітуда імпульсів пропорційна поглиненій в детекторі енергії. Це показано при вимірюванні альфа- (рис. 1) та бета-випромінювання [10], а також оптичного випромінювання (рис. 2).

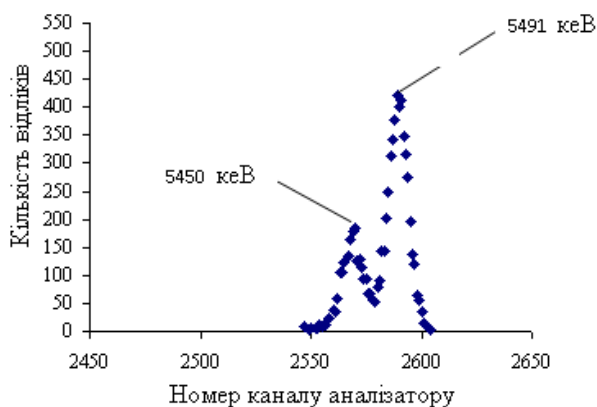


Рис. 1 – Енергетичний спектр альфа-джерела плутоній-238

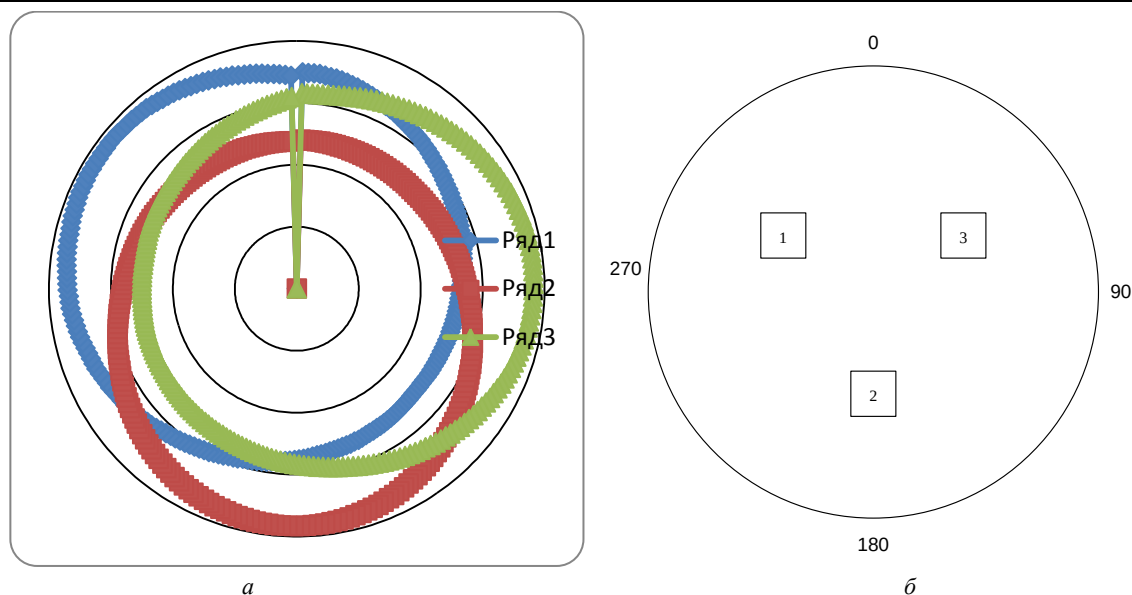


Рис. 2 – Результати експерименту: а - залежність кількості фотонів на трьох детекторах від кута на джерело оптичного випромінювання в діапазоні кутів від 0° до 360° , де ряд 1 відповідає інтенсивності, що пройшла крізь поглинач для першого детектора, ряд 2 – для другого, ряд 3 – для третього детектора; б – загальна схема розташування першого (1), другого (2) та третього (3) кремнієвих детекторів під кульовим поглиначем

Сигнали від кремнієвих детекторів реєструвалися шістнадцятьма розрядними аналогово-цифровими перетворювачами. В якості поглиначів та розсіювачів світла використовувалася емульсія води з розчином бріліантового зеленого кольору та вуглеводнів, що наповнювала кульову плоскодонну колбу ємністю 5 літрів. Детектори розміщувалися під дном колби в вершинах правильного трикутника. Колба розміщувалася на лімбі від токарного станку з градусною мірою від 0° до 360° . Джерело постійного світла розміщувалося в вертикальній площині під кутом 45° . Зміна освітлення падаючого на детектори проводилася шляхом обертання колби з детекторами від 0° до 360° зі швидкістю 6,67° в секунду.

При визначенні напрямку на імпульсне випромінювання за допомогою багатоканальних аналізаторів імпульсів використовувались показання значень амплітуд імпульсів, які пропорційні кількості та енергії гамма-квантів зареєстрованих детекторами, а на екранах спектрометрів реєструється по одному імпульсу з характерною для кожного детектора амплітудою, яка визначається товщиною поглиначів на шляху проникаючого випромінювання (рис. 3).

Тому при проведенні експерименту лімб постійно обертася від 0° до 360° , що дозволило в короткий проміжок часу отримати відповідну кількість фотонів на кожному з трьох детекторів. За отриманими даними була побудована залежність кількості фотонів від кута в просторі, яка показала, що кожному напрямку в просторі відповідає певне значення кількості гамма-квантів зареєстрованих усіма детекторами (рис. 2а).

Необхідно відмітити, що дані отримані на (рис. 2а) спочатку знімалися з аналогово-цифрових

перетворювачів у вигляді синусоїд (рис. 4), які зсунуті одна відносно іншої на кут 120° , що відповідає розташуванню кремнієвих детекторів, а їх амплітуди залежали від азимута джерела світла, після чого дані були передані в Excel для побудови залежності (рис. 2а).

З рисунку 2 видно, що розташування детекторів під кутом 120° один до одного, умовно у центрі малих трьох кіл, дає зміну кількості фотонів, що реєструються ними, в діапазоні кутів від 0° до 360° , та збігається з отриманими відповідними зовнішніми перехрестями трьох кіл інтенсивностей, що також розташовані під кутом 120° , а кожному значенню кута відповідає відповідне значення інтенсивності для кожного детектора відносно загального центру (на рисунку позначено центром великого кола).

Висновки. Таким чином, проведений експеримент підтвердив вірність розробленого методу та пристрою для визначення напрямку на гамма-джерела з похибкою, що не перевищувала 3 % від максимально зафіксованої інтенсивності на шкалі пристрою. У перспективі існує можливість визначати відстань та потужність імпульсного джерела гамма- та нейтронного випромінювання та визначати тип боєприпасу – ядерний, нейтронний або термоядерний по відношенню кількості гамма-квантів та нейтронів, а також використовувати дані засоби для контролю відхилення пучка в імпульсному прискорювачу, визначення напрямку на гамма-сплески в галактиці, радіаційної розвідки місцевості та захисту екіпажу танку від ударної хвилі ядерного вибуху.

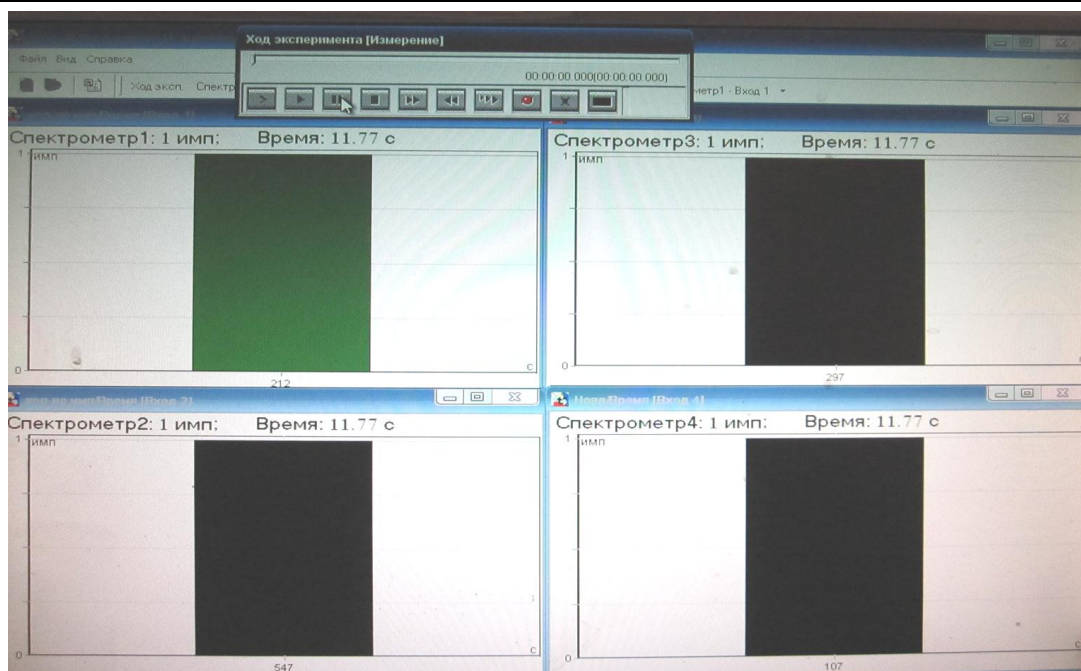


Рис. 3 – Моделювання показань аналізаторів імпульсів від імпульсного джерела оптичного випромінювання

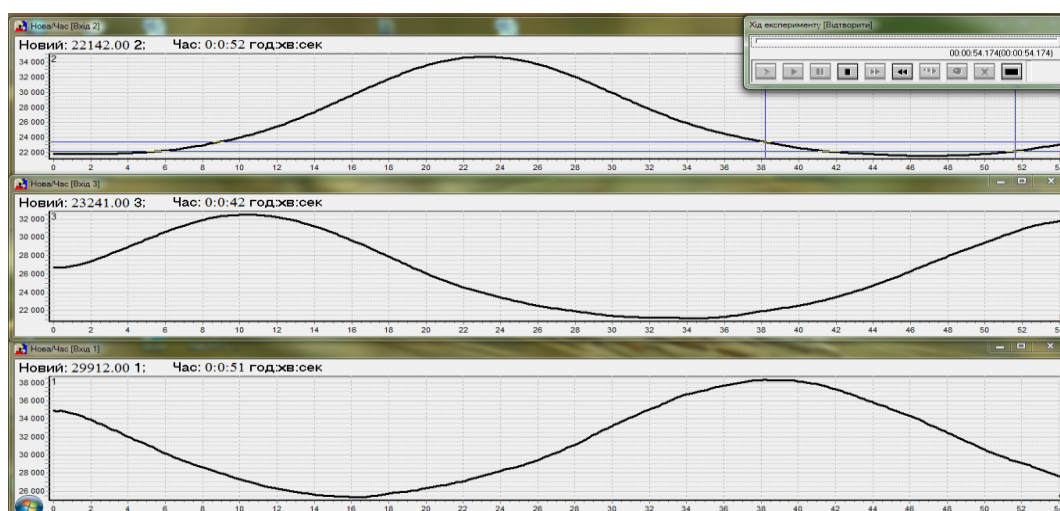


Рис. 4 – Первинні дані, що безпосередньо знімаються з аналогово-цифрових перетворювачів, де по осі абсцис розташовано час вимірювання, а по осі ординат - інтенсивність світла, що пройшло крізь поглинач

Список літератури:

1. Ядерна зброя як чинник міждержавних відносин в південній азії. / О. М. Теленко // Актуальні проблеми міжнародних відносин. – Київ, 2015. – Випуск 124 (частина II). – С. 22–29.
2. Crawford, Tara E.; Achampong, Christine V.; O'hearn, Philip G.; Santos, Veronica M.; Sarch, Cody A. Radionuclide detection device for verification of an underground nuclear explosion: Patent CA 2724143 A1, G21J5/00, G01T1/20. – CA 2724143 A1; release 29.05.2012
3. А. А. Грешилов, А. Л. Лебедев. Способ идентификации ядерного взрыва по изотопам криптона и ксенона: Пат. 2407039 РФ, G01T1/167, G01T1/30. – 2009148448/28; Заявл. 28.12.2009; Опубл. 20.12.2010.
4. Lee Nam Ho; Oh Seung Chan; Hwang Young Gwe; Lee Seung Min. A nuclear detection and control equipment with the functions of a real-time dosimetry: Patent KR 20110138954 (A), G01T1/16, G21J5/00. – KR 2010005915420100622; release 28.12.2011.
5. Hara Tomohiro; Okabayashi Kazuki; Sato Akiyoshi; Nukazuka Shigehiro. Device, method and program for estimation of explosion generation source: Patent JP 2011058924 (A), G01S11/16, G21J5/00, G01W1/00. – JP 2009020810220090909; release 24.03.2011.
6. Christianson, Charles L.; Hall, Jay S. Monitoring system and method for nuclear weapons effects detection and damage assessment: Patent US 4827414 (A), G01S11/12, G08B19/00, G21J5/00. – US 1985075270319850708; release 02.05.1989
7. О. М. Григор'єв, З. В. Білик, О. В. Сакун, В. В. Марущенко. Спосіб визначення напрямку на імпульсні джерела гамма-випромінювання: Патент UA 108262, G21J5/00. – а 201305335; опубліковано 10.04.2015.
8. Визначення напрямку в просторі на точкові джерела проникаючого випромінювання, у тому числі імпульсні: тези доповіді XX міжнародної науково-практичної конференції [Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я], (Харків, 15-17 травня 2012 р.) / З. В. Білик, О. М. Григор'єв, О. В. Сакун, В. В. Марущенко // НТУ «ХПІ». – 2012. – С. 137.
9. Абрамов А. И. Основы экспериментальных методов ядерной физики / А. И. Абрамов, Ю. А. Казанский, Е. С. Матусевич. Пособие. – Москва: Атомиздат, 1970. – 560 с.

10. Григор'єв О. М. Чотириканальний аналізатор імпульсів для одночасної реєстрації альфа-, бета-, гамма- та нейтронного випромінювань / О. М. Григор'єв, З. В. Білик, Ю. В. Литвинов [у др.] // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць. Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – 2014. – № 19 (1062). – С. 125–132.

References:

1. Yaderna zbroya yak chynnyk mizhderzhavnykh vidnosyn v pivdenniy aziyi [Nuclear weapons as a factor in international relations in South Asia]. / O. M. Telenko // Aktual'ni problemy mizhnarodnykh vidnosyn. – Kiev, 2015. – Vypusk 124 (chastyna II). – pp. 22–29.
2. Crawford, Tara E.; Achampong, Christine V.; O'hearn, Philip G.; Santos, Veronica M.; Sarch, Cody A. Radionuclide detection device for verification of an underground nuclear explosion : Patent CA 2724143 A1, G21J5/00, G01T1/20. – CA 2724143 A1 ; release 29.05.2012.
3. A. A. Greshilov, A. L. Lebedev. Sposob identifikatsii yadernogo vzryva po izotopam kriptona i ksenona [A method for identifying a nuclear explosion on isotopes of krypton and xenon] : Pat. 2407039 RF, G01T1/167, G01T1/30. – 2009148448/28 ; Zayavl. 28.12.2009 ; Opubl. 20.12.2010.
4. Lee Nam Ho; Oh Seung Chan; Hwang Young Gwe; Lee Seung Min. A nuclear detection and control equipment with the functions of a real-time dosimetry : Patent KR 20110138954 (A), G01T1/16, G21J5/00. – KR 2010005915420100622 ; release 28.12.2011.
5. Hara Tomohiro; Okabayashi Kazuki; Sato Akiyoshi; Nukazuka Shigehiro. Device, method and program for estimation of explosion generation source : Patent JP 2011058924 (A), G01S11/16, G21J5/00, G01W1/00. – JP 2009020810220090909 ; release 24.03.2011.
6. Christianson, Charles L.; Hall, Jay S. Monitoring system and method for nuclear weapons effects detection and damage assessment : Patent US 4827414 (A), G01S11/12, G08B19/00, G21J5/00. – US 1985075270319850708 ; release 02.05.1989.
7. O. M. Hryhor'yev, Z. V. Bilyk, O. V. Sakun, V. V. Marushchenko. Sposib vyznachennya napryamku na impul'sni dzhherela hamma-vyprominyuvannya [Method of determining the direction of pulsed source of gamma radiation] : Patent UA 108262, G21J5/00. – a 201305335 ; opublikovano 10.04.2015.
8. Vyznachennya napryamku v prostori na tochkovy dzhherela pronykayuchoho vyprominyuvannya, u tomu chysli impul'sni [Determining the direction in space to pinpoint the source of penetrating radiation, including pulse source] : tezysy dopovidi KhKh mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi [Informatsiyi tekhnolohiyi : nauka, tekhnika, tekhnolohiya, osvita, zdorv'ya], (Kharkov, 15-17 travnya 2012 r.) / Z. V. Bilyk, O. M. Hryhor'yev, O. V. Sakun, V. V. Marushchenko // NTU "KhPI". – 2012. – pp. 137.
9. Abramov A. I. Osnovy eksperimental'nykh metodov yadernoy fiziki [Basics of experimental methods of nuclear physics] / A. I. Abramov, Yu. A. Kazanskiy, E. S. Matusevich. Pidruchnik. – Moscow: Atomizdat Publ., 1970. – 560 p.
10. Hryhor'yev O. M. Chotyrykanal'nyy analizator impul'siv dlya odnochasnoyi reyestratsiyi al'fa-, beta-, hamma- ta neytronnoho vyprominyuvan' [Four-channel analyzer of pulse for simultaneous registration alpha-, beta-, gamma- and neutron radiation] / O. M. Hryhor'yev, Z. V. Bilyk, Yu. V. Litvinov [y dr.] // Proceedings of the National Technical University "KPI". Collected Works. Series: Power and converting machinery. – 2014. – No. 19 (1062). – pp. 125–132

Надійшла (received) 03.06.2017

Бібліографічний опис / Библиографическое описание / Bibliographic description

УДК 681.2:[623.454.836+623.454.84+623.454.86]

Визначення напрямку на імпульсне гамма-джерело з використанням сферичного поглиначу / З. В. Білик, О. М. Григор'єв, Ю. В. Литвинов, М. Є. Полянський, О. В. Сакун, В. В. Марущенко, І. Ю. Чернявський // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 4 (1226). – С. 89–94. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-4525.

УДК 681.2:[623.454.836+623.454.84+623.454.86]

Определение направления на импульсный гамма-источник с использованием сферического поглотителя / З. В. Билик, А. Н. Григорьев, Ю. В. Литвинов, Н. Е. Полянский, А. В. Сакун, В. В. Марущенко, И. Ю. Чернявский // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 4 (1226). – С. 89–94. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-4525.

UDC 681.2:[623.454.836+623.454.84+623.454.86]

Direction measurement on the pulse of gamma source using spherical absorber / Z. V. Bilyk, A. N. Grigoryev, Yu. V. Litvinov, N. E. Poljanskij, A. V. Sakun, V. V. Marushchenko, I. Yu. Chernyavsky // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tehnika. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 4 (1226). – P. 89–94. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-4525.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Білик Захар Валентинович - науковий співробітник Гвардійського факультету військової підготовки імені Верховної Ради України Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: +380936415266; e-mail: z1940@ukr.net.

Билик Захар Валентинович – научный сотрудник Гвардейского факультета военной подготовки имени Верховной Рады Украины Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», г. Харьков; тел.: +380936415266; e-mail: z1940@ukr.net.

Bilyk Zakhar Valentinovich - research fellow of Military Training Department of National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov; tel.: +380936415266; e-mail: z1940@ukr.net.

Григор'єв Олександр Миколайович - кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник науково-дослідної лабораторії Гвардійського факультету військової підготовки імені Верховної Ради України Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків.

Григорьев Александр Николаевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории Гвардейского факультета военной

підготовки імені Верховної Ради України Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», г. Харків.

Grigoryev Aleksandr Nikolayevich - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Research Fellow, senior research fellow of Military Training Department of National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkiv.

Литвинов Юрій Вікторович - старший викладач Харківського Національного університету імені В.Н. Каразіна, м. Харків, тел.: +38067-57-80-290.

Литвинов Юрий Викторович – старший преподаватель Харьковского Национального университета имени В.Н. Каразина, г. Харьков, тел.: +38067-57-80-290.

Litvinov Yury Viktorovich - senior lecturer of Kharkiv National University V.N. Karazin, Kharkiv; tel.: +38067-57-80-290.

Полянський Микола Єгорович - інженер I категорії Харківського Національного університету імені В.Н. Каразіна, м. Харків.

Полянский Николай Егорович – инженер I категории Харьковского Национального университета имени В.Н. Каразина, г. Харьков.

Polyansky Nikolay Yehorovich - engineer I category of Kharkiv National University V.N. Karazin, Kharkiv.

Сакун Олександр Валерійович - кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник, начальник кафедри Гвардійського факультету військової підготовки імені Верховної Ради України Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків.

Сакун Александр Валериевич - кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, начальник кафедры Гвардейского факультета военной подготовки имени Верховной Рады Украины Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», г. Харьков.

Sakun Aleksandr Valeryevich - Candidate of Biology, Deputy Head of the Department for Education and Research Affairs and Head of the Education Arm of Military Training Department of National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkiv.

Марущенко Володимир Васильович - кандидат біологічних наук, доцент, начальник кафедри Гвардійського факультету військової підготовки імені Верховної Ради України Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків.

Марущенко Владимир Васильевич - кандидат биологических наук, доцент, начальник кафедры Гвардейского факультета военной подготовки имени Верховной Рады Украины Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», г. Харьков.

Marushchenko Vladimir Vasilyevich - Candidate of Biology, Associate Professor, Head of the Chair of Combat Employment of Radiation, Chemical and Biology Defense Forces of Military Training Department of National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkiv.

Чернявський Ігор Юрійович – кандидат технічних наук, професор Гвардійського факультету військової підготовки імені Верховної Ради України Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків.

Чернявский Игорь Юрьевич – кандидат технических наук, профессор Гвардейского факультета военной подготовки имени Верховной Рады Украины Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», г. Харьков.

Chernyavsky Igor Yuryevich - candidate of technical sciences, professor of Military Training Department of National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov.

ЗМІСТ

Безымянный Ю.Г., Козирацкий Е. А., Назаренко В. А., Тесленко Л. О. Особенности акустических измерений в прессовках на основе порошка титана	3
Безымянный Ю. Г., Мазная А. В., Высоцкий А. Н., Комаров К. А., Талько О. В. Особенности использования неразрушающих акустических методов для прогнозирования защитных свойств комбинированных керамико-полимерных материалов	8
Вовна О.В., Лактіонов І.С., Зорі А. А. Макетний зразок комп'ютеризованого вимірювача параметрів мікроклімату промислових теплиць	14
Вовна О. В., Зорі А. А., Ахмедов Р. Н. Підвищення точності оптоелектронного вимірювача концентрації газу в рудничній атмосфері шахт	19
Петрищев О. М., Сучков Г. М., Познякова М. Є., Юданова Н. М. Моделирование электромагнитного возбуждения ультразвуковых крутильных волн в ферромагнитных стержнях	25
Плеснецов С. Ю., Мигущенко Р. П., Петрищев О. Н., Сучков Г. М. Математическое моделирование электромагнитно - акустического способа возбуждения ультразвуковых волн. Часть 1	35
Плеснецов С. Ю., Мигущенко Р. П., Сучков Г. М., Петрищев О. Н., Митин А. В. Ультразвуковой контроль волнами Релея и Лэмба металлоизделий с кривизной поверхности	41
Смолін Ю. А. Тестопридатність кінцевих вузлів контролю в комп'ютерних системах діагностики технологічних параметрів	46
Защепкіна Н. М., Наконечний О. А. Вибір експрес методик аналізу кількісних та якісних параметрів продуктів харчування із застосуванням УФ-випромінювання	51
Десятніченко О. В., Сучков Г. М., Бочарніков М. Р. Удосконалення аналогових фільтрів з резонансною та смуговою характеристикам	57
Хомяк Ю. В., Григоренко С. Н., Слободчук А. Ю., Григоренко И. В. Повышение вероятности обнаружения дефектов экранированным ортогональным вихретоковым преобразователем	63
Светличный В. А., Хорошайло Ю. Е., Ампилогов М. А. Модель резонансного вихретокового преобразователя предназначенного для контроля тонких ферромагнитных пленок	68
Светличный В. А., Хорошайло Ю. Е., Мулявка О. В., Сова А. В. Особенности выявления дефектов тонких электропроводящих пленок	72
Головкина Л. В., Мартынов А. О., Тихоненко А. В. Управление системами ESP	77
Литвинов Ю. В., Григор'єв О. М., Білик З. В., Полянський М. Є., Сакун О. В., Марущенко В. В., Чернявський І. Ю. Деякі аспекти створення приладу визначення напрямку на точкові джерела гамма випромінювання	82
Білик З. В., Григор'єв О. М., Литвинов Ю. В., Полянський М. Є., Сакун О. В., Марущенко В. В., Чернявський І. Ю. Визначення напрямку на імпульсне гамма-джерело з використанням сферичного поглиначка	89

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ»**

Збірник наукових праць

**Серія
«Електроенергетика та перетворювальна техніка»**

Випуск 4 (1226) 2017

Науковий редактор: д-р техн. наук проф. Г.М. Сучков

Технічний редактор: І.Г. Хорошайло

Відповідальний за випуск канд. техн. наук Г.Б. Обухова

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХПІ»
каф. Комп'ютерні та радіоелектронні системи контролю та діагностики,
тел. (057) 707-63-80, 7(057) 707-69-34; e-mail: vestnikhpi@gmail.com

Підп. до друку 07.12.2017 р. Формат 60х84 1/8. Папір офсетний. Гарнітура Таймс.

Ум.друк.арк. 12. Обл.-вид. арк. 11,1.

Наклад 300 прим. Зам. № 17-12/04. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ».

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 116 от 10.07.2000 р.

61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

Віддруковано у ТОВ «Оберіг»

61140, м. Харків, проспект Гагаріна, 62, к. 97.

Свідоцтво про реєстрацію видавничої діяльності ДК № 3045

від 07.12.2007 р.