

КРА

ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ



Вирощування
монокристалів
складних оксидів



Виготовлення монокристалічних
епітаксійних шарів складних оксидів
методом рідинно-фазної епітаксії



Виготовлення радіоелектронних компонентів
на основі керамічної та товстоплівкової технологій

До статті

«До 50-річчя науково-виробничого
підприємства "Електрон-Карат"»

4–6 2022

ЛИПЕНЬ — ГРУДЕНЬ

**НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ
«ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ»**

ISSN 2225-5818 (Print)
ISSN 2309-9992 (Online)

Виходить один раз в 2 місяці

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР

К. т. н. О. Ф. Бондаренко
(КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна)

РЕДАКЦІЙНА РАДА

Акад. НАНУ, д. ф.-м. н. О. Є. Беляєв (м. Київ, Україна)
Д. т. н. М. М. Ваків (м. Львів, Україна)
Д. т. н. Г. О. Оборський (м. Одеса, Україна)
К. т. н. В. М. Чміль (м. Київ, Україна)
О. А. Тихонова (м. Одеса, Україна)

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

<i>Д. т. н. С. Г. Антоциук</i> (м. Одеса, Україна)	<i>D. Eng. D. Morales</i> (Granada, Spain)
<i>Д. т. н. А. П. Бондарев</i> (м. Львів, Україна)	<i>Д. т. н. І. Ш. Неелюдов</i> (м. Харків, Україна)
<i>Prof. I. Vajda</i> (Budapest, Hungary)	<i>Dr. Sc. D. Nika</i> (Chisinau, Moldova)
<i>Prof. D. Vinnikov</i> (Tallinn, Estonia)	<i>Д. т. н. Ю. Є. Ніколаєнко</i> (м. Київ, Україна)
<i>Prof. I. Galkin</i> (Riga, Latvia)	<i>Prof. V. Pires</i> (Setúbal, Portugal)
<i>К. т. н. Е. М. Глушеченко</i> (м. Київ, Україна), заст. головного редактора	<i>Д. ф.-м. н. С. В. Плаксін</i> (м. Дніпро, Україна)
<i>Dr. D. Guilbert</i> (Lorraine, France)	<i>К. т. н. В. М. Проконєць</i> (м. Київ, Україна)
<i>Prof. K. Dhoska</i> (Tirana, Albania)	<i>D. Eng. N. Rodriguez</i> (Granada, Spain)
<i>Д. ф.-м. н. В. В. Должиков</i> (м. Харків, Україна)	<i>Prof. E. Romero-Cadaval</i> (Badajoz, Spain)
<i>Д. т. н. А. О. Дружинін</i> (м. Львів, Україна)	<i>К. ф.-м. н. О. В. Рибка</i> (м. Харків, Україна)
<i>Д. т. н. А. А. Єфіменко</i> (м. Одеса, Україна), заст. головного редактора	<i>К. т. н. П. С. Сафронов</i> (м. Київ, Україна)
<i>Д. ф.-м. н. Д. В. Корбутяк</i> (м. Київ, Україна)	<i>Д. т. н. В. С. Ситніков</i> (м. Одеса, Україна)
<i>Д. т. н. С. І. Круковський</i> (м. Львів, Україна)	<i>К. т. н. С. А. Степенко</i> (м. Чернігів, Україна)
<i>Чл.-кор. НАНУ, д. ф.-м. н. В. С. Лисенко</i> (м. Київ, Україна)	<i>Dr. Sc. Z. Stević</i> (Belgrade, Serbia)
<i>Prof. J. Martins</i> (Caparica, Portugal)	<i>Д. х. н. В. М. Томашик</i> (м. Київ, Україна)

В редакції можна оформити передплату на журнал або придбати будь-який номер

Контактна інформація

Україна, 65044, м. Одеса, а/с 17;
tkea.journal@gmail.com, www.tkea.com.ua,
+38 099 444 63 52.

Редакція

*О. А. Тихонова, А. А. Єфіменко, О. О. Алексєєва,
М. Г. Глава, Н. М. Колганова, Є. І. Корецька.*

**ТЕХНОЛОГИЯ
И
КОНСТРУИРОВАНИЕ
В
ЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЕ**

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ

2022 № 4–6

Рік видання 46-й

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України у галузях «Технічні науки», «Фізико-математичні науки» (категорія «Б») за спеціальностями 105, 123, 132, 141, 151, 152, 163, 171, 172

Входить до міжнародної довідкової системи з періодичних та продовжуваних видань Ulrich's Periodicals Directory (США), міжнародної системи бібліографічних посилань CrossRef, бази даних DOAJ, Open Ukrainian Citation Index (OUCI), Google Scholar; реферується в УРЖ «Джерело»

Номер вийшов за підтримки Національного університету «Одеська політехніка», НВП «Сатурн», НВП «Електрон-Карат»

Схвалено до друку Вченою радою Національного університету «Одеська політехніка» (Протокол № 3 від 16.12.2022 р.) Відп. за випуск: О. А. Тихонова

ЗАСНОВНИКИ

Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України; Науково-виробниче підприємство «Сатурн»; Національний університет «Одеська політехніка»; Видавництво «Політехперіодика»

Свідоцтво про реєстрацію № КВ 21788-11688ПР від 21.12.2015 р.

ЗМІСТ

Нові компоненти для електронної апаратури

Резистивні сенсори вологи на основі плівок наноцелюлози для біорозкладної електроніки. *Латууда В. А., Ліневич Я. О., Душейко М. Г., Коваль В. М., Барбаи В. А.* 3

НВЧ-техніка

Особливості проектування поздовжньо-співвісних хвилеводно-мікросмужкових з'єднувачів. *Глушеченко Е. М.* 10

Системи передавання та обробки сигналів

Реалізація кодека Манчестер для систем передавання інформації на основі мікроконтролерів AVR- та ARM-архітектури. *Садченко А. В., Кушніренко О. А., Кушніренко Н. П., Садченко О. В., Троянський О. В.* 17

Енергетична електроніка

Імпульсні перетворювачі зі зниженою пульсацією вихідного струму. *Бондаренко О. Ф., Голубенко О. П., Яма О. С., Зінченко А. Ю.* 25

Використання повного факторного експерименту для моделювання генерації електроенергії сонячними батареями. *Сфіменко А. А., Логвінов О. В., Присяжнюк Л. І.* 32

Технологічні процеси та обладнання

Процеси кристалізації тонких полікристалічних шарів стибніту галію для термофотовольтаїчного застосування. *Баганов Є. О., Шутов С. В., Цибуленко В. В., Левицький С. М.* 39

Матеріали електроніки

Оцінка чистоти Cd, Zn, Pb шляхом безконтактного вимірювання питомого електроопору за температури рідкого азоту. *Кондрік О. І., Ковтун Г. П., Щербань О. П., Солопихін Д. О.* 46

Вплив природи електроліту на електрохімічні властивості вуглецевого матеріалу рослинного походження. *Семків І. В., Ващинський В. М., Кашуба А. І., Ільчук Г. А., Соловйов М. В.* 52

Метрологія, стандартизація

Порівняння надійності термоелектричних генераторних модулів з різними схемами сполучення термоелементів. *Горський П. В.* 59

До історії науки та техніки

До 50-річчя Науково-виробничого підприємства «Електрон-Карат». *Ваків М. М.* 65

Рецензенти номера 70

Рекомендації авторам журналу 71

CONTENTS

New components for electronic equipment

Resistive humidity sensors based on nanocellulose films for biodegradable electronics. *Lapshuda V. A., Linevych Ya. O., Dusheiko M. G., Koval V. M., Barbash V. A.* 3

Microwave engineering

Particular aspects of designing longitudinal-coaxial waveguide-microstrip connectors. *Glushechenko E. M.* 10

Signals transfer and processing systems

Implementation of Manchester codec for information transmission systems based on AVR and ARM architecture microcontrollers. *Sadchenko A. V., Kushnirenko O. A., Kushnirenko N. P., Sadchenko O. V., Troyanskiy O. V.* 17

Power electronics

Pulse converters with reduced output current ripple. *Bondarenko O. F., Holubenko O. P., Yama O. S., Zinchenko A. Y.* 25

Using full factorial experiment to simulate electricity generation by solar batteries. *Yefimenko A. A., Logvinov O. V., Prisyazhniuk L. I.* 32

Production technology and equipment

Crystallization processes of thin polycrystalline layers of gallium stibnide for thermophotovoltaic application. *Bahanov Ye. O., Shutov S. V., Tsybulenko V. V., Levytskyi S. N.* 39

Materials of electronics

Estimating purity of Cd, Zn, Pb by non-contact measurement of specific electrical resistance at liquid nitrogen temperature. *Kondrik A. I., Kovtun G. P., Shcherban O. P., Solopikhin D. O.* 46

Influence of electrolyte nature on electrochemical properties of carbon material of plant origin. *Semkiv I. V., Vashchynskiy V. M., Kashuba A. I., Ilchuk H. A., Solovyov M. V.* 52

Metrology, standardization

Comparison of reliability of thermoelectric generator modules with different schemes for connecting thermoelements. *Gorskyi P. V.* 59

On the history of science and engineering

On the 50th anniversary of the Scientific Research Company "Electron-Carat". *Vakiv M. M.* 65

Reviewers

70

Information for authors

71

The journal is included in the category "B" of the List of scientific specialized publications of Ukraine in the fields of Technical Sciences and Physical and Mathematical Sciences by the following specialties: 105, 123, 132, 141, 151, 152, 163, 171, 172

The journal is referenced in the International reference system "Ulrich's Periodicals Directory" (USA), CrossRef bibliographic references system, DOAJ database, Open Ukrainian Citation Index (OUCI) citation database, Google Scholar.

The issue was released with the support of Odesa Polytechnic National University, SPE "Saturn", SRC "Elektron-Carat"

Approved for publication by Academic Council of Odesa Polytechnic National University (Summary Records No. 3, 16.12.2022)

Editor in charge of the issue:
Olena Tykhonova

FOUNDERS:

V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics NAS of Ukraine (Kyiv);
Scientific production enterprise "Saturn" (Kyiv);
Odesa Polytechnic National University; Publishing house "Politehperiodika" (Odesa)

Registration certificate
№ KB 21788-11688IP
of 21.12.2015

В. А. ЛАПШУДА, Я. О. ЛИНЕВИЧ, М. Г. ДУШЕЙКО, к. т. н. В. М. КОВАЛЬ, к. х. н. В. А. БАРБАШ

Україна, м. Київ, Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

E-mail: vlad.lapshuda@gmail.com

РЕЗИСТИВНІ СЕНСОРИ ВОЛОГИ НА ОСНОВІ ПЛІВОК НАНОЦЕЛЮЛОЗИ ДЛЯ БІОРОЗКЛАДНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

Синтезовано резистивні сенсори вологи, вологочутливий шар яких виготовлено з наноцелюлози. Дослідження показало, що наноцелюлоза проявляє вологочутливі характеристики, а отже, враховуючи її механічні характеристики, може бути використана для виготовлення на її основі елементів гнучкої електроніки, наприклад носимих сенсорів вологи медичного призначення (сенсори поту, частоти дихання тощо).

Ключові слова: наноцелюлоза, резистивний сенсор вологи, біорозкладна електроніка.

На теперішній час найбільш вживаними матеріалами для виготовлення електронних компонентів є неорганічні матеріали, такі як кремній, арсенід галію, антимонід індію, метали та їхні оксиди, а також різні органічні матеріали, які використовуються як функціональні шари або матеріали для корпусування. Обидві групи матеріалів об'єднує те, що після закінчення експлуатації електронних приладів вони потребують утилізації. В протилежному випадку вони накопичуються у вигляді електронного сміття та призводять до забруднення навколишнього середовища [1, 2]. На сьогодні перспективними для використання в електроніці є біорозкладні матеріали, тобто матеріали, здатні до розкладання під дією мікроорганізмів та грибів [1—6]. До таких матеріалів відносяться полімери на основі хітину, камеді, целюлози та інших природних матеріалів [2]. До числа таких перспективних матеріалів відноситься наноцелюлоза (НЦ), яка має унікальні властивості: високий модуль еластичності та велику питому площу поверхні, високу прозорість і низьку вагу, біорозкладність і біосумісність, низький коефіцієнт теплового розширення та хімічну реактивність, меншу собівартість виробництва в порівнянні з синтетичними полімерами [7]. НЦ може використовуватись як для органічного пакування, так і для зеленої електроніки, тобто в електронних пристроях, що не потребують утилізації та здатні самочинно розкладатися у природі. Крім того, завдяки властивостям наноцелюлози на її основі можна виготовляти гнучкі прилади носимої електроніки, які на противагу твердотільним аналогам можуть кріпитись на одязі та безпосередньо на тілі людини, і навіть бути частиною штучної шкіри.

Наноцелюлоза, як природний полімерний матеріал, складається із частинок з поперечними

розмірами в межах 10—80 нм [7]. Її отримують із рослинної сировини, до якої відносяться і деревина, і такі недеревні матеріали, як пшениця, льон, міскантус, кенаф, очерет тощо [1, 2, 7—9].

Оскільки наноцелюлоза є гігроскопічним матеріалом, представляє інтерес дослідження можливостей її використання в резистивних сенсорах вологи [4, 8]. Такі сенсори є важливим електронним компонентом, що використовується у багатьох сферах людського життя: сільське господарство, харчова промисловість, машинобудування, медицина тощо. Очевидно, що з огляду на необхідність роботи сенсорів вологи у різних середовищах, вологочутливий матеріал сенсорів має характеризуватись високими значеннями температурної і часової стабільності та великим відгуком.

На теперішній час існують сенсори як на основі чистої наноцелюлози [8, 10], так і на основі нанокомпозитів наноцелюлози з іншими наноматеріалами: вуглецевими нанотрубками (CNT — carbon nanotubes), оксидом графену (GO — graphene oxide), відновленим оксидом графену (rGO — reduced graphene oxide) тощо [2, 10—15]. В розроблених сенсорах наноцелюлоза використовується трьома різними способами: чиста наноцелюлоза або нанокомпозит на її основі у вигляді вологочутливої плівки, яка наноситься на тверду підкладку [2, 4]; чиста наноцелюлоза у вигляді гнучкої підкладки, що є вологочутливим шаром одночасно [11, 13]; чиста наноцелюлоза у вигляді гнучкої підкладки, на поверхню якої наносять вологочутливі шари інших матеріалів [16]. Так, у роботі [15] представлено сенсор на основі нанокомпозиту PVA/CNF/rGO, який демонструє відгук порядку $1 \cdot 10^3$. У роботі [10] описано конструкцію гнучких сенсорів на основі чистої наноцелюлози, найкращий відгук яких становить $5,5 \cdot 10^3$, що знач-

но поступається сенсорам вологи, розробленим на штучних полімерах (10^4 — 10^5). Робочий діапазон для більшості сенсорів становить від 11 до 95% RH (relative humidity — відносна вологість). Якщо розглянути ці сенсори з точки зору швидкодії, то час відгуку для них становить 200—300 с, що також потребує поліпшення. В усіх розглянутих роботах акцент ставився на дослідженнях впливу природи вологочутливого матеріалу на характеристики сенсорів. При цьому залишилося невирішеним питання залежності характеристик сенсорів вологості від маси (товщини) вологочутливої плівки наноцелюлози.

Метою цієї роботи є дослідження впливу маси вологочутливої плівки наноцелюлози на характеристики резистивних сенсорів вологи для покращення їхнього відгуку та швидкодії.

Експериментальна частина

Підготовка наноцелюлози. Наноцелюлозу екстрагували з органосольвентної очеретяної целюлози методом окиснення в розчині 2,2,6,6-тетраметилпіперидин-1-оксиду (ТЕМПО) з подальшим центрифугуванням та ультразвуковою обробкою для отримання прозорого та стабільного в часі гідрогелю [9]. Для одержання органосольвентної очеретяної целюлози використовували стебла очерету звичайного (*Phragmites australis*), дешевої дикорослої квіткової рослини заввишки до 4 м, що активно росте на берегах річок і озер Європи, Азії, Північної Африки та Америки. Целюлозу одержували варінням попередньо проекстрагованих лугом подрібнених частинок стебел очерету в суміші крижаної оцтової кислоти та пероксиду водню зі значеннями технологічних параметрів, рекомендованих для різних видів недеревної рослинної сировини [17].

Виготовлення сенсорів. Конструктивно розроблений резистивний сенсор вологи являє собою ситалову підкладку з електродною системою у вигляді зустрічно-штирьової гребінки (ЗШГ), на поверхню якої нанесено вологочутливий шар наноцелюлози (рис. 1). Сенсори виготовлялися із вологостійких матеріалів, таких як ситал (підкладка) та Ni, Ti (матеріали електродів).

Процес виготовлення сенсорів вологості на основі наноцелюлози складався з таких технологічних операцій:

- осадження суцільної двошарової металевої плівки Ti/Ni на поверхню ситалової підкладки методом ВЧ магнетронного розпилення в атмосфері аргону на установці КАТОД-1М (тиск у камері $5 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст., робочі напруга 600 В та струм 1 А) з товщиною отриманої двошарової плівки 0,25 мкм;
- формування методом фотолітографії електродної системи з осадженого шару металізації у вигляді ЗШГ з відстанню між гребінками 100 мкм;
- припаювання електричних виводів до контактних площадок електродної системи;

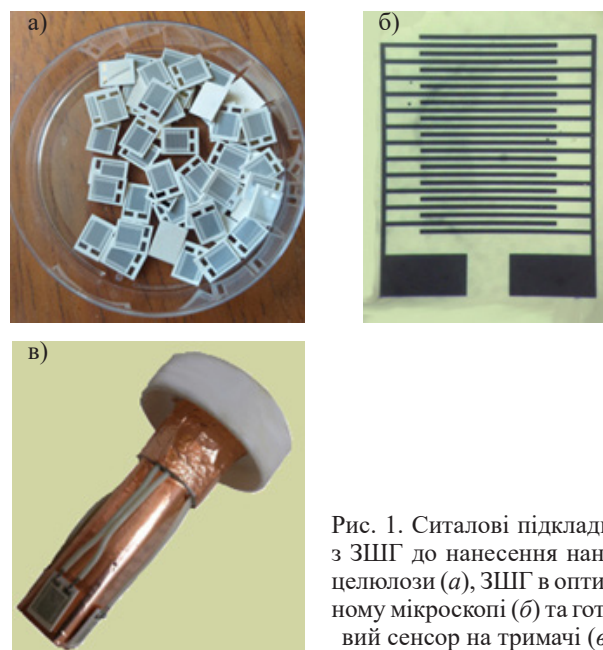


Рис. 1. Ситалові підкладки з ЗШГ до нанесення наноцелюлози (а), ЗШГ в оптичному мікроскопі (б) та готовий сенсор на тримачі (в)

- очищення поверхні сенсора від органічних забрудників в органічному розчиннику тетрахлорид вуглецю (CCl_4) за температури 75°C ;

- нанесення крапаням наноцелюлозного гідрогелю на поверхню ЗШГ та його висушування до утворення суцільної плівки різної маси (0,3; 0,4; 0,5; 1,8; 3,3; 3,6 мг).

Методика вимірювання характеристик. Для дослідження отриманих сенсорів вологості використовувалися гігростати на основі насичених розчинів солей. Принцип роботи таких гігростатів полягає у тому, що згідно з законом Рауля насичений розчин солі у дистильованій воді генеруватиме стабільну відносну вологість у приповерхневому шарі повітря. Для генерації різних значень відносної вологості RH використовували насичені розчини солей LiCl, MgCl_2 , NaBr, NaCl, KCl, а також дистильовану воду (табл. 1).

Для вимірювання електричних характеристик сенсорів використовувався RLC-метр P-5030 з частотами тестового сигналу 100 Гц та 1 кГц, для контролю вологості повітря у гігростатах — комерційний термогігрометр EZODO HT-390, для вимірювання маси вологочутливої плівки наноцелюлози на поверхні сенсора — прецизійні ваги OHAUS Pioneer PX163 з точністю $\pm 0,0001$ г.

Таблиця 1

Значення відносної вологості повітря у гігростатах з насиченими розчинами солей

Розчин солі	LiCl	MgCl_2	NaBr	NaCl	KCl	H_2O
RH, %	12	33	60	75	85	98

Результати експерименту та їх обговорення

Відгук та чутливість резистивних сенсорів вологи. Принцип роботи резистивного сенсора полягає в зміні опору вологочутливої плівки на наноцелюлози залежно від вологості середовища, в якому він розташовується. При цьому зростання провідності наноцелюлози пояснюється механізмом Гроттхаса [16]: під час прикладення напруги електричний заряд переноситься протонами, які здатні стрибками переміщатися між молекулами, у складі яких є водневі зв'язки (наприклад, між молекулами води або целюлози). Тобто, протонна теорія провідності передбачає стрибковий механізм руху носіїв заряду (протонів). В процесі поглинання вологи плівкою наноцелюлози кількість молекул води в об'ємі плівки зростає, а це своєю чергою збільшує кількість протонів, що призводить до зростання провідності плівки. Залежності опору досліджуваних зразків від відносної вологості повітря для сенсорів з різною масою плівки наноцелюлози наведено на **рис. 2**. Для побудови використано логарифмічний масштаб, оскільки для окремих зразків спостерігався значний перепад величини опору при зміні вологості (до 6 порядків). Відгук сенсора визначався як відношення значень опору за найменшого та найвишого рівнів відносної вологості повітря.

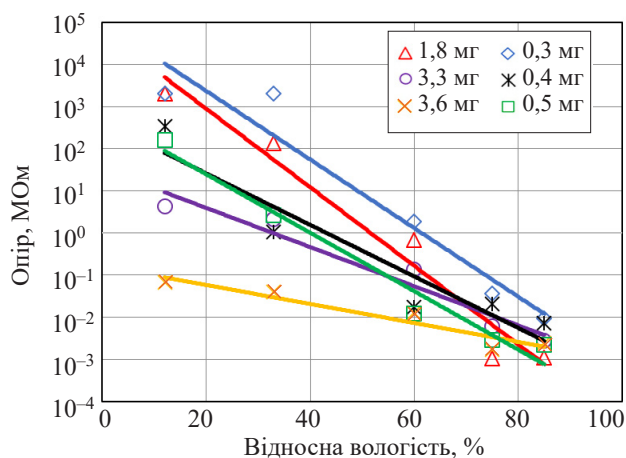


Рис. 2. Залежність опору сенсорів вологи від відносної вологості повітря для різної маси плівок наноцелюлози

Таблиця 2

Відгук та чутливість сенсорів вологи на основі плівок наноцелюлози різної маси

Маса плівки НЦ, мг	Відгук сенсора за частоти:		Чутливість сенсора, (%RH) ⁻¹ , за частоти:	
	100 Гц	1000 Гц	100 Гц	1000 Гц
0,3	2,22·10 ⁵	1,05·10 ⁵	0,187	0,172
0,4	8,40·10 ⁴	3,81·10 ⁴	0,141	0,131
0,5	8,19·10 ⁴	5,43·10 ⁴	0,16	0,155
1,8	1,99·10 ⁶	1,39·10 ⁴	0,215	0,145
3,3	8,94·10 ²	9,32·10 ²	0,107	0,105
3,6	1,45·10 ¹	1,66·10 ¹	0,052	0,046

Як видно з **табл. 2**, на відгук сенсора значно впливає маса НЦ: зміна маси може призвести до зміни відгуку на 5 порядків.

Зразки вологочутливої плівки за масою можна розділити на дві групи: легкі — від 0,3 до 0,5 мг, та важкі — від 1,8 до 3,6 мг. Згідно з даними **табл. 2**, на частоті тестового сигналу 100 Гц для легких зразків зміна (зменшення) відгуку, що спостерігається при підвищенні маси плівки НЦ, є незначною, однак при переході до важких зразків спостерігається різке зростання відгуку з 8,19·10⁴ для маси 0,5 мг до 1,99·10⁶ для маси 1,8 мг. Таку залежність можна пояснити тим, що оскільки площа всіх зразків однакова, зростання маси вологочутливої плівки відбувається через збільшення її товщини, а значить, і об'єму, в якому відбувається перенесення зарядів, тобто опір чутливого шару зменшується. З подальшим зростанням маси плівки спостерігається різке падіння відгуку сенсора, що може бути обумовлено тим, що адсорбованим молекулам води потрібно подолати більшу відстань для досягнення поверхні електродної системи, що своєю чергою зменшує відгук такого сенсора. На частоті вимірювального сигналу 1000 Гц не спостерігається сплесків величини відгуку з переходом від легких плівок до важких, а максимальне значення відгуку складає 1,05·10⁵ для зразка з масою плівки НЦ 0,3 мг.

Частота тестового сигналу також впливає на відгук сенсорів вологи, однак в значно меншій мірі, аніж маса НЦ: зі зростанням частоти тестового сигналу зі 100 до 1000 Гц відгук сенсорів зменшується приблизно у 2—2,5 рази. Вплив частоти тестового сигналу вочевидь обумовлений вищою масою протонів у порівнянні з електронами, що обмежує їхню рухливість при зміні полярності тестового сигналу. В результаті за вищої частоти тестового сигналу відгук сенсорів вологи запізнюється порівняно з меншою частотою.

Оскільки залежність опору сенсорів від вологості є експоненціальною, чутливість визначалася як показник степені експоненти в рівнянні апроксимувальної кривої. Значення чутливості для кожного зі зразків наведено у **табл. 2**, де можна побачити аналогічні відгуку її залежності від маси наноцелюлози та частоти. Максимальне значення чутливості на частоті 100 Гц становить 0,215 (%RH)⁻¹, на частоті 1000 Гц — 0,172 (%RH)⁻¹.

Реверсивність та повторюваність характеристик резистивних сенсорів вологи. Реверсивність сенсорів досліджувалася шляхом вимірювання їхнього опору за зміни рівня відносної вологості повітря з 12 до 98% та у зворотному напрямку — від 98 до 12%. В результаті вимірів отримано дві залежності: криву адсорбції (опір спадає) та криву десорбції (опір зростає), що наведені на **рис. 3**. З рисунка видно, що для обох зразків крива адсорбції не збігається з кривою десорбції, тоб-

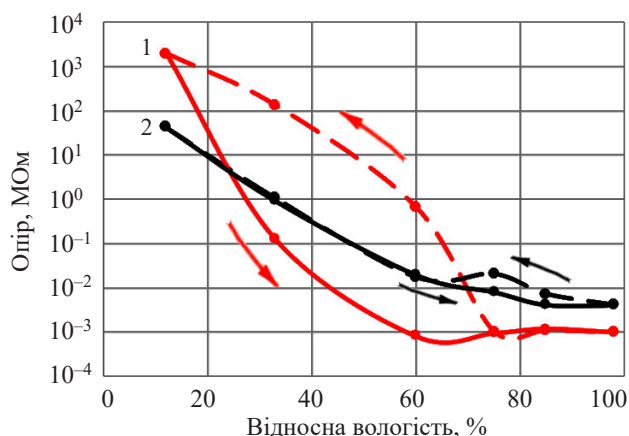


Рис. 3. Залежності опору від відносної вологості в процесі адсорбції (суцільна лінія) та десорбції (пунктир) на частоті тестового сигналу 100 Гц сенсорів вологи на основі плівок наноцелюлози різної маси:
1 — 1,8 мг; 2 — 0,4 мг

то має місце гістерезис, причому значно суттєвіша розбіжність спостерігається для зразка з більшою масою. Явище гістерезису можна пояснити тим, що адсорбція є екзотермічним процесом, а десорбція — ендотермічним, що сповільнює швидкість його проходження.

Величина гістерезису γH розраховувалась за формулою

$$\gamma H = \pm [\Delta C_{\max} / (C_{\max} - C_{\min})],$$

де ΔC_{\max} — максимальна різниця значень опору за фіксованого значення вологості на кривих адсорбції та десорбції;

C_{\min} C_{\max} — мінімальне та максимальне значення опору на всьому діапазоні вимірювань.

Найменше значення гістерезису показав зразок з масою НЦ 0,4 мг (табл. 2): 0,04% на частоті 100 Гц та 0,12% на частоті 1000 Гц. Сенсор вологості з максимальною чутливістю (маса НЦ 1,8 мг) характеризується величиною гістерезису 6,72% на частоті 100 Гц та 0,54% на частоті 1000 Гц.

Повторюваність характеристик досліджуваних сенсорів визначалась в процесі циклічного змінювання опору. Вимірювання опору проводили після перебування зразка у середовищі з низькою відносною вологістю ($RH = 12\%$), потім в середовищі з більшою відносною вологістю ($RH = 60\%$), і знов при низькій. Такий цикл повторювали двічі. Результати, отримані протягом двох циклів для зразків, які мали найменше та найбільше відхилення опору на частоті 1000 Гц, наведено на рис. 4. Як можна бачити, за $RH = 12\%$ значення опору сенсора з масою НЦ 0,5 мг, на відміну від сенсора з масою НЦ 1,8 мг, наприкінці стає меншим, що, очевидно, обумовлено накопиченням вологи у плівці наноцелюлози, яке дається взнаки при такому об'ємі НЦ і величині RH . Одержані результати узгоджуються з наведеним вище аналізом гістерезису.

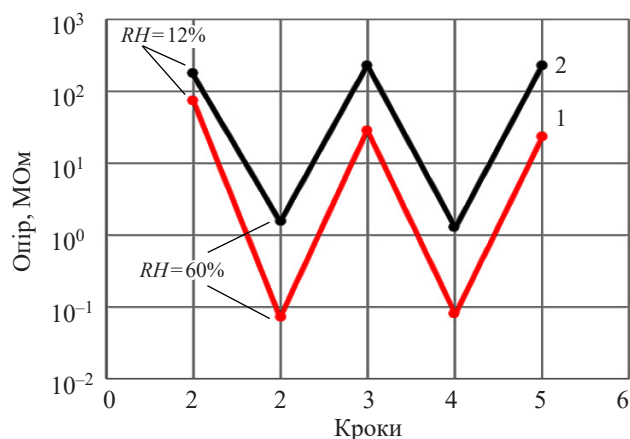


Рис. 4. Величина опору сенсорів вологи на основі плівок наноцелюлози різної маси, виміряна на кожному кроці в двох циклах поперемінної зміни RH з 12 до 60%:
1 — 0,5 мг; 2 — 3,3 мг

У табл. 3 наведено відхилення сигналу сенсора, вимірюваного наприкінці другого циклу, відносно результатів вимірювання на початку першого циклу. Тут видно, що на обох частотах тестового сигналу найбільш повторювані результати продемонстрував зразок з масою 3,3 мг: відхилення у величині опору після двох циклів становить 22,9% на частоті 100 Гц та 25,9% на частоті 1000 Гц. Максимальні відхилення сигналу під час циклування спостерігались для зразків з максимальною чутливістю, тобто з масою вологочутливого шару 1,8 мг на частоті 100 Гц (сигнал змінюється майже вдвічі) та з масою 0,5 мг на частоті 1000 Гц (сигнал змінюється на 62,2%).

Час відгуку та час відновлення резистивних сенсорів вологи. Час відгуку — це період, за який на виході сенсора встановлюється значення опору 90% від номінального при переміщенні сенсора із середовища з вологістю 12% у середовище з вологістю 60% (процес адсорбції). Визначені значення часу відгуку сенсорів наводяться у табл. 4, звідки видна тенденція до зростання часу відгуку зі зростанням маси вологочутливої плівки: найменший час відгуку має зразок з найменшою масою плівки наноцелюлози (0,3 мг) — 42 с, найбільший час має

Таблиця 3

Параметри реверсивності та повторюваності сенсорів вологи на основі плівок наноцелюлози різної маси

Маса плівки НЦ, мг	γH , %, за частоти:		Відхилення сигналу під час циклування, %, за частоти:	
	100 Гц	1000 Гц	100 Гц	1000 Гц
0,3	91,49	40,37	32,8	35,0
0,4	0,04	0,12	34,7	34,1
0,5	0,89	1,26	72,8	62,2
1,8	6,72	0,54	99,8	42,4
3,3	1,25	1,17	22,9	25,9
3,6	22,42	31,11	35,6	52,9

Таблиця 4

Параметри швидкодії, коротко- та довготривалої стабільності резистивних сенсорів вологи на основі плівок наноцелюлози різної маси

Маса плівки НЦ, мг	Час відгуку, с	Час відновлення, с	Відносна зміна опору сенсора, %, при витримці в середовищі з RH = 60%			
			протягом 60 хв за частоти:		протягом 65 діб за частоти:	
			100 Гц	1000 Гц	100 Гц	1000 Гц
0,3	42	115	9,1	10,2	4,56	3,46
0,4	250	160	13,3	13,4	22,4	20,9
0,5	270	60	7,99	7,8	9,33	7,18
1,8	600	2500	18,2	17,3	3,06	2,93
3,3	900	2400	31,7	39,2	14,8	16,5
3,6	960	3100	27,6	28,9	6,08	6,22

сенсор з найбільшою масою НЦ (3,6 мг) — 960 с. Така закономірність, вочевидь, пояснюється тим, що чим більше маса плівки, а значить і її товщина, тим більшою є відстань, яку треба продифундувати молекулам води від поверхні плівки до поверхні електродної системи, що збільшує час відгуку.

Час відновлення — це період, за який встановлюється 90% від рівноважного значення опору при переміщенні сенсора із середовища з RH = 60% у середовище з RH = 12% (процес десорбції). З наведених у табл. 4 даних видно, що для часу відновлення сенсорів спостерігається аналогічна з часом відновлення тенденція до зростання зі збільшенням маси вологочутливої плівки. При цьому слід зазначити, що час відновлення є значно більшим за час відгуку, це пояснюється фізикою процесів адсорбції та десорбції. Як вже відзначалося, адсорбція є екзотермічним процесом, на відміну від ендотермічного процесу десорбції, а отже й відбувається вона швидше. Десорбція є термоактивованим процесом, тобто потребує додаткової енергії із зовнішнього середовища для збільшення швидкості.

Стабільність резистивних сенсорів вологи. Короткотривала стабільність визначалася шляхом

витримки сенсорів у середовищах із відносною вологістю повітря 12% та 60% протягом 1 год.

Графіки короткотривалої стабільності наведено на рис. 5, а, звідки видно, що флуктуація значення опору сенсора протягом 60 хвилин для більшості зразків є задовільною. Значення відносного відхилення сигналу сенсорів опору подано у табл. 4 для рівня RH = 60%, оскільки за даної відносної вологості відхилення є більшими. Як видно з табл. 4, існує певна тенденція до зростання нестабільності при зростанні маси вологочутливої плівки. Так, при зростанні маси плівки НЦ від 0,5 до 3,3 мг рівень відхилень зростає від 7,99 до 31,7 %. Така поведінка сенсорів може бути викликана впливом залишкових солей у матеріалі вологочутливої плівки більшої товщини.

Довготривала стабільність оцінювалася на основі декількох вимірювань на часовому проміжку 65 днів при рівні відносної вологості 60%. Графіки зміни опору сенсора за довготривалого зберігання наведено на рис. 5, б, звідки видно, що з часом опір сенсорів зростає. Така поведінка може бути обумовлена процесами окислення. У табл. 4 наведено значення відносної зміни опору сенсора за весь період зберігання. На частоті вимірювального сигналу

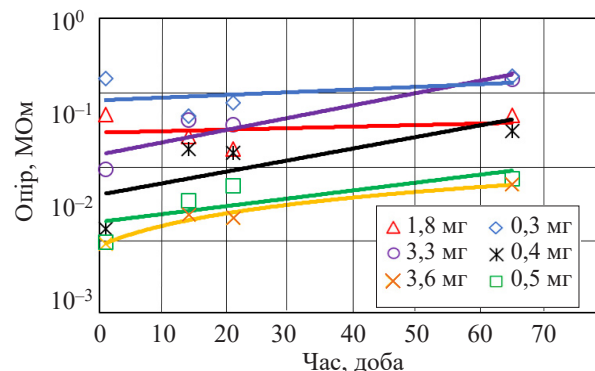
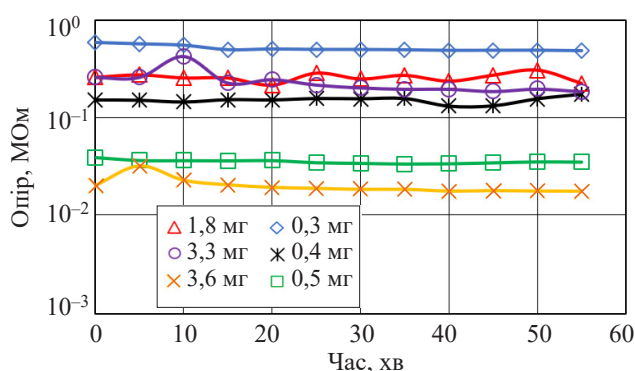


Рис. 5. Зміна в часі опору сенсора вологи на основі плівок наноцелюлози різної маси, витримуваного у середовищі з RH = 60% протягом 60 хв (а) та 65 діб (б)

100 Гц найнижче значення відхилень демонструє зразок з масою вологочутливого шару 1,8 мг — зростання у 3,06 рази, найвищий рівень відхилень показує зразок з масою 0,4 мг — зростання у 22,4 рази. Очевидно, стабільність характеристик одержаних сенсорів потребує подальшого вдосконалення, можливо модифікацією плівки наноцелюлози шляхом додавання певних домішок.

Висновки

Виготовлені сенсори вологи резистивного типу на основі плівок очеретяної наноцелюлози показали, що для одержання максимальних значень чутливості ($0,215 (\%RH)^{-1}$) та величини відгуку ($1,99 \cdot 10^6$) маса плівки наноцелюлози на поверхні сенсора має становити 1,8 мг на частоті тестового сигналу 100 Гц. Крім того, для плівки такої маси спостерігається мінімальна зміна сигналу сенсора протягом більш ніж двох місяців випробувань. Однак у тих випадках, коли пріоритетними є реверсивність, швидкодія або короткотривала стабільність, слід використовувати сенсори з плівкою НЦ малої маси (0,3—0,5 мг).

Таким чином, одержані в роботі результати показали потенційну можливість використання плівок наноцелюлози як вологочутливого шару в сенсорах вологості. Завдяки властивостям цього матеріалу його можна використовувати для створення принципово нових гнучких сенсорів вологості медичного застосування (сенсори подиху, сенсори поту тощо), які кріпляться безпосередньо на шкірі людини. Напрямок подальших досліджень є вдосконалення довготривалої стабільності роботи приладів шляхом модифікації вихідного гідрогелю наноцелюлози та виготовлення нанокомпозитів.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Jung Y. H., Chang T.-H., Zhang H. et al. High-performance green flexible electronics based on biodegradable cellulose nanofibril paper. 2015, *Nature Communications*, vol. 6, iss. 1, article 7170, <https://doi.org/10.1038/ncomms8170>
2. Lapshuda V. A., Koval V. M. Flexible and biodegradable sensors: materials, manufacturing technology and devices on its basis. *KPI Science News*, 2021, no. 2, pp. 16–27, <https://doi.org/10.20535/kpissn.2021.2.229964>
3. Koga H., Nogi M. Cellulose paper composites for flexible electronics. Chapter 6 in the book “*Lignocellulosics*”, Elsevier, 2020, p. 171–179, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804077-5.00011-7>
4. Kafy A., Akther A., Shishir Md. I. R. et al. Cellulose nanocrystal/graphene oxide composite film as humidity sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, vol. 247, pp. 221–226, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.05.045>

5. Agate S., Joyce M., Lucia L., Pal L. Cellulose and nanocellulose-based flexible-hybrid printed electronics and conductive composites — A review. *Carbohydrate Polymers*, 2018, vol. 198, pp. 249–260. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.06.045>

6. Hoeng F., Denneulin A., Bras J. Use of nanocellulose in printed electronics: a review. *Nanoscale*, 2016, vol. 8, iss. 27, pp. 13131–13154, <https://doi.org/10.1039/C6NR03054H>

7. Barbash V. A., Yaschenko O. V., Shnirik O. M. Preparation and properties of nanocellulose from organosolv straw pulp. *Nanoscale Research Letters*, 2017, vol. 12, iss. 1, article 241, <https://doi.org/10.1186/s11671-017-2001-4>

8. Koval V., Barbash V., Dusheyko M. et al. Application of nanocellulose in humidity sensors for biodegradable electronics. *2020 IEEE 10th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP)*, pp. 02NS01-1-02NS01-5, <https://doi.org/10.1109/NAP51477.2020.9309598>

9. Barbash V. A., Yashchenko O. V., Gondovska A. S., Deykun I. M. Preparation and characterization of nanocellulose obtained by TEMPO-mediated oxidation of organosolv pulp from reed stalks. *Applied Nanoscience*, 2022, vol. 12, iss. 4, pp. 835–848, <https://doi.org/10.1007/s13204-021-01749-z>

10. Srový T., Maronová S., Kuberský P. et al. Wide range humidity sensors printed on biocomposite films of cellulose nanofibril and poly(ethylene glycol). *Journal of Applied Polymer Science*, 2019, vol. 136, iss. 36, article 47920, <https://doi.org/10.1002/app.47920>

11. Zhu P., Kuang Yu., Wei Y. et al. Electrostatic self-assembly enabled flexible paper-based humidity sensor with high sensitivity and superior durability. *Chemical Engineering Journal*, 2021, vol. 404, article 127105, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127105>

12. Zhu B., Johansen V., Kamita G. et al. Hyperspectral imaging of photonic cellulose nanocrystal films: structure of local defects and implications for self-assembly pathways. *ACS Nano*, 2020, vol. 14, iss. 11, pp. 15361–15373, <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c05785>

13. Yoshida A., Wanga Y.-F., Tachibana Sh. et al. Printed, all-carbon-based flexible humidity sensor using a cellulose nanofiber/graphene nanoplatelet composite. *Carbon Trends*, 2022, vol. 7, article 100166, <https://doi.org/10.1016/j.cartre.2022.100166>

14. Zhu P., Liu Yu, Fang Zh. et al. Flexible and highly sensitive humidity sensor based on cellulose nanofibers and carbon nanotube composite film. *Langmuir*, 2019, vol. 35, iss. 14, p. 4834–4842, <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.8b04259>

15. Xu S., Yu W., Yao X. et al. Nanocellulose-assisted dispersion of graphene to fabricate poly(vinyl alcohol)/graphene nanocomposite for humidity sensing. *Composites Science and Technology*, 2016, vol. 131, pp. 67, <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2016.05.014>

16. Khalifa M., Wuzella G., Lammer H., Mahendran A. R. Smart paper from graphene coated cellulose for high-performance humidity and piezoresistive force sensor. *Synthetic Metals*, 2020, vol. 266, p. 116420, <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2020.116420>

17. Barbash V., Yaschenko O. Preparation, properties and use of nanocellulose from non-wood plant materials. Chapter 4 in the book “*Novel Nanomaterials*”, IntechOpen, 2020, 23 p., <https://doi.org/10.5772/intechopen.94272>

Дата надходження рукопису
до редакції 28.06 2022 р.

Опис статті для цитування:

Лапшуда В. А., Ліневич Я. О., Душейко М. Г., Коваль В. М., Барбаш В. А. Резистивні сенсори вологи на основі плівок наноцелюлози для біорозкладної електроніки. Технологія і конструювання в електронній апаратурі, 2022, № 4–6, с. 3–9. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2022.4-6.03>

Cite the article as:

Lapshuda V. A., Linevych Ya. O., Dusheiko M. G., Koval V. M., Barbash V. A. Resistive humidity sensors based on nanocellulose films for biodegradable electronics. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature*, 2022, no. 4–6, pp. 3–9. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2022.4-6.03>

RESISTIVE HUMIDITY SENSORS BASED ON NANOCELLULOSE FILMS FOR BIODEGRADABLE ELECTRONICS

Nanocellulose (NC) is a promising modern material suitable for use in electronics. This material is biodegradable, and thus, if used in electronic devices, will not require disposal and will decompose naturally. An interesting feature of nanocellulose is its hygroscopicity, which makes it applicable for the manufacture of humidity sensors. In this study, we synthesized nanocellulose-based humidity sensors with a weight of humidity-sensitive layer from 0.3 to 3.6 mg. The following static and dynamic characteristics of the obtained sensors were measured: sensitivity, response, hysteresis, repeatability, response and recovery time, short and long-term stability. It was determined that at a frequency of 100 Hz, the maximum sensitivity was observed in the sample with NC mass of 1.8 mg ($0.215 (\%RH)^{-1}$), and at 1000 Hz, in the sample with NC mass of 0.5 mg ($0.155 (\%RH)^{-1}$). Thus, with increasing frequency of test signal, the sensitivity of the sensors decreases. These same samples (with NC mass of 1.8 mg at 100 Hz and 0.5 mg at 1000 Hz) showed the highest values of sensor response — $1.99 \cdot 10^6$ and $5.43 \cdot 10^4$, respectively. Same as with sensitivity, when frequency increases, sensor response decreases. For both frequencies, the sample with NC mass of 0.4 mg showed the lowest value of hysteresis — 0.04 and 0.12% at 100 and 1000 Hz, respectively. It was also found that the sample with NC mass of 0.3 mg has the shortest response time of 42 s. With increasing of NC weight, the response time increases about 20-fold and recovery time — by 2 orders of magnitude. The highest short-term stability was demonstrated by the sample with NC weight of 0.5 mg: deviations from the arithmetic mean were 8 and 7.8% at test frequencies of 100 and 1000 Hz, respectively. The worst short-term stability was demonstrated by the sample with NC mass of 3.3 mg with the deviation of 31.7 and 39.2% at the same frequencies. It was also determined that such sensors need to be further researched to improve long-term stability.

Therefore, the measurement results demonstrate that, in terms of sensitivity and response, the optimal mass of NC film is 1.8 mg at the test frequency of 100 Hz. This sample also shows the best long-term stability. From the point of view of recoverability and sensor speed, the sample with NC weight of 0.3–0.5 mg is preferable.

Keywords: nanocellulose; resistive humidity sensor; biodegradable electronics.

REFERENCES

- Jung Y. H., Chang T.-H., Zhang H. et al. High-performance green flexible electronics based on biodegradable cellulose nanofibril paper. 2015, *Nature Communications*, vol. 6, iss. 1, article 7170, <https://doi.org/10.1038/ncomms8170>
- Lapshuda V. A., Koval V. M. Flexible and biodegradable sensors: materials, manufacturing technology and devices on its basis. *KPI Science News*, 2021, no. 2, pp. 16–27, <https://doi.org/10.20535/kpissn.2021.2.229964>
- Koga H., Nogi M. Cellulose paper composites for flexible electronics. Chapter 6 in the book “*Lignocellulosics*”, Elsevier, 2020, pp. 171–179, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804077-5.00011-7>
- Kafy A., Akther A., Shishir Md. I. R. et al. Cellulose nanocrystal/graphene oxide composite film as humidity sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, vol. 247, pp. 221–226, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.05.045>
- Agate S., Joyce M., Lucia L., Pal L. Cellulose and nanocellulose-based flexible-hybrid printed electronics and conductive composites — A review. *Carbohydrate Polymers*, 2018, vol. 198, pp. 249–260. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.06.045>
- Hoeng F., Denneulin A., Bras J. Use of nanocellulose in printed electronics: a review. *Nanoscale*, 2016, vol. 8, iss. 27, pp. 13131–13154, <https://doi.org/10.1039/C6NR03054H>
- Barbash V. A., Yaschenko O. V., Shniruk O. M. Preparation and properties of nanocellulose from organosolv straw pulp. *Nanoscale Research Letters*, 2017, vol. 12, iss. 1, article 241, <https://doi.org/10.1186/s11671-017-2001-4>
- Koval V., Barbash V., Dusheyko M. et al. Application of nanocellulose in humidity sensors for biodegradable electronics. *2020 IEEE 10th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP)*, pp. 02NS01-1-02NS01-5, <https://doi.org/10.1109/NAP51477.2020.9309598>
- Barbash V. A., Yashchenko O. V., Gondovska A. S., Deykun I. M. Preparation and characterization of nanocellulose obtained by TEMPO-mediated oxidation of organosolv pulp from reed stalks. *Applied Nanoscience*, 2022, vol. 12, iss. 4, pp. 835–848, <https://doi.org/10.1007/s13204-021-01749-z>
- Syrový T., Maronová S., Kuberský P. et al. Wide range humidity sensors printed on biocomposite films of cellulose nanofibril and poly(ethylene glycol). *Journal of Applied Polymer Science*, 2019, vol. 136, iss. 36, article 47920, <https://doi.org/10.1002/app.47920>
- Zhu P., Kuang Yu., Wei Y. et al. Electrostatic self-assembly enabled flexible paper-based humidity sensor with high sensitivity and superior durability. *Chemical Engineering Journal*, 2021, vol. 404, article 127105, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127105>
- Zhu B., Johansen V., Kamita G. et al. Hyperspectral imaging of photonic cellulose nanocrystal films: structure of local defects and implications for self-assembly pathways. *ACS Nano*, 2020, vol. 14, iss. 11, pp. 15361–15373, <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c05785>
- Yoshida A., Wanga Y.-F., Tachibana Sh. et al. Printed, all-carbon-based flexible humidity sensor using a cellulose nanofiber/graphene nanoplatelet composite. *Carbon Trends*, 2022, vol. 7, article 100166, <https://doi.org/10.1016/j.cartre.2022.100166>
- Zhu P., Liu Yu, Fang Zh. et al. Flexible and highly sensitive humidity sensor based on cellulose nanofibers and carbon nanotube composite film. *Langmuir*, 2019, vol. 35, iss. 14, pp. 4834–4842, <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.8b04259>
- Xu S., Yu W., Yao X. et al. Nanocellulose-assisted dispersion of graphene to fabricate poly(vinyl alcohol)/graphene nanocomposite for humidity sensing. *Composites Science and Technology*, 2016, vol. 131, pp. 67, <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2016.05.014>
- Khalifa M., Wuzella G., Lammer H., Mahendran A. R. Smart paper from graphene coated cellulose for high-performance humidity and piezoresistive force sensor. *Synthetic Metals*, 2020, vol. 266, pp. 116420, <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2020.116420>
- Barbash V., Yaschenko O. Preparation, properties and use of nanocellulose from non-wood plant materials. Chapter 4 in the book “*Novel Nanomaterials*”, IntechOpen, 2020, 23 p., <https://doi.org/10.5772/intechopen.94272>

К. т. н. Е. М. ГЛУШЕЧЕНКО

Україна, м. Київ, Науково-виробниче підприємство «Сатурн»
E-mail: gen-nto@ukr.net

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЄКТУВАННЯ ПОЗДОВЖНЬО-СПІВВІСНИХ ХВИЛЕВОДНО-МІКРОСМУЖКОВИХ З'ЄДНУВАЧІВ

Проаналізовано роботу поздовжньо-співвісного хвилеводно-мікросмужкового з'єднувача, реалізованого на основі відрізка H -подібного хвилеводу, закороченого з одного боку торцевою стінкою, що дозволяє у хвильовому опорі з'єднувача коригувати реактивну компоненту як індуктивного, так і ємнісного характеру. Приділено увагу питанням розрахунку габаритів узгоджувального та коригувального елементів такого пристрою, а також вимірюванню його основних параметрів (КСХН та втрат) і математичній моделі на основі хвильової матриці розсіювання.

Ключові слова: НВЧ, мікросмужкова лінія, з'єднувач, хвилевід, коаксіал, втрати, КСХН, габарити, вимірювання, математична модель.

В наявних радіоелектронних системах діапазону надвисокої частоти (НВЧ), як телекомунікаційних, так і інших призначень, антенно-фідерні тракти (АФТ) складаються з локальних функціональних модулів, розроблених на основі різних типів ліній передачі електромагнітних хвиль, наприклад мікросмужкових ліній (МСЛ). Для об'єднання таких модулів в АФТ, який забезпечує їх конструктивне та електромагнітне узгодження, застосовують спеціалізовані пристрої — НВЧ-з'єднувачі.

НВЧ-з'єднувачі можуть бути трьох видів: однорідні хвилеводні — для об'єднання (стикування) хвилеводів з несхожими конфігураціями трактів; однорідні коаксіальні — для переходу з одного типорозміру діаметра на інший; комбіновані — пристрої, у загальному випадку реалізовані на базі відрізка прямокутного хвилеводу та коаксіального з'єднувача (хвилеводно-коаксіальні або хвилеводно-мікросмужкові).

Метою створення НВЧ-з'єднувача будь-якого типу є реалізація у максимально широкій смузі частот максимально можливого узгодження (коефіцієнта стоячої хвилі за напругою — КСХН) з мінімальними втратами при перетворенні електромагнітної хвилі (ЕМХ) основного типу H_{10} регулярного хвилеводу у хвилю трансверсально-електромагнітного (ТЕМ) типу коаксіальної лінії. Узгодження (КСХН) та втрати є основними електричними параметрами з'єднувачів.

Хвилеводно-коаксіальні з'єднувачі незалежно від типорозмірів (габаритів) можуть бути двох типів: співвісно-торцеві або поздовжньо-співвісні, й від цього залежить характер вищезначеного перетворення ЕМХ. У співвісно-торцевих з'єднувачах в результаті індуктивно-ємнісного збудження коаксіал розташовується перпендикулярно до широкої стінки хвилеводу. У поздовжньо-співвісних з'єднувачах

на основі відрізка хвилеводу коаксіал розміщується на торцевій стінці відрізка хвилеводу в її геометричному центрі, а перетворення ЕМХ відбувається в результаті її поступової та послідовної трансформації вздовж відрізка хвилеводу.

Як було зазначено вище, НВЧ-тракти радіоелектронних систем формуються з окремих автономних функціональних модулів, у яких контактні з'єднувальні вузли реалізуються, наприклад, у вигляді хвилеводних фланців або коаксіалів різних типорозмірів. Для об'єднання таких модулів необхідні комбіновані з'єднувачі, в яких один контактний вузол — хвилеводного типу, другий — коаксіального.

Враховуючи те, що більшість сучасних НВЧ-пристроїв реалізуються в планарному (горизонтальному) виконанні, найбільш раціональною, особливо в антенних решітках, є поздовжньо-співвісна реалізація комбінованих з'єднувачів. Саме таке технічне рішення створює суттєві зручності для формування АФТ з окремих НВЧ-пристроїв.

Крім цього, оскільки сучасні антенно-фідерні тракти компонуються (формуються) з автономних НВЧ-модулів, реалізованих у герметичних корпусах з використанням інтегральних мікросмужкових ліній передачі, для таких пристроїв найперспективнішими вбачаються герметичні поздовжньо-співвісні хвилеводно-мікросмужкові з'єднувачі, бо їх можна інтегрувати у корпус модуля як контактні з'єднувальний елемент.

У цій роботі розглянемо особливості проєктування поздовжньо-співвісного хвилеводно-мікросмужкового з'єднувача, оскільки аналіз доступних спеціалізованих видань та публікацій з НВЧ-техніки показав, що в них досить ретельно і повно розглядаються як хвилеводні [1], так і коаксіальні однорідні

з'єднувачі, включно з сучасними [2], і дуже мало інформації щодо комбінованих НВЧ-з'єднувачів.

При цьому з наявної інформації можна зробити висновок, що будь-яке технічне рішення поздовжньо-співвісного з'єднувача з новими покращеними основними параметрами має задовольняти вимогам, сформульованим у роботі [3]. Це стосується не тільки хвилеводно-коаксіальних трансформаторів, але й герметичних хвилеводно-мікросмушкових з'єднувачів. Саме тому структуру та функціональні особливості таких з'єднувачів розглянемо на прикладі цієї роботи.

Структура та функціональні особливості поздовжньо-співвісних хвилеводно-коаксіальних з'єднувачів

На рис. 1 наведено поздовжній розріз поздовжньо-співвісного хвилеводно-коаксіального (ПСХКЗ) з'єднувача. Він містить відрізок 1 прямокутного хвилеводу, закорочений торцевою стінкою 2. Через отвір у геометричному центрі торцевої стінки до хвилеводу підключений відрізок 3 коаксіальної лінії. Перетворювальна система 4 Г-подібної форми розміщується в порожнині хвилеводу і є продовженням центрального струмопровідного провідника 5 відрізка 3 коаксіальної лінії. Остання складається з аксіальної 6 і зондової 7 частин, при цьому зондова частина закріплюється в широкій стінці 8 відрізка 1 хвилеводу.

Аксіальна частина 6 перетворювальної системи 4 з боку зондової частини 7 не зафіксована в площині, що проходить через поздовжню вісь хвилеводу і паралельна його вузьким стінкам. Аксіальна частина 6 має довжину більше чверті довжини ТЕМ-хвилі в коаксіалі, а її вхідний (хвильовий) опір має реактивну складову індуктивного характеру. При цьому зондова частина 7 перетворювальної системи при її відхиленні від згаданої вище поздовжньої площини створює реактивність ємнісного характеру. Зміна положення (кута відхилення) зондової частини 7 від поздовжньо-осьової площини викликає, відповідно, зміну розташування її аксіальної частини 6, що створює можливість регулювання (компенсації) фазового зсуву, що вноситься таким з'єднувачем у хвилеводний тракт.

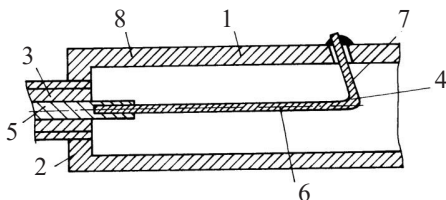


Рис. 1. Поздовжній розріз поздовжньо-співвісного хвилеводно-коаксіального з'єднувача [3]:

1 — відрізок прямокутного хвилеводу, закорочений торцевою стінкою 2; 3 — відрізок коаксіальної лінії; 4 — перетворювальна система; 5 — центральний струмопровідний провідник, що складається з аксіальної 6 і зондової 7 частин; 8 — широка стінка відрізка хвилеводу 1

Розглянутий варіант з'єднувача має досить просту конструкцію, що забезпечує їй прийнятні основні електричні параметри. Наприклад, для варіанта з прямокутним хвилеводом з розмірами у поперечному перерізі 23×5 мм у смузі частот 21% досягнуто КСХН $\leq 1,2$ при прямих втратах не більше 0,4 дБ. Однак у такому з'єднувачі для досягнення необхідних НВЧ-параметрів необхідне індивідуальне налаштування, що пов'язано зі складністю їх відтворення.

Необхідність дотримання точної довжини Г-подібної перетворювальної системи та якості її кріплення до широкої стінки хвилеводу, певних значень співвідношення між значеннями довжини її аксіальної та зондової частин, кута між ними та їх орієнтація відносно поздовжньо-осьової площини хвилеводу — всі ці вимоги до розглянутого з'єднувача дозволяють бачити в ньому лише аналог (прототип) для реалізації нових з'єднувачів комбінованого типу. Це, наприклад, запропонований у [4] пристрій, в якому перетворювальна (узгоджувальна) система виконана у вигляді ребристо-сходинкової конструкції, розташованої в поздовжньо-осьовій площині хвилеводу.

Конструкція поздовжньо-співвісного хвилеводно-мікросмушкового з'єднувача

В процесі створення нових надійних, відтворюваних і придатних до серійного виробництва поздовжньо-співвісних хвилеводно-коаксіальних або хвилеводно-мікросмушкових (ПСХМЗ) з'єднувачів із заданими НВЧ-параметрами обов'язково слід враховувати таку вимогу: конструкцію необхідно реалізовувати на основі низькоомного хвилеводу, який має не менше двох конструктивних елементів. Саме це забезпечує ті необхідні умови, які дозволяють коригувати реактивну компоненту хвильового опору з'єднувача (як індуктивного, так і ємнісного характеру) в процесі перетворення ЕМХ хвилеводною моди основного типу H_{10} регулярного хвилеводу на квазіхвилю ТЕМ-типу коаксіалу з імпедансом (хвильовим опором) $Z_0 = 50$ Ом.

Зазначеним необхідним вимогам відповідає низькоомний [5] Н-подібний хвилевід, який містить два ребра, що розміщуються вертикально один над одним в поздовжньо-осьовій площині хвилеводу, що являють собою узгоджувальний та коригувальний елементи з'єднувача і забезпечують перетворення ЕМХ типу H_{10} хвилеводу на квазіхвилю ТЕМ-типу коаксіалу. Саме в зоні вертикальної щілини між їхніми торцями знаходиться орієнтований перпендикулярно до них максимум вектора E напруженості електричного поля.

Таким чином, вибір базового елемента для створення перспективних співвісних з'єднувачів є однозначним — це Н-подібний хвилевід. Їхні особливості простіше за все можна розглянути, виставивши як прототип відомий поздовжньо-співвісний хвилеводно-коаксіальний з'єднувач (трансформа-

тор) [6], у якого відрізок коаксіального кабелю замінено серійним НВЧ-компонентом — герметичною коаксіальною вставкою, імпеданс (хвильовий опір) якої ідентичний імпедансу коаксіального кабелю з $Z_0 = 50$ Ом, тобто обидві конструкції з'єднувача практично ідентичні.

Зображений на **рис. 2** герметичний ПСХМЗ [7] містить, як і співвісний з'єднувач-прототип [6], відрізок 1 прямокутного Н-подібного хвильоводу, закорочений торцевою стінкою 2. При цьому перетворення основного H_{10} -типу ЕМХ регулярного хвильоводу у ТЕМ-хвилю коаксіальної лінії з хвильовим опором (імпедансом) $Z_0 = 50$ Ом забезпечує індуктивно-ємнісна система елементів, розташованих та орієнтованих, як видно з рис. 2, б, у поздовжньо-осьовій площині хвильоводу. Ця індуктивно-ємнісна перетворювальна система містить герметичну коаксіальну вставку 3, яка замінює відрізок коаксіальної лінії з'єднувача-прототипу, а також узгоджувальну структуру 4, яка є аналогом аксіальної частини з'єднувача-аналога [3], та коригувальну структуру 5, що замінює його зондову частину.

Узгоджувальна структура 4, реалізована у формі ребристо-ступінчастої структури, розміщується на певній відстані від закорочувальної стінки 2. Нижня поверхня узгоджувальної структури 4 нерозривно з'єднана з широкою нижньою стінкою 6 хвильоводу, а у стінці верхньої сходинки узгоджувальної структури 4 співвісно з геометричним центром у закорочувальній стінці 2 виконано отвір 15 для нерозривного з'єднання з коаксіальною вставкою 3.

Узгоджувальний елемент 4 функціонально є аналогічним аксіальній частині співвісного з'єднувача-прототипу, й, відповідно, він вносить у хвильовий опір перетворювальної системи реактивну складову індуктивного характеру. При цьому він об'єднаний з герметичною коаксіальною вставкою 3 за допомогою закріпленого в отворі 15 вільного кінця 12 її центрального струмопровідного провідника 10. Отвір 15

виконано у стінці верхньої сходинки узгоджувального елемента 4 співвісно із геометричним центром закорочувальної торцевої стінки 2.

Аналогом зондової частини співвісного з'єднувача-прототипу є коригувальний елемент 5, який має вигляд паралелепіпеда, розміщеного симетрично у поздовжньо-осьовій площині відрізка 1 хвильоводу і рівновіддалено від його вузьких бічних стінок. Подібно до зондової частини співвісного з'єднувача-прототипу він також вносить реактивну складову ємнісного характеру у хвильовий опір перетворювальної системи.

Коригувальний елемент 5 розташовується перпендикулярно як до торцевої закорочувальної стінки, так і до широкої верхньої стінки 7 хвильоводу. Торець коригувального елемента 5 з боку закорочувальної стінки 2 нерозривно з'єднаний з торцевою стінкою 2, а його верхня поверхня — з широкою верхньою стінкою 7 хвильоводу. При цьому нижня поверхня коригувального елемента 5 знаходиться на певній відстані від верхньої поверхні ребристо-ступінчастої структури узгоджувального елемента 4, утворюючи при цьому (як це видно з рис. 2, б) щілину між ребрами Н-подібного хвильоводу, в якій спостерігається максимум напруженості електромагнітного поля

Герметична вставка 3 (див. рис. 2, в) має такий самий хвильовий опір, як і відрізок коаксіальної лінії з'єднувача-прототипу. Вона має металевий корпус 8, об'єднаний метало-скляним спаєм з ізолювальною втулкою 9, до якої через її геометричний центр співвісно впаяно центральний струмопровідний провідник 10 коаксіальної вставки. Його вільний кінець 11 може виконувати дві функції: забезпечувати підключення до МСЛ функціональних пристроїв АФТ або бути елементом коаксіального з'єднувача типу МЗРГ (мікроз'єднувач радіочастотний герметичний). Тому діаметр провідника 10 заздалегідь визначається або шириною регулярної МСЛ, або конструкцією МЗРГ. Водночас вільний кінець 12 провідника 10 надійно

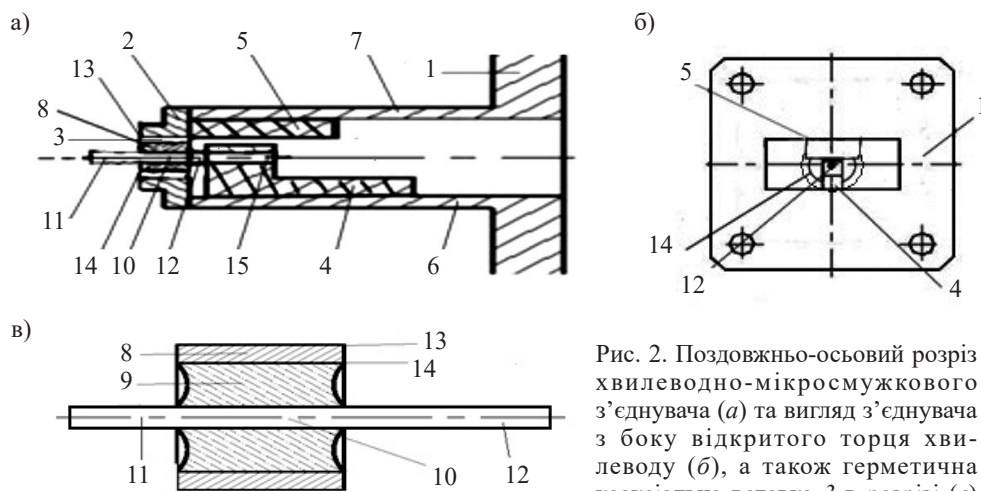


Рис. 2. Поздовжньо-осьовий розріз хвильоводно-мікросмужкового з'єднувача (а) та вигляд з'єднувача з боку відкритого торця хвильоводу (б), а також герметична коаксіальна вставка 3 в розрізі (в)

забезпечує можливість підключення коаксіальної вставки до узгоджувальної структури 4.

Довжина корпусу 8 коаксіальної вставки 3 дорівнює товщині торцевої закорочувальної стінки 2 відрізка 1 хвилеводу. При цьому зовнішня поверхня 13 корпусу 8 коаксіальної вставки нерозривно з'єднується з торцевою закорочувальною стінкою 2, а діаметр внутрішньої поверхні 14 коаксіальної вставки (при величині її імпедансу $Z_0 = 50$ Ом) дорівнює діаметру її зовнішнього провідника 14.

Товщина ребристо-ступінчастої структури узгоджувального елемента 4 має бути більше діаметра отвору 15, виконаного в ній, і тому безпосередньо визначається величиною діаметра центрального провідника 10 використовуваної коаксіальної вставки. Саме параметри ребристо-ступінчастої структури узгоджувального елемента 4 та коригувального елемента 5 перетворювальної системи визначають рівень узгодження імпедансів відрізків хвилеводу та коаксіальної лінії поздовжньо-співвісного з'єднувача.

Перетворення імпедансів від високоомного регулярного хвилеводу до низькоомної коаксіальної лінії здійснюється завдяки запропонованій оригінальній конструкції поздовжньо-співвісного з'єднувача. При цьому електромагнітна хвиля основного типу H_{10} регулярного прямокутного хвилеводу, перетворюючись на ТЕМ-хвилю коаксіальної лінії, послідовно проходить ділянки з різним хвильовим опором, а саме: регулярний прямокутний хвилевід, П-подібний хвилевід, Н-подібний хвилевід з коротким нижнім гребенем, Н-подібний хвилевід з високим нижнім гребенем і, нарешті, коаксіал із хвильовим опором $Z_0 = 50$ Ом.

Структурні елементи ПСХМЗ та їхні габарити

З рис. 2 зрозуміло, що розглянутий герметичний поздовжньо-співвісний хвилеводно-мікросмушковий з'єднувач містить цілу низку конструктивних елементів, серед яких:

- базовий відрізок прямокутного хвилеводу з габаритами $a \times b$ (a, b — відповідно, розміри широкої та вузької бічних стінок хвилеводу, закороченого з одного боку торцевою стінкою з наскрізним отвором у її геометричному центрі з координатами $(a/2; b/2)$, що збігається з поздовжньою віссю хвилеводу;

- герметична коаксіальна вставка з хвильовим опором (імпедансом) $Z_0 = 50$ Ом, співвісно і нерозривно вмонтована у наскрізний отвір в геометричному центрі торцевої закорочувальної стінки хвилеводу;

- узгоджувальний елемент з індуктивною функцією, реалізований у формі гребінчато-ступінчастої структури, розміщеної в поздовжньо-осьовій площині хвилеводу рівновіддалено від його бічних стінок, та з отвором у його верхній частині для підключення одного з вільних кінців центрального струмопровідного провідника герметичної коаксіальної вставки;

- коригувальний елемент з смісною функцією, реалізований у формі прямокутного паралелепіпеда та розміщений із зазором (щілиною) над узгоджувальною структурою в поздовжньо-осьовій площині відрізка хвилеводу рівновіддалено від його бічних стінок.

Геометричні розміри цих елементів та їх просторова орієнтація в об'ємі базового відрізка хвилеводу визначають електричні параметри з'єднувача. При цьому незалежними визначальними базовими розмірами елементів є типорозмір ($a \times b$, мм) відрізка прямокутного хвилеводу, а також типорозмір герметичної коаксіальної вставки ($D_{гв}, d_{гв}$ — відповідно, діаметри екранувальної поверхні та центрального струмопровідного провідника у мм) та її довжина $L_{гв}$ (рис. 3). Ці розміри однозначно визначають товщину закорочувальної торцевої стінки з'єднувача, відстань від якої до узгоджувального елемента не має перевищувати половину діаметра $D_{гв}$.

Що ж до габаритних розмірів узгоджувального та коригувального елементів герметичного ПСХМЗ, то їх можна надавати лише у значеннях λ_c — довжини робочої хвилі конкретного пристрою, оскільки розміри цих елементів можуть залежати від конкретної частоти.

Зображена на рис. 3 герметична коаксіальна вставка є електронним НВЧ-компонентом з хвильовим опором $Z_0 = 50$ Ом, що виготовляється серійно та має декілька конструктивних виконань, наприклад АРКА.434511.005 підприємства ПрАТ «Науково-виробниче підприємство «Сатурн».

Центральний струмопровідний провідник герметичної вставки залежно від умов її застосування може мати діаметр $d_{гв} = 0,36 — 0,80$ мм. Відповідно, для забезпечення незмінного хвильового опору $Z_0 = 50$ Ом діаметр зовнішньої екранувальної поверхні герметичної вставки складає $D_{гв} = 2,52 — 5,85$ мм. Довжина вставки залежно від умов її застосування може змінюватись у досить широких межах: $L_{гв} = 1,2 — 5,85$ мм. Найчастіше використовуваними типорозмірами герметичної коаксіальної вставки є $D_{гв}/d_{гв} = 3,5/1,52; 5,5/2,4; 7,0/3,04$.

Узгоджувальний елемент ПСХМЗ (рис. 4) має форму тонкої ступінчастої пластини, що розміщується в поздовжньо-осьовій площині з'єднувача. Оскільки узгоджувальний елемент відповідає за індуктивну функцію перетворювальної системи

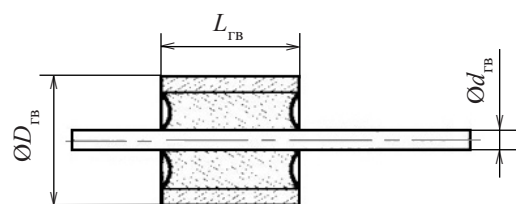


Рис. 3. Габаритне креслення герметичної коаксіальної вставки

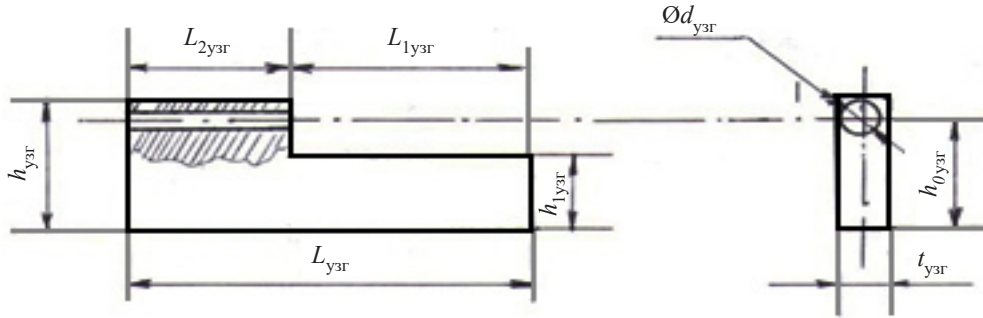


Рис. 4. Габаритне креслення узгоджувального елемента

з'єднувача, то природно реалізувати його максимально тонким. З іншого боку, товщина узгоджувального елемента $t_{узг}$ однозначно залежить від діаметра отвору в ньому $d_{узг}$, який своєю чергою залежить від діаметра герметичної вставки $d_{гв}$: $d_{узг} \geq d_{гв}$. В кінцевому результаті маємо умову $t_{узг} \geq 2d_{узг}$. Центр отвору в узгоджувальному елементі на висоті $h_{0узг}$ збігається з геометричним центром отвору у закорчувальній стінці з'єднувача та його поздовжньою віссю з координатами $(a/2; b/2)$. При цьому, відповідно, висота узгоджувального елемента ПСХМЗ визначається як $h_{узг} \geq b/2 + d_{узг}/2 = (b + d_{узг})/2$, а висота його нижньої сходинки як $h_{1узг} = h_{узг}/2 = (b + d_{узг})/4$.

Як вже зазначалося раніше, лінійні розміри узгоджувального елемента, а саме його довжину $L_{узг}$ та довжину його нижньої і верхньої сходинок $L_{1узг}$ і $L_{2узг}$ слід визначати через λ_c — довжину електромагнітної хвилі на центральній частоті робочої смуги частот з'єднувача, тобто:

$$L_{1узг} = \lambda_c/4;$$

$$L_{2узг} = \lambda_c/8;$$

$$L_{узг} = L_{1узг} + L_{2узг} = \lambda_c/4 + \lambda_c/8 = 3\lambda_c/8.$$

Коригувальний елемент ПСХМЗ має форму прямокутного паралелепіпеда з лінійною довжиною $L_{кор}$, висотою $h_{кор}$ і шириною $t_{кор}$.

Реально, з урахуванням функціонального призначення, габаритні розміри автономного коригувального елемента ПСХМЗ будуть визначатися таким чином:

$$L_{кор} = \lambda_c/4;$$

$$t_{кор} \geq D_{гв};$$

$$h_{кор} \geq b - h_{0узг} - D_{гв}/2 = b - b/2 - D_{гв}/2 = b/2 - D_{гв}/2 = (b - D_{гв})/2.$$

Якщо ж коригувальний елемент розглядати у просторовому об'ємі ПСХМЗ, наприклад відносно нижньої широкій стінки відрізка хвилеводу, то нижня поверхня коригувального елемента буде знаходитися на висоті, яка дорівнює або є більшою за величину $b/2 + D_{гв}/2 = (b + D_{гв})/2$.

Методи вимірювання основних параметрів ПСХМЗ

Поздовжньо-співвісні хвилеводно-коаксіальні або поздовжньо-співвісні хвилеводно-мікросмужкові з'єднувачі — це комбіновані НВЧ-чотириполюсники, що мають приєднувальні елементи двох типів: приєднувальний фланець фіксованого габариту (типорозміру), який залежить від робочої частоти, і частина коаксіальної конструктивної пари з хвильовим імпедансом $Z_0 = 50$ Ом. Очевидно, що для вимірювання характеристик з'єднувачів з такими конструктивними особливостями неможливо використовувати стандартну вимірювальну апаратуру, тут потрібна спеціальна метрологічна методика визначення основних електричних параметрів, втрат та КСХН (ступеня узгодження з трактом), що вносяться до АФТ з'єднувачами комбінованого типу.

У роботі [8] для вимірювання втрат і КСХН з'єднувача з хвилеводно-коаксіальним контактним вихідним елементом запропоновано об'єднати одиначні з'єднувачі в пари по хвилеводному або коаксіальному каналу (рис. 5). Цю методику можна взяти за основу для вимірювань параметрів пристроїв з хвилеводно-мікросмужковою конфігурацією, враховуючи при цьому їхні конструктивні відмінності, а саме: вихідним елементом коаксіальної контактної пари ПСХМЗ є вільний кінець центрального струмопровідного провідника герметичної коаксіальної вставки, призначений для безпосереднього приєднання до мікросмужкової лінії функціонального НВЧ-пристрою в інтегральному виконанні. Тому для вимірювання основних НВЧ-параметрів ПСХМЗ формувати пару досліджуваних (вимірюва-

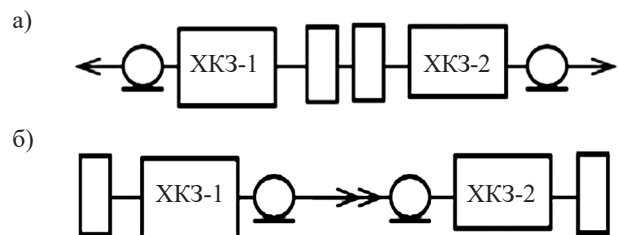


Рис. 5. Структурні схеми пар ХКЗ, об'єднаних хвилеводним (а) та коаксіальним (б) каналом

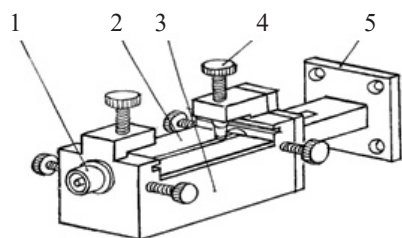


Рис. 6. Загальний вигляд спеціального оснащення для вимірювання параметрів ПСХМЗ:

1 — еталонний з'єднувач; 2 — еталонна мікросмужкова тест-плата з імпедансом $Z_0 = 50$ Ом; 3 — універсальний монтажний столик; 4 — притискні гвинти; 5 — досліджуваний ПСХМЗ

них) з'єднувачів можна лише за схемою, наведеною на рис. 5, б, але з обов'язковим використанням спеціального вимірювального оснащення (рис. 6). Слід зазначити, що як тест-плату можна застосовувати підкладку з регулярною мікросмужковою лінією з імпедансом $Z_0 = 50$ Ом або з МСЛ у вигляді меандру з таким же імпедансом для виключення можливості виникнення фазових неоднорідностей під час вимірювань.

Еталонним з'єднувачем може бути як розглянутий поздовжньо-співвісний хвилеводно-мікросмужковий з'єднувач [7] з КСХН $\leq 1,02$ (для вимірювання або дослідження нових ПСХМЗ), так і серійний мікро-коаксіальний з'єднувач [2] з аналогічним значенням КСХН (для вимірювання параметрів серії ідентичних ПСХМЗ).

Для оцінки погонних втрат α_1 ПСХМЗ слід попередньо виміряти втрати α_t МСЛ в тест-платі відняти від реально виміряних втрат G пари з'єднувачів і розділити надвос:

$$\alpha_1 = (G - \alpha_t)/2. \quad (6)$$

При цьому для одиночного ПСХМЗ методика визначення КСХН залишається без змін, тобто розрахунк виконується відповідно до [8, формули (2) — (5)].

Математична модель ПСХМЗ

Зазвичай АФТ сучасних радіоелектронних систем має математичну модель, яка формується з математичних моделей елементів тракту — як окремих функціональних модулів, так і з'єднувачів різних типів.

Якщо необхідна максимально точна теоретична математична модель з'єднувача ([S]-матриці та її коефіцієнтів), вона може бути сформована класичним електродинамічним методом. Проте це громіздкий, дуже тривалий і затратний процес, а комбіновані з'єднувачі — це допоміжні елементи НВЧ-тракту, хоча й такі, що істотно впливають на параметри АФТ. Вони мають конкретні та реально виміряні характеристики — КСХН та втрати. Тому є виправданним сформулювати [S]-матрицю такого комбінованого з'єднувача з деякими припущеннями, тобто напівемпіричним способом, як це було зроблено у роботі

[8] на підставі послідовного, ретельного та обґрунтованого розгляду. Там була сформована напівемпірична матриця розсіювання для поздовжньо-співвісного хвилеводно-коаксіального з'єднувача ПСХКЗ:

$$[S^{ХКЗ}] = \begin{vmatrix} S_{11} = |\rho_1| & S_{12} = e^{-\alpha} \\ S_{21} = e^{-\alpha} & S_{22} = |\rho_1| \end{vmatrix}. \quad (7)$$

де ρ_1 , α — відповідно, коефіцієнт відбиття та погонні втрати з'єднувача, $\alpha = \alpha_1$.

Коефіцієнти відбиття обчислюються на основі конкретно виміряних характеристик, а коефіцієнти передачі визначаються вимірним значенням втрат, внесених одиночним (автономним) герметичним з'єднувачем. Оскільки конструктивно ПСХКЗ [6] та герметичний ПСХМЗ [7] майже ідентичні, цю матрицю можна вважати прийнятною і для герметичного ПСХМЗ.

Висновок

Розглянутий варіант герметичного поздовжньо-співвісного хвилеводно-мікросмужкового з'єднувача був реалізований та експериментально апробований у широкому частотному діапазоні. Для низки типорозмірів хвилеводів було досліджено та підтверджено показники узгодження та рівня втрат у смугах частот. Наведені в таблиці параметри підтверджують ефективність запропонованого комбінованого з'єднувача.

Параметри ПСХМЗ різних типорозмірів

Переріз хвилевода, мм	Смуга частот, МГц	КСХН, не більше	Втрати, дБ, не більше
58×25	400	1,06	0,1
48×24	500	1,10	0,1
23×10	1200	1,15	0,2
23×5	600	1,15	0,2

Представлене технічне рішення є надійним, відтворюваним та серійнопридатним, і його можна рекомендувати для застосування в сучасних радіоелектронних системах. Використовуючи відомі прикладні програмні комплекси САПР, наприклад MicrowaveOffice або HFSS, можна проєктувати такі пристрої без попереднього макетування.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р., Смирнов В.П. *Справочник по элементам волноводной техники*. М.-Л., Госэнергоиздат, 1963.
2. Джуринский К.Б. *Миниатюрные коаксиальные радиокомпоненты для микроэлектроники СВЧ*. Москва, Техносфера, 2006.
3. Тюрин Ю.В. *Соосный коаксиально-волноводный переход*. Патент РФ № 2011245, опубл. 15.04.1994.
4. Хомяков А.В. и др. *Коаксиально-волноводный переход*. Патент РФ № 2517678, опубл. 27.05.2014.
5. Шабунин С.Н., Соловьянова И.Н. *Волноводы и объемные резонаторы*, Оренбург, Уральский ГТУ, 1998, 38 с.
6. Глушеченко Е.М. *Поздовжньо-співвісний хвилеводно-коаксіальний трансформатор*. Патент України на корисну модель № 147621, 2021, бюл. № 21.
7. Глушеченко Е.М. *Герметичний поздовжньо-співвісний хвилеводно-мікросмужковий з'єднувач*. Патент України на корисну модель №151222, 2022, бюл. №25.

8. Глушеченко Е.М. Методи вимірювання та математична модель основних характеристик хвильоводно-коаксialних з'єднувачів. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2021, № 5–6, с. 16–19. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.5-6.16>.

9. Тишер Ф. *Техніка измерений на сверхвысоких частотах: Справочное руководство*. Москва, Физматгиз, 1963, 368 с.

10. Можаровский А.В., Соикин О.В., Артеменко А.А. и др. Широкополосный волноводно-микрополосковый переход зон-

дового типа миллиметрового диапазона длин волн. *Известия вузов России. Радиоэлектроника*. 2019, т. 22, № 5, с. 17–32.

11. Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р. *Синтез четырехполосников и восьмиполосников на СВЧ*. Москва, Связь, 1971, 388 с.

Дата надходження рукопису до редакції 15.06 2022 р.

DOI: 10.15222/TKEA2022.4-6.10
UDC 621.372.22

E. M. GLUSHECHENKO

Ukraine, Kyiv, “Saturn” Research and Production Enterprise

E-mail: gen-nto@ukr.net

PARTICULAR ASPECTS OF DESIGNING LONGITUDINAL-COAXIAL WAVEGUIDE-MICROSTRIP CONNECTORS

The authors justify the use of combined longitudinal-coaxial connectors — waveguide-coaxial or waveguide-microstrip type — in new modern antenna-feeder microwave paths.

Using the example of a basic coaxial waveguide-coaxial connector based on a section of a regular rectangular waveguide, the study considers the process of converting an electromagnetic wave of a regular waveguide of the main waveguide type H_{10} into a transverse electromagnetic wave of a coaxial line with a wave resistance (impedance) $Z_0 = 50 \text{ Ohm}$. Such a connector allows implementing good electrical parameters — matching (standing wave ratio, SWR) and linear losses — but its design is difficult to configure and cannot be reliably reproduced. However, the basic operation principles of this connector make it possible to use it as a prototype when creating modern coaxial waveguide-coaxial or waveguide-microstrip connectors.

One example of such a modern connector is the sealed longitudinal-coaxial waveguide-microstrip connector based on a segment of H-shaped waveguide, shorted by an end wall on one end. Correcting the reactive component of both inductive and capacitive nature will allow achieving the required parameters of the wave impedance of the connector. With this in mind, the author has built an inductive-capacitive system consisting of a matching element in the form of a staggered fin and a corrective element in the form of a rectangular parallelepiped. To ensure the air tightness of the connector design, the segment of the coaxial line was replaced by a sealed coaxial insert, which is a serial electronic component.

Particular attention was paid to the layout and design of this sealed waveguide-microstrip connector, as well as to the calculation of the overall dimensions of its elements.

The article proposes an original technique for measuring the main parameters of both waveguide-coaxial and waveguide-microstrip connectors. The author forms a mathematical model of combined type connectors based on the scattering wave matrix and presents the parameters of real hermetically sealed longitudinally coaxial waveguide-microstrip connectors based on waveguide segments of various standard sizes and measured at various frequencies.

Keywords: microwave, microstrip line, connector, waveguide, coaxial, loss, SWR, dimensions, measurement, mathematical model.

REFERENCES

1. Fel'dshteyn A.L., Yavich L.R., Smirnov V.P. *Spravochnik po elementam volnovodnoy tekhniki* [Handbook on the elements of waveguide technology]. Moscow-Leningrad, Gosenergoizdat, 1963, 670 p. (Rus)

2. Dzhurinskiy K.B. *Miniaturnyye koaksial'nyye radiokomponenty dlya mikroelektroniki SVCH* [Miniature Coaxial Radio Components for Microwave Microelectronics]. Moscow, Tekhnosfera, 2006, 216 p. (Rus)

3. Tyurin Yu. V. [Coaxial coaxial-waveguide transition]. *Patent of RF 2011245*, 1994. (Rus)

4. Khomyakov A. V. etc. *Koaksial'no-volnovodnyy perekhod* [Coaxial-waveguide transition]. *Patent of RF 2517678*, 2014. (Rus)

5. Shabunin S.N., Solovyanova I.N. *Volnovody i ob'yemnyye rezonatory* [Waveguides and cavity resonators]. Orenburg, Ural State Technical University, 1998, 38 p. (Rus)

6. Glushechenko E. M. [Longitudinal-coaxial waveguide-coaxial transformer]. *Patent of Ukraine 147621*, bull. no. 21, 2021. (Ukr)

7. Glushechenko E. M. [Hermetic longitudinal-coaxial waveguide-microstrip coupler]. *Patent of Ukraine 151222*, bull. no. 25, 2022. (Ukr)

8. Glushechenko E. M. Measurement methods and mathematical model of main characteristics of waveguide-coaxial connectors. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2021, no. 5–6, pp. 16–19. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.5-6.16> (Ukr)

9. Tisher F. *Tekhnika izmereniy na sverkhvysokikh chastotakh: Spravochnoye rukovodstvo* [Measurement technique at microwave frequencies: a handbook]. Moscow, Fizmatgiz, 1963, 368 p. (Rus)

10. Mozharovskiy A.V., Soykin O.V., Artemenko A.A. et al. Wideband waveguide-to-microstrip transition for mm-wave applications. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2019, vol. 22, no. 5, pp. 17–32. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2019-22-5-17-32> (Rus)

11. Fel'dshteyn A.L., Yavich L.R. *Sintez chetyrekhpolyusnikov i vos'mipolyusnikov na SVCH* [Synthesis of Four-Terminal and Eight-Terminal Networks at Microwave Frequencies]. Moscow, Svyaz', 1971, 388 с. (Rus)

Опис статті для цитування:

Глушеченко Е. М. Особливості проектування поздовжньо-співвісних хвильоводно-мікросмужкових з'єднувачів. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2022, № 4–6, с. 10–16. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2022.4-6.10>

Cite the article as:

Glushechenko E. M. Particular aspects of designing longitudinal-coaxial waveguide-microstrip connectors. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2022, no. 4–6, pp. 10–16. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2022.4-6.10>

К. т. н. А. В. САДЧЕНКО, О. А. КУШНІРЕНКО, Н. П. КУШНІРЕНКО,
О. В. САДЧЕНКО, О. В. ТРОЯНСЬКИЙ

Україна, Національний університет «Одеська політехніка»

E-mail: koa@opu.edu.ua

РЕАЛІЗАЦІЯ КОДЕКА МАНЧЕСТЕР ДЛЯ СИСТЕМ ПЕРЕДАВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ НА ОСНОВІ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ AVR- ТА ARM-АРХІТЕКТУРИ

Запропоновано алгоритм кодування та декодування кодом Манчестер інформації для інфрачервоних, оптичних та провідних каналів зв'язку на основі популярних мікроконтролерів — 8-розрядних сімейства AVR та 32-розрядних сімейства ARM за допомогою апаратного приймача-передавача UART, що працює в асинхронному режимі. Реалізація методу формування префіксного коду Манчестер дозволила досягти швидкості бітового потоку 1 Мбіт/с на мікроконтролерах ATmega16A та 4,5 Мбіт/с на основі STM32F103C8T6.

Ключові слова: оптична мережа, модем, манчестерське кодування, апаратний кодек, UART, мікроконтролер, архітектура AVR, ARM.

Манчестерське інформаційне кодування в порівнянні з незбалансованими кодами має такі переваги, як самосинхронізація та відсутність постійної складової:

— наявність двох гарантованих переходів в процесі передавання одного біта дає можливість сигналу самосинхронізуватися, що дозволяє приймачу (декодеру) правильно налаштуватися на швидкість передавання синхросигналу, тому не потрібна додаткова лінія передачі [1, 2];

— за будь-якого конкретного потоку бітів сигнал манчестерського кодування не містить постійної складової, якщо значення верхнього та нижнього рівнів однакові за модулем, і це полегшує побудову гальванічної розв'язки за допомогою трансформатора.

Вказані переваги дозволяють актуалізувати застосування кодів Манчестер не тільки в процесі реалізації комп'ютерних мереж, але й у проектах, пов'язаних зі збиранням телеметричних даних з різних датчиків (інтернет-речей), наприклад:

— система дистанційного знімання даних з приладів обліку споживання газу, води, тепла, електроенергії;

— система охоронної та протипожежної безпеки;

— система дистанційного моніторингу параметрів середовища у теплицях.

Одним з основних недоліків проєктів на основі оптоволоконних ліній є висока вартість кінцевого оптичного обладнання, що пов'язано зі складністю формування та обробки сигналів [3—5] на частотах від одиниць до десятків і сотень мегагерц, а при використанні дротових мереж з роздільними трансформаторами — відсутність апаратних кодеків коду Манчестер [6—9], що входять до складу поширених мікроконтролерів.

Реалізація кодера манчестерського коду на основі мікроконтролерів з архітектурами AVR та ARM не становить особливих проблем, а ось реалізувати декодувальну частину вже складніше.

Метою цієї роботи була реалізація кодека (кодера-декодера) Манчестерського коду на основі апаратних інтерфейсів мікроконтролерів невисокої продуктивності.

З метою спрощення програмного алгоритму кодування та декодування кодом Манчестер (МЧ), а також для забезпечення швидкості передавання інформації в діапазоні 1—20 Мбіт/с пропонується використовувати апаратний приймач/передавач UART, що є у складі зазначених вище мікроконтролерів.

Алгоритм формування префіксного коду Манчестер

Принцип формування кодів Манчестер 1 та Манчестер 2 продемонстровано на **рис. 1**.

Як видно з рис. 1, значення бітів «0» і «1» передаються не як логічні рівні, а у вигляді переходу зі стану «0» у стан «1», і навпаки. Основною проблемою, що виникає при декодуванні цих кодів, є пра-

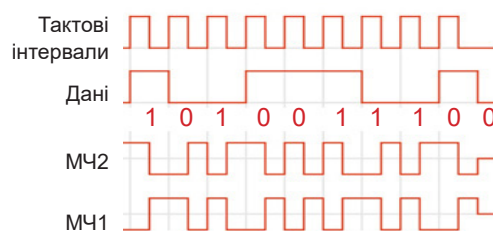


Рис. 1. Принцип формування кодів Манчестер [10]:

МЧ1 — за стандартом IEEE 802.3;

МЧ2 — за Г. С. Томасом

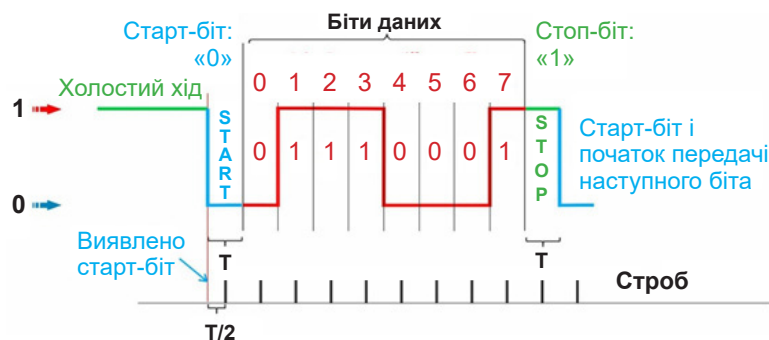


Рис. 2. Вигляд апаратного протоколу UART у форматі 8-N-1

Таблиця 1

Ансамбль з шістнадцяти кодових слів*

N_dec	Інформаційні біти Data_IN_bin								Data_Mh2_hex	Data_Mh2_dec
	IN1		IN2		IN3		IN4			
	1	2	3	4	5	6	7	8		
0	0		0		0		0		0×55	85
	0	1	0	1	0	1	0	1		
1	0		0		0		1		0×56	86
	0	1	0	1	0	1	1	0		
2	0		0		1		0		0×59	89
	0	1	0	1	1	0	0	1		
3	0		0		1		1		0×5A	90
	0	1	0	1	1	0	1	0		
4	0		1		0		0		0×65	101
	0	1	1	0	0	1	0	1		
5	0		1		0		1		0×66	102
	0	1	1	0	0	1	1	0		
6	0		1		1		0		0×69	105
	0	1	1	0	1	0	0	1		
7	0		1		1		1		0×6A	106
	0	1	1	0	1	0	1	0		
8	1		0		0		0		0×95	149
	1	0	0	1	0	1	0	1		
9	1		0		0		1		0×96	150
	1	0	0	1	0	1	1	0		
10	1		0		1		0		0×99	153
	1	0	0	1	1	0	0	1		
11	1		0		1		1		0×9A	154
	1	0	0	1	1	0	1	0		
12	1		1		0		0		0×A5	165
	1	0	1	0	0	1	0	1		
13	1		1		0		1		0×A6	166
	1	0	1	0	0	1	1	0		
14	1		1		1		0		0×A9	169
	1	0	1	0	1	0	0	1		
15	1		1		1		1		0×AA	170
	1	0	1	0	1	0	1	0		

* Кодування кодом МЧ2: «1» кодується перепадом сигналу з високого рівня до низького у середині бітового інтервалу, «0» кодується перепадом сигналу з низького рівня до високого;

N_dec — номер кодового слова у десятковому форматі;

Data_IN_bin — чотири інформаційних біта, що завантажуються одночасно;

Data_Mh2_hex, Data_Mh2_dec — інформація, закодована МЧ2 у шістнадцятковому та десятковому форматах відповідно.

вильне встановлення моменту початку бітового інтервалу [11].

Стандартний апаратний протокол UART у форматі 8-N-1 [12] має такий вигляд, як показано на **рис. 2**. Запис 8-N-1 означає, що UART налаштований на 8 бітів даних без біта парності, один стартовий та один стоповий біт.

Для формування кодів Манчестер 1 і Манчестер 2 за допомогою протоколу UART потрібно сформувати кодові слова таким чином, щоб при їх послідовному передаванні не виникало пауз тривалістю більше одного бітового інтервалу. Сформований таким чином код буде префіксом на відміну від стандартного, де стартові та стопові умови відсутні.

Ансамбль з 16 кодових слів, що відповідають коду Манчестер 2, наведено у **табл. 1** у шістнадцятковому, десятковому та двійковому вигляді.

Для отримання коду Манчестер 1 потрібно виконати інверсію всіх слів, наведених у табл. 1. Приклади кодових слів, що відповідають коду МЧ1 з урахуванням стартового та стопового бітів в бінарному, а також шістнадцятковому (*Data_Mh1_hex*) та десятковому (*Data_Mh1_dec*) форматах наведено на **рис. 3**. Тут видно, що отримані кодові слова під час передавання їх за допомогою вбудованого у мікроконтролер UART повністю задовольняють умовам формування коду Манчестер, тобто всі наведені комбінації у табл. 1 та

на **рис. 3** містять 5 нулів та 5 одиниць з урахуванням стартового та стопового бітів. Наявність у складі кожного кодового слова інтервалу, що відповідає стартовому та стоповому бітам, що йдуть один за одним через кожні 8 інформаційних бітів, дозволяє забезпечити стійку синхронізацію кодера та декодера на відміну від апаратних кодеків, що використовують код Манчестер без префіксу.

Для забезпечення максимальної швидкодії програмного коду МК до його пам'яті попередньо заносяться всі кодові слова в такий спосіб, щоб у комірку пам'яті з номером кодового слова зберігалось це кодове слово.

Наведемо кроки алгоритму роботи запропонованого кодера, який відповідає наведеному у табл. 1 даним.

Кодер:

- читання чотирьох інформаційних бітів вхідного порту *Data_IN_bin* (*IN1 ... IN4*);
- перетворення бінарного коду *Data_IN_bin* в десятковий *N_dec* (0, 1, ..., 15);
- запис у буфер передавача UART (до регістра USART_DR) коду Манчестер 2 *Data_Mh2_hex* відповідно до десяткового числа *N_dec*;
- надсилання кодового слова отримувачу за допомогою апаратного UART на заданій швидкості.

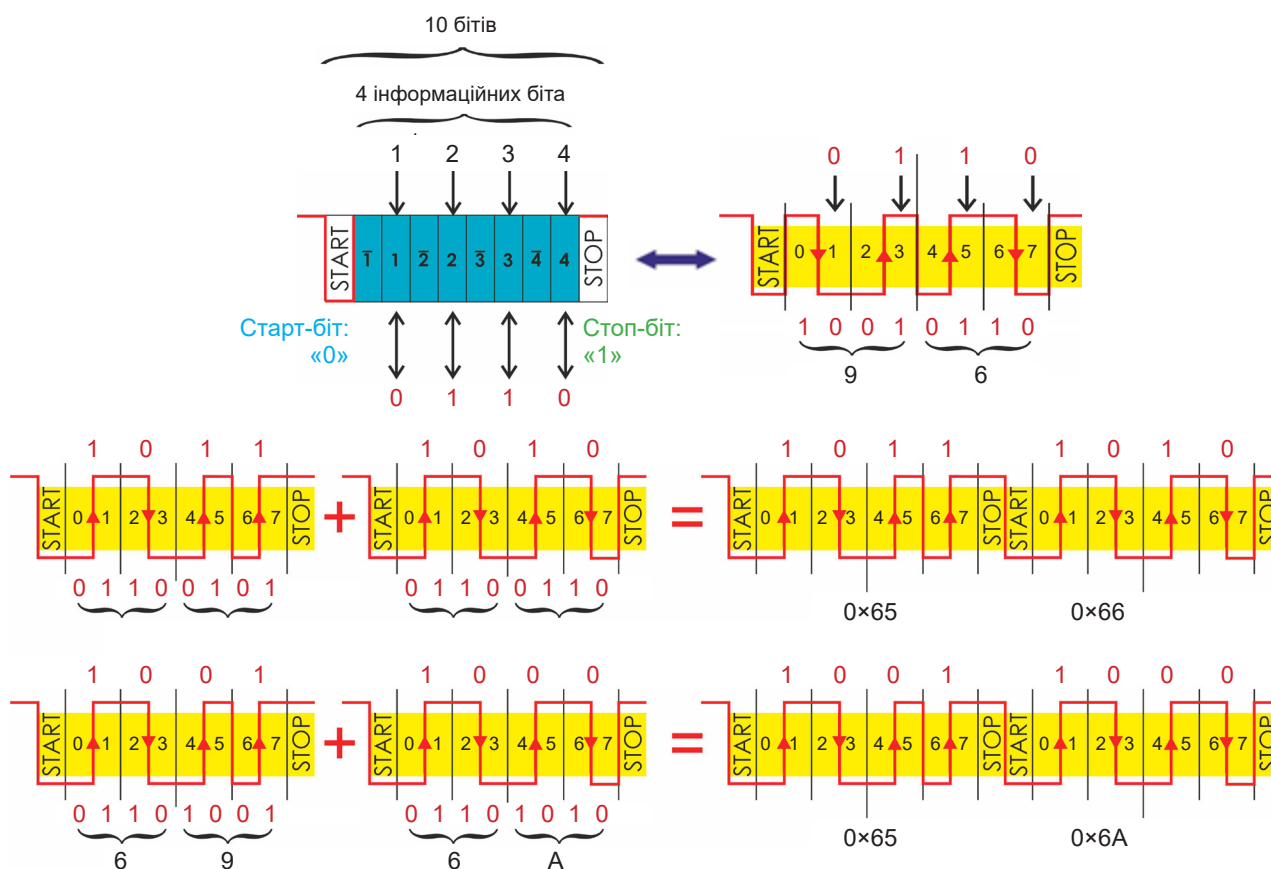


Рис. 3. Приклади кодових слів, що відповідають коду МЧ1 з урахуванням стартового та стопового бітів (префіксий код Манчестер)

Декодер:

- приймання за допомогою апаратного UART префіксного кодового слова $IN_UART_Mh2_hex$;
- декодування коду $IN_UART_Mh2_hex$ в десяткове число N_dec ;
- перетворення N_dec у бінарний вигляд та видача повідомлення отримувачу $Data_IN_bin$.

Топології мереж з використанням префіксних кодів Манчестер

На рис. 4 наведено приклади типових мереж передавання даних з різною топологією та способом зв'язку (по оптоволокну або дротовими мережами) з промисловою змінною напругою 220 В (або 380 В) з використанням роздільного трансформатора чи без нього.

На рис. 4, а показано варіант дуплексного обміну даними між двома точками інформаційної мережі, коли потрібно мати дві незалежні лінії зв'язку. На рис. 4, б також показана мережа із дуплексним обміном даними з використанням оптоволоконна, що вимагає використання оптоелектричних перетворювачів. На рис. 4, в дуплексний зв'язок здійснюється по електричній мережі зі змінною напругою 220 В із використанням розділового трансформатора, при цьому, якщо використовується коду-

вання кодом Манчестер, то нема потреби в додатковій високочастотній модуляції. На рис. 4, г приведено приклад з'єднання чотирьох абонентів оптичної мережі за топологією «Кільце», коли можливий контроль помилок в каналі зв'язку, оскільки кожний абонент має можливість приймання свого сигналу після його ретрансляції послідовно всіма абонентами мережі.

Структурну схему оптичної симплексної системи зв'язку (модема) з програмно реалізованим на мікроконтролері кодеком манчестерського коду наведено на рис. 5.

Джерело повідомлень виробляє потік даних з бітовою швидкістю $V_{дп}$, кодер UART перетворює кожний байт від джерела повідомлень за стандартом 8-N-1, після цього швидкість складає $V_{uart} = V_{дп} \cdot (5/4)$. Далі потік даних потрапляє до кодера Манчестер, який формує два байта, що передаються без захисного інтервалу зі швидкістю $V_M = 2,5V_{дп}$, тобто у 2,5 рази вище, ніж продуктивність джерела повідомлень. Після кодера коду Манчестер сигнал потрапляє на оптоелектричний перетворювач та передається до оптичної лінії зв'язку.

За необхідності збільшення числа абонентів або нарощення ємності каналів системи зв'язку краще використовувати кільцеву топологію, при цьому для

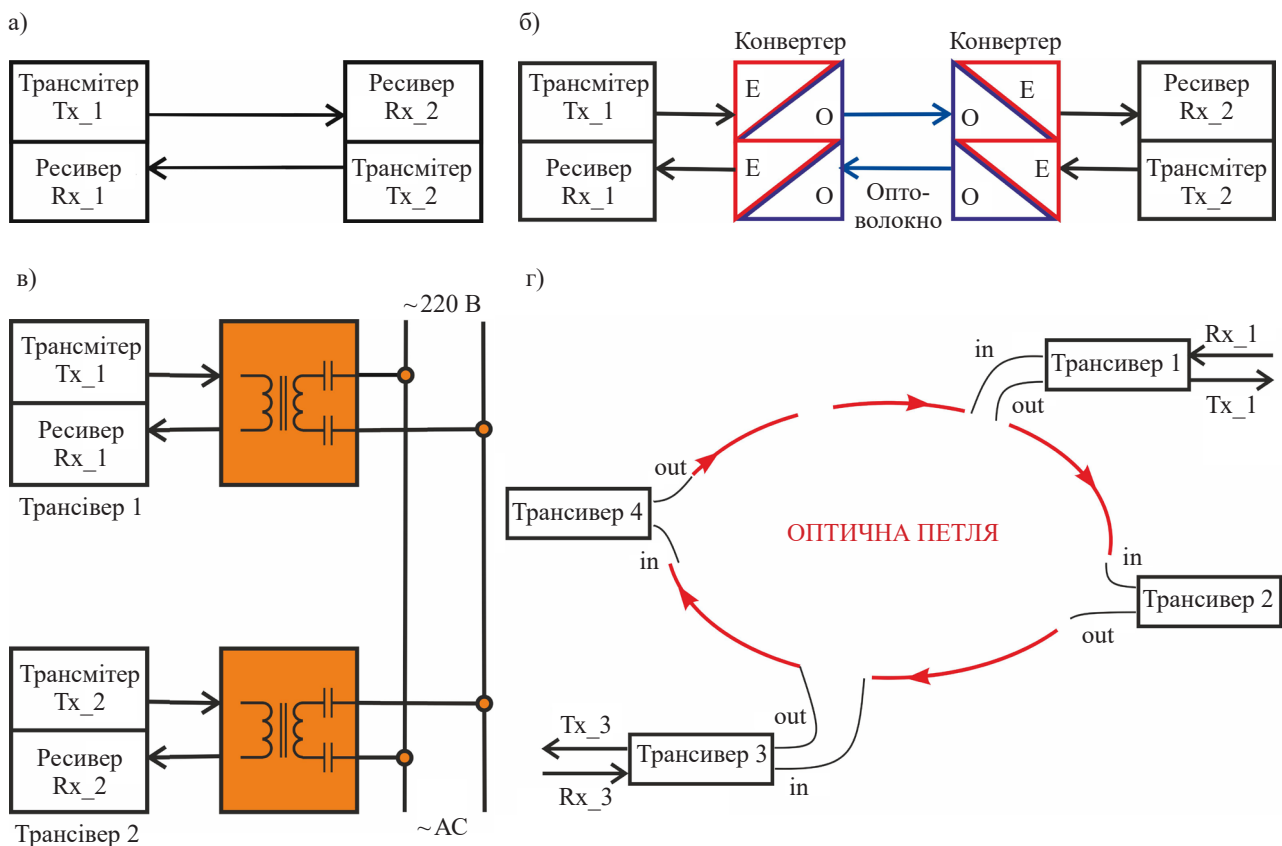


Рис. 4. Структурні схеми типових мереж передавання даних з різною топологією та способами зв'язку:

- а — «точка – точка», дуплексний режим на базі дроту; б — «точка – точка», дуплексний режим на базі оптичних конверторів; в — «точка – точка», дуплексний режим поверх дротової мережі 220 В; г — «Кільце», дуплексний режим в оптичній мережі

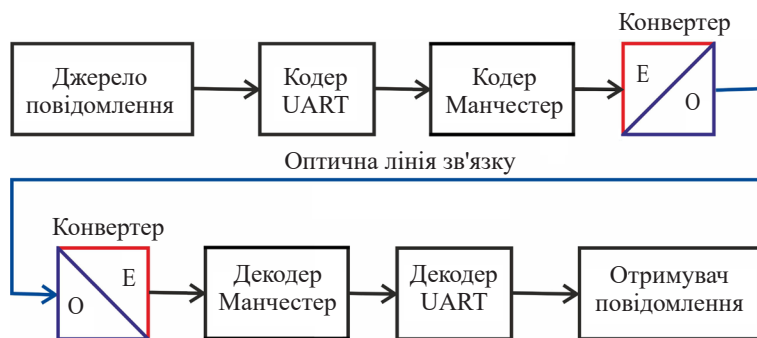


Рис. 5. Структурна схема оптичного модема з манчестерським кодуванням

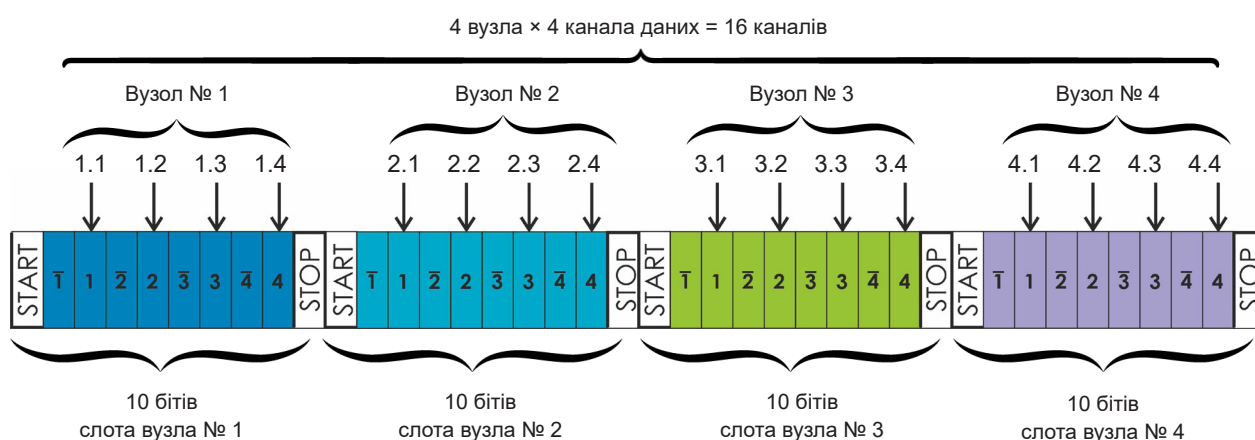


Рис. 6. Формат кадру в режимі «Кільце»

Таблиця 2

Порівняння характеристик мікроконтролерів фірми Microchip та STMicroelectronics

Параметри	МК	
	ATmega16A [7]	STM32F103C8T6 [9]
Розрядність, біт	8	32
Пам'ять програми (FLASH), Кб	16	64
SRAM, Кб	1	20
EEPROM, байт	512	—
АЦП	ADC 8-канальний 10-біт	2×ADC 10-канальний 12-біт
Максимальна частота роботи ядра, МГц	16	72
Максимальна швидкість передавання даних по UART	2 000 000 біт/с [8] (при тактовій частоті ядра та кварцового резонатора 16 МГц)	4 500 000 біт/с по UART 1 [13]; 2 250 000 біт/с по UART 2, 3 [13] (при тактовій частоті ядра 72 МГц та кварцового резонатора 16 МГц)
Заводське калібрування / точність RC-генератора	так / ±10%	так / ±2%
Інтерфейси	1×I ² C, 1×SPI, 1×UART	1×CAN, 2×I ² C, 1×IrDA, 1×LIN, 2×SPI, 3×USART, USB
Корпус	TQFP-44	LQFP-48

масштабування потрібно лише модифікувати програмну частину та структуру кадру.

Структуру пакета даних (формат кадру), що передаються по оптоволокну в режимі «Кільце» для числа вузлів, що дорівнює 4, наведено на **рис. 6**. Основна відмінність цього режиму від режиму «точка – точка» полягає у формуванні чотирьох інформаційних слотів, розділених стартоповими умовами, які необхідні для забезпечення синхронізації потоку даних.

Практична реалізація кодека Манчестер на промислових мікроконтролерах

Порівняння мікроконтролерів різних виробників та архітектури наведено в **табл. 2**.

Щоб забезпечити передавання великого об'єму вхідних даних, необхідна висока швидкість передавання по UART, тому треба вибирати МК з більшою максимальною частотою роботи ядра. Як видно з **табл. 2**, для цього з двох розглянутих краще використовувати мікроконтролер STM32F103C8T6 фірми STMicroelectronics.

Виконати базове налаштування периферії мікроконтролера STM32F103C8T6 можна за допомогою редактора конфігурації STM32CubeMX [13]. Графічний редактор конфігурації та генератор коду STM32CubeMX, пропонує STMicroelectronics, дозволяє здійснювати тонке автоматизоване налаштування ініціалізації.

На **рис. 7** зображено екран з вікном налаштування конфігурації (Pinout & Configuration). У вкладці

Categories проводиться вибір необхідної периферії («на борту» мікроконтролера є великий набір периферії: 1×CAN, 2×I²C, 2×SPI, 3×USART, USB), у нашому випадку це USART1. У вкладці USART1 Mode and Configuration активується USART1 в асинхронному режимі, а у вкладці Parameter Settings / Basic Parameters обираються необхідні параметри — в Baud Rate вибирається максимальна швидкість передавання даних UART 4 500 000 біт/с.

Відповідність між бітовими швидкостями вхідних даних та даних фізичного рівня (Physical layer, PHY) продемонстровано у **табл. 3**.

Таблиця 3

Залежність між бітовими швидкостями передавання вхідних даних та даних фізичного рівня

Бітова швидкість передавання даних, біт/с	
вхідних	фізичного рівня
46 080	115 200
92 160	230 400
184 320	460 800
368 640	921 600
737 280	1 843 200
1 474 560	3 686 400
1 800 000	4 500 000

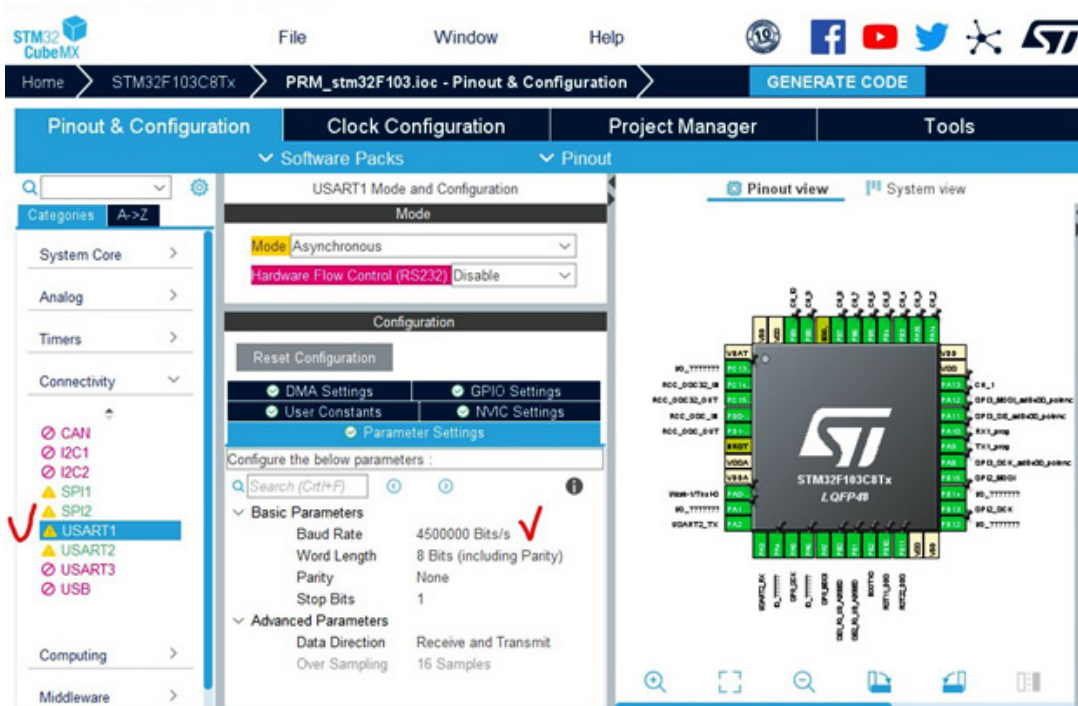


Рис. 7. Налаштування UART1 за допомогою графічного редактора конфігурації STM32CubeMX на швидкість передавання даних 4 500 000 біт/с

Висновок

Таким чином, реалізація запропонованого методу формування префіксного коду Манчестер за допомогою апаратного UART, вбудованого в мікроконтролер, дозволило досягти швидкості бітового потоку 1 Мбіт/с на МК ATmega16A та 4,5 Мбіт/с на основі STM32F103C8T6. При цьому відносна швидкість коду чи відношення числа інформаційних символів до загальної довжини кодового слова становить 2/5, що дозволяє передавати дані на швидкості до 1,8 Мбіт/с у разі використання мікроконтролера STM32F103C8T6.

Отримана надмірність інформації дозволяє виявляти помилки у каналі зв'язку. Наявність помилок також зручно контролювати в топології мережі «Кільце» при реалізації алгоритму прозорого передавання даних від кожного абонента мережі.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Wijanto E., Huang C.-M. Design of bipolar optical code-division multiple-access techniques using phase modulator for polarization coding in wireless optical communication. *Appl. Sci.*, 2021, vol. 11, iss. 13, 5955. <https://doi.org/10.3390/app11135955>
2. Гольдштейн Б. С. *Протоколи сети доступа*. Петербург, БХВ, 2005.
3. Tseng S.P., Wijanto E., Lai P.H., Cheng H.C. Bipolar optical code division multiple access techniques using a dual electrooptical modulator implemented in free-space optics communications. *Sensors*, 2020, vol. 20, 3583. <https://doi.org/10.3390/s20123583>
4. Singh M., Malhotra J. A high-speed long-haul wavelength division multiplexing-based inter-satellite optical wireless communication link using spectral-efficient 2-D orthogonal modulation scheme. *Int. J. Commun. Syst.* 2019, vol. 33, e4293. <https://doi.org/10.1002/dac.4293>

5. Cheng H.-C., Wijanto E., Lien T.-C. et al. Multiple access techniques for bipolar optical code division in wireless optical communications. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 83511–83523. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2991071>

6. Садченко А. В., Кушніренко О. А., Яцьк А. Д., Лисица Д. Н. Реализация кодера и декодера кодов Манчестер 1 и Манчестер 2 для оптических модемов на основе микроконтроллеров AVR- и ARM-архитектуры. *Труды XXII Междунар. науч.-практ. конф. «СИЭТ»*, 2021, с. 16–17. <http://www.tkea.com.ua/siet/archive/2021/16-17.pdf>

7. Сухман С. М., Бернов А. В., Шевкопляс Б. В. *Синхронизация в телекоммуникационных системах. Анализ инженерных решений*. Москва, Эко-Трендз, 2003.

8. Садченко А. В., Кушніренко О. А., Ефимов О. И. и др. Корреляционная схема кадровой синхронизации в системах связи с QPSK-модуляцией. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2017, № 6, с. 22–8. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2017.6.22>

9. Брени С. *Синхронизация цифровых сетей связи*. Москва, Мир, 2003.

10. *Product Features Microchip ATmega16A*. <https://www.microchip.com/en-us/product/ATmega16A>

11. *Documentation: Datasheet ATmega16A, 8-bit microcontroller with 16K bytes in-system*. https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-8154-8-bit-AVR-ATmega16A_Datasheet.pdf

12. *Documentation: Datasheet, STM32F103T6, Arm Cortex-M3 MCU with 32 Kbytes of Flash memory, 72 MHz CPU, motor control, USB and CAN*. <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f103t6.html>

13. *STM32Cube initialization code generator*. <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubemx.html>

Дата надходження рукопису
до редакції 21.02 2022 г.

Опис статті для цитування:

Садченко А. В., Кушніренко О. А., Кушніренко Н. П., Садченко О. В., Троянський О. В. Реалізація кодера Манчестер для систем передавання інформації на основі мікроконтролерів AVR- та ARM-архитектури. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2022, № 4–6, с. 17–24. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2022.4-6.17>

Cite the article as:

Sadchenko A. V., Kushnirenko O. A., Kushnirenko N. P., Sadchenko O. V., Troyanskiy O. V. Implementation of manchester codec for information transmission systems based on AVR and ARM architecture microcontrollers. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2022, no. 4–6, pp. 17–24. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2022.4-6.17>

IMPLEMENTATION OF MANCHESTER CODEC FOR INFORMATION
TRANSMISSION SYSTEMS BASED ON AVR AND ARM ARCHITECTURE
MICROCONTROLLERS

ATmega series AVR microcontrollers (e.g., ATmega8A or ATmega16A) and ARM microcontrollers with a Cortex M3 core (e.g., STM32F103C8T6) are among the most popular controllers used in solving engineering problems related to servicing various fire and security alarm sensors and devices for metering household and industrial power consumption. At the same time, to transfer the data via a twisted pair or AC voltage network, it needs to be encoded using Manchester 1 or Manchester 2 code, and said AVR and ARM microcontroller units (MCU) contain no hardware encoder and decoder for the Manchester code.

The study aimed at solving the engineering problem of implementing the codec (encoder-decoder) of the Manchester code based on the hardware interfaces of low-performance microcontrollers.

The direct implementation of the encoding algorithm with the Manchester code using a purely software-driven approach significantly decreases the information transfer rate. At the same time, among the hardware interfaces of the MCU, there is always a serial universal asynchronous data transceiver (UART). However, the UART data transfer protocol is not generally suitable for Manchester encoding and, therefore, needs to be software adapted.

In order to adapt the UART protocol to the conditions of Manchester encoding, the 8N1 mode is selected at the hardware level, which means 8 data bits, 1 stop and 1 start bit. The software implementation of the encoder consists in the fact that out of the total possible volume of 256 code combinations, 16 are selected that satisfy the Manchester 2 code, while the start and stop conditions for data bytes transmitted in a row also satisfy the structure of the Manchester code.

To maximize the efficiency of the program code, all code words are stored in the memory of the MCU in such a way that their serial number corresponds to the decimal interpretation of 4 bits of the input data. The decoding of the received data is also performed as efficiently as possible using the decoding table.

The implementation of the software and hardware codec of the Manchester code significantly expands the scope of popular AVR and ARM microcontrollers and reduces the cost of the finished product by excluding any additional units that perform the function of encoding and decoding the Manchester code.

Keywords: optical network, modem, Manchester encoding, hardware codec, UART, microcontroller.

REFERENCES

1. Wijanto E., Huang C.-M. Design of bipolar optical code-division multiple-access techniques using phase modulator for polarization coding in wireless optical communication. *Appl. Sci.*, 2021, vol. 11, iss. 13, 5955. <https://doi.org/10.3390/app11135955>
2. Goldstein B.S. *Protokoly seti dostupa* [Access network protocols]. Saint Petersburg, BHV, 2005. (Rus)
3. Tseng S.P., Wijanto E., Lai P.H., Cheng H.C. Bipolar optical code division multiple access techniques using a dual electrooptical modulator implemented in free-space optics communications. *Sensors*, 2020, vol. 20, 3583. <https://doi.org/10.3390/s20123583>
4. Singh M., Malhotra J. A high-speed long-haul wavelength division multiplexing-based inter-satellite optical wireless communication link using spectral-efficient 2-D orthogonal modulation scheme. *Int. J. Commun. Syst.* 2019, vol. 33, e4293. <https://doi.org/10.1002/dac.4293>
5. Cheng H.-C., Wijanto E., Lien T.-C. et al. Multiple access techniques for bipolar optical code division in wireless optical communications. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 83511–83523. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2991071>
6. Sadchenko A. V., Kushnirenko O. A., Yatsyk O. D., Lysytsia D. M. [Implementation of encoder and decoder of Manchester 1 and Manchester 2 codes for optical modems based on AVR and ARM architecture]. *Proceeding of the XXII Intern. scientific-practical conf. MIET*, 2021, pp. 16–17. <http://www.tkea.com.ua/siet/archive/2021/16-17.pdf>
7. Sukhman S. M., Bernov A. V., Shevkoplyas B. V. *Sinkhronizatsiya v telekommunikatsionnykh sistemakh. Analiz inzhenernykh resheniy* [Synchronization in telecommunication systems. Analysis of engineering solutions]. Moscow, Eco-Trends, 2003. (Rus)
8. Sadchenko A. V., Kushnirenko O. A., Yefimov O. I. et al. Correlation scheme of frame synchronization in communication systems with QPSK-modulation. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2017, no 6, pp. 22–28. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2017.6.22> (Rus)
9. Breni S. *Sinkhronizatsiya tsifrovyykh setey svyazi*. [Synchronization of digital communication networks]. Moscow, Mir, 2003. (Rus)
10. *Product Features Microchip ATmega16A*. <https://www.microchip.com/en-us/product/ATmega16A>
11. *Documentation: Datasheet ATmega16A, 8-bit microcontroller with 16K bytes in-system*. https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-8154-8-bit-AVR-ATmega16A_Datasheet.pdf
12. *Documentation: Datasheet, STM32F103T6, Arm Cortex-M3 MCU with 32 Kbytes of Flash memory, 72 MHz CPU, motor control, USB and CAN*. <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f103t6.html>
13. *STM32Cube initialization code generator*. <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubemx.html>

К. т. н. О. Ф. БОНДАРЕНКО, О. П. ГОЛУБЕНКО, О. С. ЯМА, А. Ю. ЗІНЧЕНКО

Україна, м. Київ, Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
E-mail: bondarenkoaf@gmail.com

ІМПУЛЬСНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ЗІ ЗНИЖЕНОЮ ПУЛЬСАЦІЄЮ ВИХІДНОГО СТРУМУ

Показано актуальність дослідження імпульсних перетворювачів з метою отримання вихідного струму з низькими пульсаціями для живлення чутливих навантажень і наведено огляд методів зниження пульсацій та найпоширеніших топологій перетворювачів. Представлено результати практичного застосування розробленого експериментального стенда та проаналізовано отримані залежності величини пульсацій вихідного струму від об'ємів силових частин перетворювачів різних топологій за умови однакової потужності та частоти. Наведено рекомендації щодо обрання типу перетворювача у кожному конкретному випадку з точки зору зменшення пульсацій.

Ключові слова: імпульсні перетворювачі електроенергії, пульсація вихідного струму, згладжування пульсацій, топології перетворювачів, перетворювач з компенсуючою фазою.

Перетворювачі, що працюють в імпульсному режимі, забезпечують вищий коефіцієнт корисної дії (ККД) порівняно з перетворювачами у в безперервному режимі. Вихідний струм імпульсних перетворювачів має не тільки постійну складову, але й змінну — високочастотну пульсацію. Для деяких типів застосувань імпульсних перетворювачів, зокрема в складі джерел живлення для контактного зварювання металів, зварювання біологічних тканин, електролізерів, лазерів, обчислювальної та акустичної техніки тощо, необхідно забезпечувати дуже низький рівень пульсацій вихідного струму. Забезпечення необхідного рівня пульсацій зазвичай здійснюється шляхом використання згладжувальних фільтрів. Зниження рівня пульсацій струму потребує збільшення номіналів елементів і, відповідно, габаритних розмірів фільтра. В результаті у джерелах живлення, які зазвичай працюють як замкнені системи зі зворотним зв'язком, погіршуються динамічні характеристики — збільшується інерція контуру регулювання і знижується статична і динамічна точність регулювання, збільшується вартість елементів фільтра. З іншого боку підвищення частоти перемикання силових транзисторів імпульсних перетворювачів, хоча і дозволяє знизити розміри елементів фільтра, проте призводить до збільшення динамічних втрат, і у відповідних силових транзисторах, і в елементах фільтра [1].

Таким чином в процесі розробки імпульсних перетворювачів для забезпечення низького рівня пульсації вихідного струму необхідно шукати компроміс між габаритними розмірами елементів і прийнятними втратами в них з урахуванням дина-

мічних характеристик джерел живлення як замкнених систем зі зворотним зв'язком. Використання багатofазних імпульсних перетворювачів може сприяти розв'язанню зазначеної проблеми, але не забезпечує низький рівень пульсацій вихідного струму в широкому діапазоні зміни коефіцієнта заповнення імпульсів управління.

Метою цієї роботи є визначення топології імпульсного перетворювача, яка б забезпечувала зниження пульсації вихідного струму за умови збереження потужності та об'єму конструкції.

Аналіз найпоширеніших топологій імпульсних перетворювачів і шляхів зниження пульсацій вихідного струму

Для досягнення зазначеної мети проведемо аналіз шляхів зменшення пульсацій вихідного струму в імпульсних перетворювачах різного типу та оберемо найефективніший.

Наразі широке розповсюдження отримав знижувальний імпульсний перетворювач постійної напруги. Він належить до базових перетворювачів і складається з транзистора, діода, котушки індуктивності та конденсатора. Слід зазначити, що чим більше пряме падіння напруги на діоді, тим більшими є втрати, тому зазвичай використовують діод Шоттки, в якого пряме падіння напруги є меншим. За великого струму навантаження потужність втрат на діоді можна знизити, якщо використати замість нього синхронний транзистор, який функціонує в протифазі з основним транзистором. Регулювання вихідної напруги такого перетворювача здійснюється зміною співвідношення тривалостей відкритого та закритого станів основного силового транзистора [2]. На виході

такого імпульсного перетворювача формується напруга у вигляді послідовності прямокутних імпульсів, яку можна використовувати для живлення нечутливих до пульсацій струму навантажень, наприклад електричних нагрівачів. Для живлення переважної більшості пристроїв, яким необхідний струм з невеликою пульсацією, до схеми перетворювача потрібно додати LC-фільтр [3, 4]. Схему описаного перетворювача та форми струмів на його елементах наведено на **рис. 1, 2**.

З представлених на **рис. 3** залежностей відносного габаритного розміру фільтра (*RFS*) від пульсацій вихідного струму видно, що відповідно до конкретних вимог до перетворювача існує оптимальний діапазон відносних габаритних розмірів фільтра.

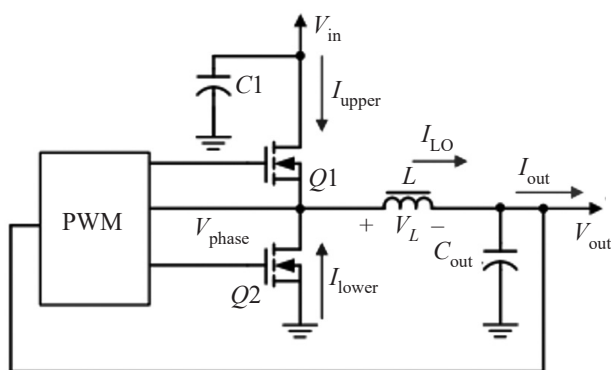


Рис. 1. Схеми імпульсного знижувального перетворювача постійної напруги з синхронним транзистором [5]

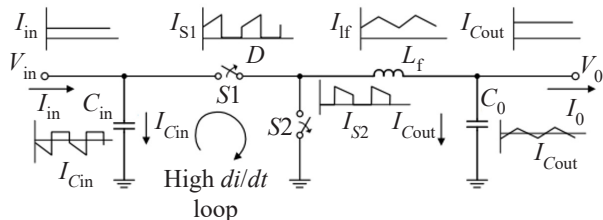


Рис. 2. Форма струму на елементах перетворювача [5]

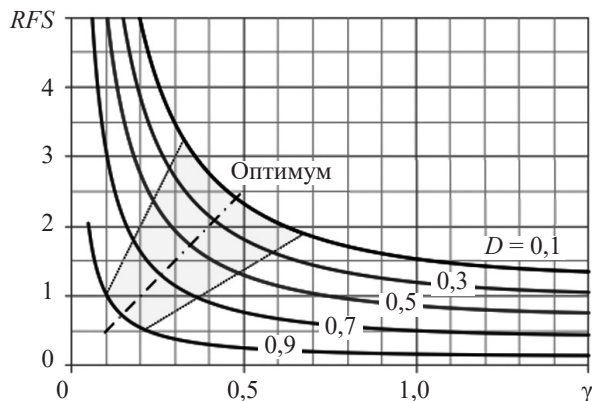


Рис. 3. Залежність відносного габаритного розміру фільтра *RFS* від пульсацій вихідного струму для різних значень коефіцієнта заповнення імпульсів управління *D* [6]

Один зі шляхів мінімізації пульсацій вихідного струму полягає у збільшенні кількості витків котушки індуктивності, що своєю чергою призводить до збільшення її габаритних розмірів і підвищує собівартість перетворювача в цілому [6]. Інший підхід полягає у збільшенні частоти комутації силових транзисторів. Необхідно відзначити, що силові транзистори, які розраховані на роботу з великими струмами, мають велику ємність затвор – виток, і для їх переходу із закритого у відкритий стан і навпаки витрачається більше часу, при цьому також необхідно використовувати потужні драйвери для забезпечення великого струму перезаряду цих ємностей. В процесі переходу із закритого стану у відкритий і навпаки транзистор перебуватиме у лінійному режимі й сильно нагріватиметься. Тобто наслідком збільшення частоти імпульсів управління буде збільшення відносного часу перебування транзистора в лінійному режимі та збільшення динамічних втрат.

Однофазні знижувальні імпульсні перетворювачі постійної напруги добре працюють зі струмами навантаження приблизно до 25 А, подальше збільшення значень цих струмів призводить до зниження коефіцієнта корисної дії (ККД). Одним з можливих рішень є використання багатофазного перетворювача. На **рис. 4** наведено схему багатофазного знижувального імпульсного перетворювача постійної напруги з трьома паралельними фазами, а також імпульси управління силовими транзисторами відповідних фаз.

Багатофазний перетворювач являє собою декілька синхронних перетворювачів, з'єднаних між собою паралельно. Всі фази функціонують з однаковим коефіцієнтом заповнення імпульсів, але з відповідним часовим зсувом, який залежить від кількості фаз. Струм у всіх фазах є однаковим, а у спільному вихідному вузлі струми фаз додаються, що дозволяє в таких перетворювачах нарощувати потужність до необхідних значень. Частота пульсацій вихідного струму визначається перемноженням частоти імпульсів управління на кількість використовуваних фаз, а це своєю чергою дозволяє перетворювачу працювати на відносно низьких частотах, тобто динамічні втрати в перетворювачі будуть меншими [1].

Наведені на **рис. 5** діаграми пульсації струму в трифазному перетворювачі ілюструють ситуацію, коли вихідний струм у три рази більший, ніж у кожній окремій фазі, а пульсації приблизно у три рази менші.

Теоретичні криві на **рис. 6** вказують на те, що залежно від кількості фаз та коефіцієнта заповнення імпульсів існують точки, де пульсації струму знижуються до нуля, оскільки окремі пульсації струмів кожної фази повністю компенсують одна одну. Однак реалізувати це на практиці заважають шуми, перехідні процеси та інші фактори, під впливом яких

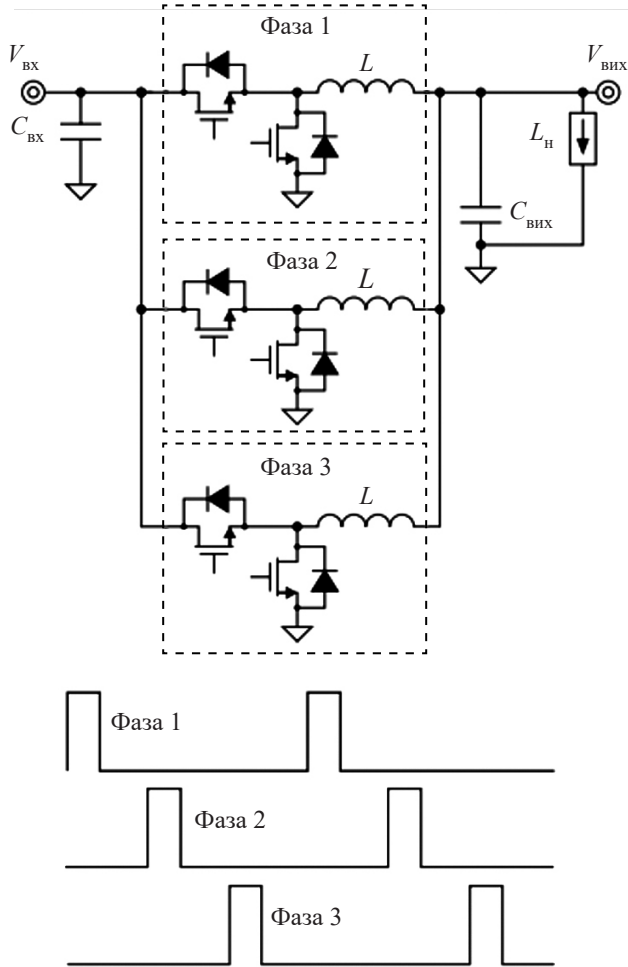


Рис. 4. Схема трифазного понижувального перетворювача та діаграми імпульсів управління силовими транзисторами відповідних фаз [7]

може змінюватись значення коефіцієнта заповнення імпульсів.

На практиці часто виникають ситуації, коли споживана потужність суттєво зменшується відносно номінальної. В таких випадках кількість фаз може стати надмірною, а внаслідок роботи транзисторів, потреба в яких зникає, знижується ККД. Для того щоб його підвищити, застосовують відповідні методи управління, наприклад оптимальне або адаптивне управління кількістю фаз, що призводить до реконфігурації схеми перетворювача відповідно до струму навантаження. Такий підхід може бути незамінним, коли необхідно отримати високий ККД у всьому діапазоні значень струму навантаження (рис. 7).

Розвитком розглянутих схем є схема перетворювача з додатковою фазою, яку наведено на рис. 8. Її основою є схема синхронного перетворювача до якої додається фаза компенсації. В результаті отримуємо схему, схожу на класичний двофазний перетворювач, але з додатковим конденсатором C_s . Обидві ланки перетворювача працюють в протифазі, тобто коли дросель L_p під'єднано до

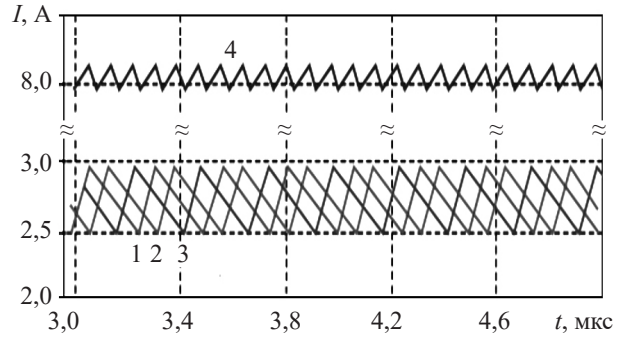


Рис. 5. Діаграми струмів у каскадах (1, 2, 3) та вихідний струм (4) багатофазного перетворювача [7]

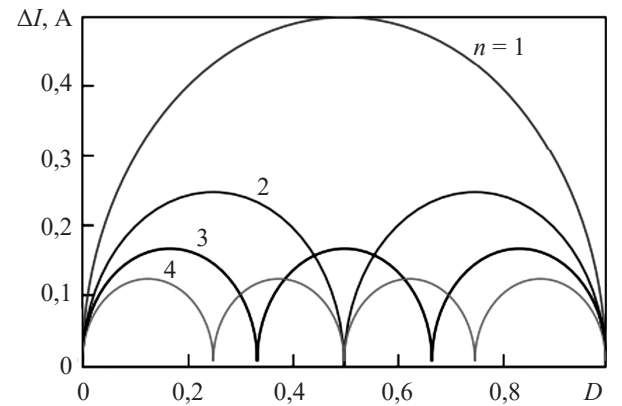


Рис. 6. Залежність пульсацій струму ΔI від коефіцієнта заповнення імпульсів керування для різної кількості фаз n [8]

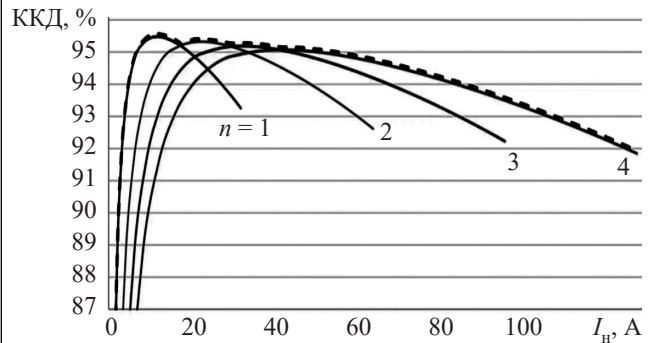


Рис. 7. Залежність ККД багатофазного перетворювача від струму навантаження I_n для різної кількості фаз n

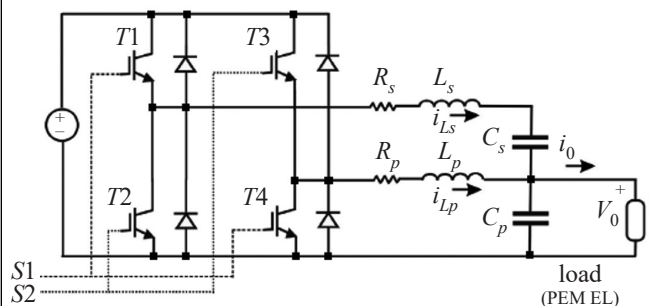


Рис. 8. Схема перетворювача з компенсальною фазою [9, 10]

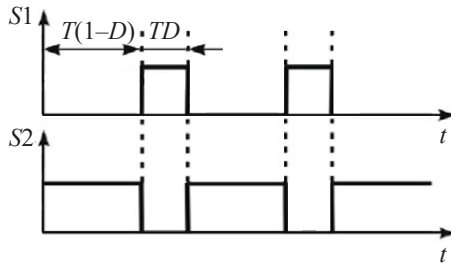


Рис. 9. Діаграми сигналів управління перетворювача з компенсувальною фазою [9, 10]

вхідного джерела, дросель L_s під'єднано до шини з нульовим потенціалом, і навпаки. На **рис. 9** наведено послідовності імпульсів управління перетворювачем $S1$ та $S2$, з яких видно, що його фази працюють із різними коефіцієнтами заповнення імпульсів.

Основна фаза перетворювача працює як класичний синхронний перетворювач. Через котушку L_p протікає постійний струм зі змінною складовою — імпульсними пульсаціями. Оскільки конденсатор C_s додано в схему як розділовий, то через нього в усталеному режимі протікає лише змінна складова струму, тобто імпульсні пульсації. З огляду на те, що транзистори основної й компенсувальної фаз перетворювача працюють в протифазі, відповідно й імпульсні пульсації компенсувальної фази також формуються в протифазі. Теоретично такий підхід дозволяє здійснити повну компенсацію пульсацій у струмі навантаження (**рис. 10**). Однак на практиці вони, хоча й дуже сильно послаблюються, проте їх повної компенсації досягти не вдається.

Головною перевагою схеми перетворювача з додатковою фазою у порівнянні зі схемою класичного багатофазного перетворювача, де повна компенсація пульсацій відбувається тільки за певних значень коефіцієнта заповнення імпульсів управління, є суттєва компенсація пульсацій незалежно від значень коефіцієнта заповнення імпульсів управління. Використання всього двох фаз створює передумови для оптимізації об'єму конструкції перетворювача за

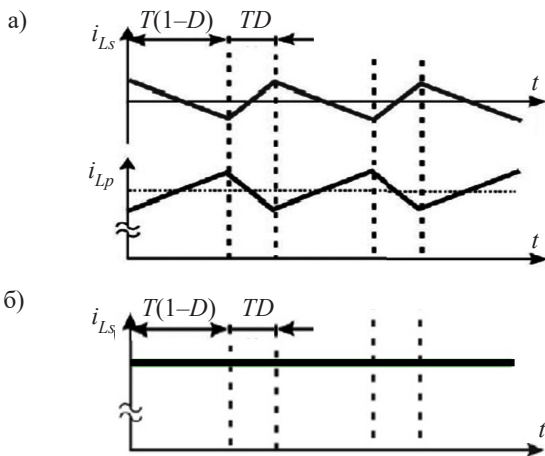


Рис. 10. Графіки струмів, які протікають в котушках (а) та навантаженні (б) [10]

умови забезпечення бажаного ККД і рівня пульсацій струму. Оскільки через компенсувальну фазу протікає лише змінна складова струму, потужність втрат на її елементах є набагато меншою ніж в елементах основної фази. Відповідно для неї можна використовувати силові транзистори меншої потужності, а також котушку індуктивності й конденсатор менших розмірів. В ситуації, коли елементи компенсувальної фази виходять з ладу, схема може бути переведена в режим роботи класичного імпульсного перетворювача постійної напруги, що знижує. У роботах [9—11] автори використовують котушки L_p та L_s з однаковими значеннями індуктивності, а значення ємності C_s рекомендують обирати в 10 разів менше в порівнянні з C_p , для того, щоб компенсаційна фаза в разі виходу з ладу не впливала на роботу основної фази.

Існують інші схемні рішення, які дозволяють зменшити пульсації вихідного струму та додатково покращити інші характеристики перетворювача. Одне з них — перетворювач Чука з гібридним трансформатором, схему якого зображено на **рис. 11**. В разі необхідності глибокого регулювання вихідної напруги (5—7 разів і більше) класичні схеми потребують включення декількох послідовних ланок з імпульсних перетворювачів, що призводить до зниження ККД. Перетворювач Чука з гібридним трансформатором дозволяє здійснювати регулювання напруги не тільки зміною коефіцієнта заповнення, а й коефіцієнта трансформації, що в сукупності для однієї ланки дозволяє зменшити напругу у 50—100 разів [13].

Завдяки застосуванню гібридного методу перемикачання та відносно низьким частотам комутації (50—200 кГц) ККД перетворювача Чука з гібридним трансформатором може досягати 99%. Відповідно, зникає необхідність використання зворотного зв'язку для регулювання вихідної напруги на відміну від класичних перетворювачів.

Для зменшення пульсацій вихідного струму перетворювача Чука з гібридним трансформатором достатньо включити дві ідентичні ланки перетворювача в паралель і забезпечити роботу зі зсувом фаз на половину періоду комутації. Це дозволяє знизити вихідну амплітуду пульсацій до дуже низьких значень, використовуючи на порядок меншу ємність вихідного конденсатора в порівнянні з класичною схемою синхронного перетворювача [12].

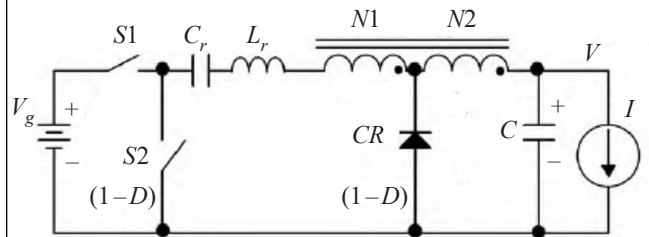


Рис. 11. Перетворювач Чука з гібридним трансформатором [12]

Результати експериментальних досліджень

Для порівняння характеристик схем імпульсних перетворювачів авторами було розроблено експериментальний стенд, фотографії складових частин якого наведено на **рис. 12**.

Основою стенду є схема двофазного імпульсного перетворювача постійної напруги, що знижує. До схеми додано перемикачі, які дозволяють змінити її конфігурацію й отримати класичний однофазний знижувальний імпульсний перетворювач постійної напруги та імпульсний перетворювач з компенсаційною фазою. Також передбачено наявність перемикачів, які дозволяють змінювати значення ємності та індуктивності вихідного фільтра.

Система управління перетворювачами побудована на базі налагоджувальної плати Black Pill з мікроконтролером STM32F401CEU6. Мікроконтролер здійснює формування ШІМ-сигналу з амплітудою 3 В та з вихідним струмом в межах десятків міліампер, чого не достатньо для управління комутацією силових транзисторів, тому для узгодження параметрів сигналів налагоджувальної плати й вхідних кіл силових транзисторів використано мікросхеми драйверів IR2104. Для реалізації керованого навантаження використано силовий транзистор, який працює у лінійному режимі, що дозволяє плавно змінювати його опір.

Параметри стенда та характеристики компонентів силової частини наведено у **табл. 1, 2**.

За допомогою розробленого стенда для кожної з трьох описаних схем імпульсних перетворювачів було здійснено варіювання номіналів індуктивності та ємності вихідного фільтра й виміряно амплітуди пульсацій вихідного струму ΔI . Для зіставлення величини пульсацій з об'ємом силової частини схеми в першому наближенні було розраховано об'єм конструкцій відповідних перетворювачів. При цьому необхідно зазначити, що під час створення стенда не вирішувалась задача мінімізації конструктивних

Таблиця 1

Параметри стенда

Вхідна напруга, $V_{вх}$	12 В
Вихідна напруга, $V_{вих}$	0 — 12 В
Вихідний струм (на повноцінну фазу), $I_{вих}$	2 А
Частота комутації, f	20 кГц

Таблиця 2

Характеристики компонентів силової частини

Компонент	Номінал (назва)	Розміри (корпус)
Транзистор	IRFZ44	ТО-220
Котушка	100 мкГн	$d = 13 \text{ мм}, h = 7 \text{ мм}$
Котушка	220 мкГн	
Конденсатор	10 мкФ	$d = 4 \text{ мм}, h = 8,5 \text{ мм}$
Конденсатор	22 мкФ	

розмірів перетворювачів, тому отримана потужність перетворювачів на одиницю об'єму є досить низькою порівняно з сучасними промисловими зразками. Але ж очевидно, що це не має значення для порівняння реалізованих на стенді схем між собою. Для врахування об'єму перетворювача з компенсаційною фазою було оцінено наявне значення струму компенсаційної фази залежно від номіналу відповідної індуктивності котушки, відносна величина якого складала 10—25% від струму основної фази та не залежала від опору навантаження. Отже, для оцінки об'єму зазначеної схеми перетворювача можна використати компоненти менших розмірів. Це і було зроблено: замінено транзистори в корпусі ТО-220 на ТО-92 та використано котушки індуктивності діаметром 8 мм і висотою 5 мм. В результаті об'єм компенсаційної фази вдалося зменшити в 4 рази в порівнянні з основною фазою.

На **рис. 13** наведено залежності амплітуди пульсацій вихідного струму імпульсних перетворювачів

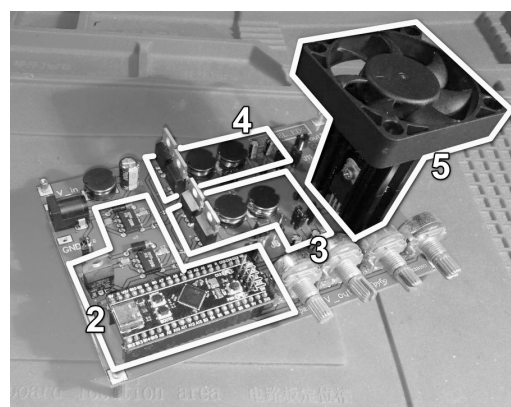
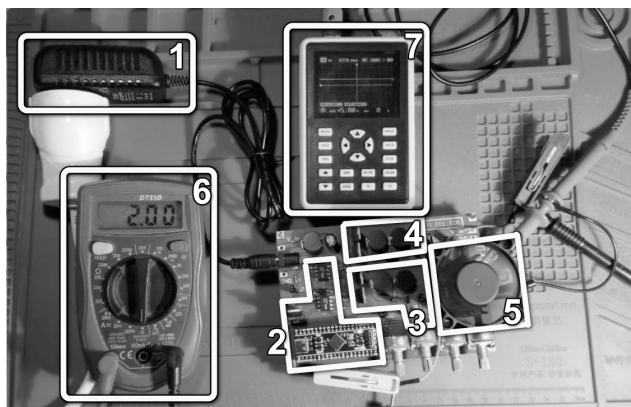


Рис. 12. Експериментальний стенд:

1 — джерело живлення 12 В; 2 — схема управління; 3, 4 — перша та друга фази; 5 — навантаження; 6 — амперметр; 7 — цифровий осцилограф FNIRSI-5012H

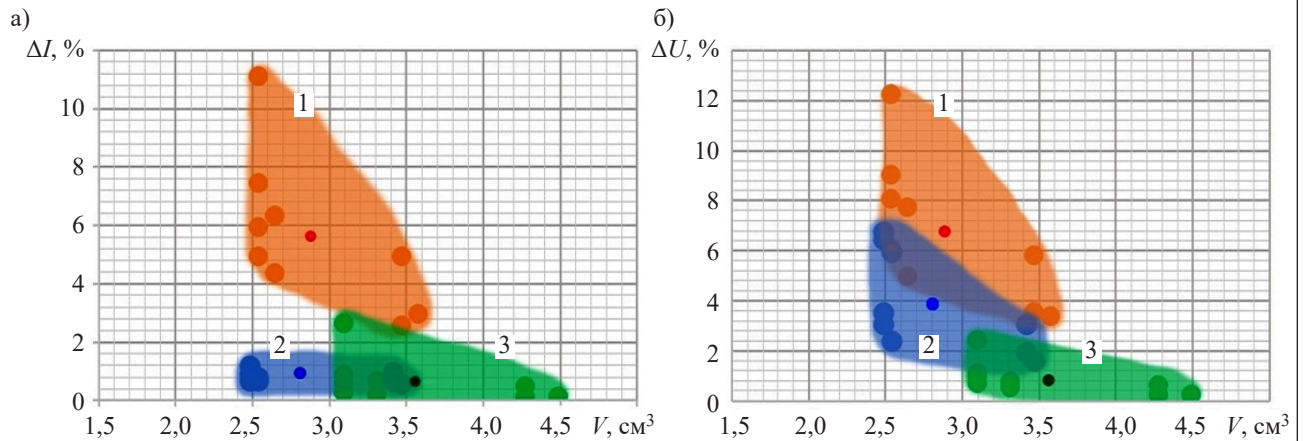


Рис. 13. Залежності амплітуди пульсацій вихідного струму від об'єму конструкції однофазного (1) та двофазного (2) імпульсних перетворювачів, а також перетворювача з компенсаційною фазою (3), отримані для різних значень коефіцієнта заповнення імпульсів управління D та вихідної напруги U :

a — $D = 53\%$, $U = 5\text{ В}$; b — $D = 33\%$, $U = 3\text{ В}$

однакової вихідної потужності, виконаних за різними схемами, від об'єму конструкції для різних значень коефіцієнта заповнення імпульсів управління та вихідної напруги перетворювачів.

Аналіз отриманих залежностей показав, що для коефіцієнта заповнення імпульсів 53% амплітуда пульсацій перетворювача з додатковою фазою менша від 4 до 20 разів, ніж класичного однофазного, та в середньому на 35%, ніж двофазного (рис. 13, а). Для коефіцієнта заповнення імпульсів 33% середнє зменшення складає 4,5 раза (рис. 13, б). При цьому об'єм перетворювача з компенсаційною фазою виявився всього на 25% більшим в порівнянні з класичними однофазним і двофазним.

Висновки

Таким чином, отримані результати досліджень дозволяють сформулювати рекомендації щодо обрання типу імпульсного перетворювача у кожному конкретному випадку з точки зору отримання бажаних пульсацій вихідного струму. Отже, у разі порівнянню об'єму конструкції й вихідної потужності перетворювача класична схема однофазного перетворювача має більші пульсації, ніж інші схеми, тому її доцільно застосовувати лише в малопотужних та невимогливих до пульсацій вихідного струму або об'єму конструкції рішеннях. Двофазний перетворювач, який є окремим випадком багатofазного перетворювача, доцільно використовувати для потужних навантажень, що споживають великий струм та потребують невеликих пульсацій із фіксованим коефіцієнтом заповнення імпульсів управління, тобто без можливості зміни вихідної напруги в широкому діапазоні. В разі використання більшої кількості фаз функція регулювання вихідної напруги і низькі пульсації вихідного струму можуть бути реалізовані, але ціною суттєвого ускладнення системи управління. Найнижчі показники пульсацій

вихідного струму в широкому діапазоні зміни вихідної напруги дозволяє отримати перетворювач з компенсуючою фазою. Об'єм конструкції цього перетворювача можна зменшити, якщо використати фільтр менших габаритних розмірів. Необхідно зазначити й простоту його системи управління, а також те, що у разі необхідності отримання великого струму існує можливість паралельного з'єднання кількох таких перетворювачів без додаткових елементів. Тому перетворювач з компенсуючою фазою можна рекомендувати для застосування живлення чутливих навантажень, коли вирішальною є вимога низьких пульсацій вихідного струму в широкому діапазоні регулювання.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Cabrera M., Hudson T. Designing a Multi-Phase Buck Converter with Digital Controllers. *Powerelectronicsnews*, 2022. <https://www.powerelectronicsnews.com/designing-a-multi-phase-buck-converter-with-digital-controllers/>
2. Гончаренко Ю.П., Буденний О.В., Морозов В.Г. та ін. *Перетворювальна техніка. Підручник. Ч.2*. Харків, Фоліо, 2000.
3. Курбатов П.А. *Электрические и электронные аппараты*. Юрайт, 2016, 441 с.
4. Миленіна С.А. *Электротехника, электроника и схемотехника*. Юрайт, 2017, 406 с.
5. Lee J. *Basic Calculation of a Buck Converter's Power Stage*. Richtek Technology Corporation, 2015, AN041, 9 p. <https://www.richtek.com/Design%20Support/Technical%20Document/AN041>
6. Wang E. *Current Ripple Factor of a Buck Converter*. Richtek Technology Corporation, 2014, AN010, 5 p. <https://www.richtek.com/Design%20Support/Technical%20Document/AN009>
7. Деревятников В. Многофазные преобразователи. *Электронные компоненты*, 2018, № 2, с. 50–53.
8. Parisi C. *Multiphase Buck Design From Start to Finish (Part 1)*. Texas Instruments Application Report, 2021, SLVA882B, 19 p. <https://www.ti.com/lit/an/slva882b/slva882b.pdf>
9. Бондаренко О.Ф., Сафронов П.С., Голубенко О.П. Дослідження DC/DC-перетворювача з компенсацією пульсацій вихідного струму для електролізера установки з виробництва водню. *Труди XXII МНПК «Сучасні інформаційні та електронні технології (CIET-2021)»*. Україна, м. Одеса, 2021, с. 31–32. <http://www.tkea.com.ua/siet/archive/2021/31-32.pdf>

10. Guilbert D., Sorbera D., Vitale G. A stacked interleaved DC-DC buck converter for proton exchange membrane electrolyzer applications: design and experimental validation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020. pp. 64–79. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.10.238>

11. Guida V., Guilbert D., Vitale G., Douine B. Design and realization of a stacked interleaved DC-DC step-down converter for PEM water electrolysis with improved current control. *Fuel Cells*, 2020, vol. 20, iss. 3, pp. 307–315. <https://doi.org/10.1002/fuce.201900153>

12. Čuk S. *Hybrid Switching Transformer*. <https://www.youtube.com/watch?v=kxKYCZfykCw> (26.10.2022)

13. Čuk S. *Microprocessor Supplies Dual Use: for 1 V, 200 A from 12 V and/or 48 V Input*. Masterclass, UC Irvine, California, 2019. <https://drive.google.com/file/d/1c11VOUFcm-9zDUFJuGDM6Ua8BA9d-uDv/view> (26.10.2022)

Дата надходження рукопису
до редакції 15.11 2022 р.

DOI: 10.15222/TKEA2022.4-6.25
UDC 621.314:621.311.6

O. F. BONDARENKO, O. P. HOLUBENKO,
O. S. YAMA, A. Y. ZINCHENKO

Ukraine, Kyiv, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

E-mail: bondarenkoaf@gmail.com

PULSE CONVERTERS WITH REDUCED OUTPUT CURRENT RIPPLE

When developing pulse converters, in order to ensure a low level of output current ripples, one should seek a compromise between the overall size of the elements and acceptable losses in them, while taking into account the dynamic characteristics of power sources as closed systems with feedback. Using multiphase pulse converters can help solve the said problem, but will not ensure a low level of output current ripples in a wide range of the duty cycle of the control pulses. This study aims to find a pulse converter topology capable of ensuring the reduction of the output current ripples, while maintaining the power and volume of the structure. The paper demonstrates the relevance of the study of pulse converters aimed at obtaining a low-ripple output current for powering sensitive loads and gives an overview of ways to reduce the ripples and the most common topologies of converters. The authors describe the results of the practical application of the developed experimental stand and analyze the obtained dependences of the output current ripples on the volumes of the power sections of the converters of different topologies under the same power and frequency. Recommendations are given for choosing the type of converter in each specific case in terms of reducing ripples.

Keywords: pulse power converter, output current ripple, ripple smoothing, converter topology, phase compensation converter.

REFERENCES

1. Cabrera M., Hudson T. Designing a Multi-Phase Buck Converter with Digital Controllers. *Powerelectronicsnews*, 2022. <https://www.powerelectronicsnews.com/designing-a-multi-phase-buck-converter-with-digital-controllers/>

2. Honcharenko Yu.P., Budenny O.V., Morozov V.H. et al. *Peretvoryval'na tekhnika. Pidruchnyk. Ch. 2* [Transforming technique. Textbook. Part 2]. Kharkiv, Folio, 2000, 360 p. (Ukr)

3. Kurbatov P.A. *Elektricheskiye i elektronnyye apparaty* [Electrical and electronic devices]. Yurait, 2016, 441 p. (Rus)

4. Milenina S.A. *Elektrotekhnika, elektronika i skhemotekhnika* [Electrical engineering, electronics and circuit engineering]. Yurait, 2017, 406 p. (Rus)

5. John Lee. *Basic Calculation of a Buck Converter's Power Stage*. Richtek Technology Corporation, 2015, AN041, 9 p. <https://www.richtek.com/Design%20Support/Technical%20Document/AN041>

6. Edwin Wang. *Current Ripple Factor of a Buck Converter*. Richtek Technology Corporation, 2014, AN010, 5 p. <https://www.richtek.com/Design%20Support/Technical%20Document/AN009>

7. Derevyatnikov V. [Multiphase converters]. *Elektronnyye Komponenty*, 2018, no. 2, pp. 50–53. (Rus)

8. Carmen Parisi. *Multiphase Buck Design From Start to Finish (Part 1)*. Texas Instruments Application Report, 2021, SLVA882B, 19 p. <https://www.ti.com/lit/an/slva882b/slva882b.pdf>

9. Bondarenko O. F., Safronov P. S., Holubenko O. P. Study of DC/DC-converter with output current compensation for electrolyzer of hydrogen production unit. Proc. of XXII Int. Sc.-Pract. Conf. "Modern Information and Electronic Technologies", Ukraine, Odesa, 2021, pp. 31–32. <http://www.tkea.com.ua/siet/archive/2021/31-32.pdf> (Ukr)

10. Guilbert D., Sorbera D., Vitale G. A stacked interleaved DC-DC buck converter for proton exchange membrane electrolyzer applications: design and experimental validation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020. pp. 64–79. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.10.238>

11. Guida V., Guilbert D., Vitale G., Douine B. Design and realization of a stacked interleaved DC-DC step-down converter for PEM water electrolysis with improved current control. *Fuel Cells*, 2020, vol. 20, iss. 3, pp. 307–315. <https://doi.org/10.1002/fuce.201900153>

12. Čuk S. *Hybrid Switching Transformer*. <https://www.youtube.com/watch?v=kxKYCZfykCw> (26.10.2022)

13. Čuk S. *Microprocessor Supplies Dual Use: for 1 V, 200 A from 12 V and/or 48 V Input*. Masterclass, UC Irvine, California, 2019. <https://drive.google.com/file/d/1c11VOUFcm-9zDUFJuGDM6Ua8BA9d-uDv/view> (26.10.2022)

Опис статті для цитування:

Бондаренко О. Ф., Голубенко О. П., Яма О. С., Зінченко А. Ю. Імпульсні перетворювачі зі зниженою пульсацією вихідного струму. Технологія та конструювання в електронній апаратурі, 2022, № 4–6, с. 25–31. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2022.4-6.25>

Cite the article as:

Bondarenko O. F., Holubenko O. P., Yama O. S., Zinchenko A. Y. Pulse converters with reduced output current ripple. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature*, 2022, no. 4–6, pp. 25–31. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2022.4-6.25>

Д. т. н. А. А. ЄФІМЕНКО, к. т. н. О. В. ЛОГВІНОВ, Л. І. ПРИСЯЖНЮК

Україна, Національний університет «Одеська політехніка»

E-mail: bogachevalyuba523@gmail.com

ВИКОРИСТАННЯ ПОВНОГО ФАКТОРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ СОНЯЧНИМИ БАТАРЕЯМИ

Наведено результати дослідження умов використання повного факторного експерименту для створення математичних моделей — рівнянь регресії з метою моделювання роботи сонячних батарей за умови скорочення обсягу необхідних для цього натурних випробувань. Показано, що точність моделювання суттєво залежить від діапазону значень факторів.

Ключові слова: сонячна батарея, моделювання, повний факторний експеримент, рівняння регресії.

Ефективне генерування електричної енергії сонячними батареями (СБ) за різного їх положення відносно Сонця є одним із головних завдань при проектуванні багатобатарейних електростанцій (кластерів). Під ефективністю в цьому випадку слід розуміти досягнення оптимальної потужності сонячних батарей, що дозволило б отримувати в часі (протягом світлового дня, сезону, року) максимум електричної енергії.

Питанню підвищення ефективності роботи сонячних електростанцій приділяється велика увага в різноманітних науково-технічних дослідженнях. Велика кількість досліджень, наприклад [1—5], присвячена визначенню оптимального кута нахилу та азимуту для встановлення сонячних батарей. Так, в роботі [1] на основі досліджень, що продемонстрували значно більший вплив азимута Сонця, ніж кута підйому над горизонтом, у зв'язку з великими енергозатратами на переміщення сонячної батареї рекомендується забезпечити її автоматичний рух навколо вертикальної осі. При цьому передбачається також можливість зміни положення по горизонтальній осі 4—6 разів на рік. У [4] наведено результати досліджень експлуатації фотоелектричних панелей з різною орієнтацією для розв'язання проблем, пов'язаних зі зміною добового споживання електроенергії, з одного боку, і забезпечення властивостей і параметрів фотоелектричної потужності, з іншого. Автори [5] продемонстрували, що одним із найефективніших способів підвищення ефективності функціонування сонячних батарей є їх орієнтація за азимутом.

В роботі [6] досліджувалось функціонування в польових умовах двох сонячних батарей: одна була стаціонарно орієнтована на південь під кутом 55° до поверхні Землі; друга — постійно орієнтована на Сонце. Порівняння отриманої від

них електроенергії дозволило зробити такі висновки: наявність автоматичної орієнтації СБ в напрямку Сонця на відповідній території може суттєво підвищити вироблення електроенергії в весняний, літній та осінній періоди (до 40% в умовах проведення експерименту на півдні Томської області, РФ); зміна орієнтації батареї відносно сонячного світлового потоку призводить до збільшення часу, протягом якого її потужність є максимально можливою, при цьому коливання самої величини потужності є незначним.

Авторами [7—11] розглядаються питання підвищення ефективності сонячних батарей різними способами. Наприклад, у [10] наведено прогнозування ефективності спроектованої сонячної фотоелектричної системи, що містить аналіз впливу орієнтації панелей, характеристик її складових частин, докладне врахування втрат, параметри керування енергоспоживанням з використанням комп'ютерної програми.

Одним із напрямків удосконалення сонячних панелей є використання нових конструктивних рішень і матеріалів. Так, в [11] проведено експериментальне дослідження електричних характеристик нових фотоелектричних панелей на основі загартованого скла.

Аналіз показує, що для ефективного використання сонячних батарей пріоритетним є їх оптимальна орієнтація відносно Сонця [12]. В ідеальному випадку необхідно створювати системи стеження, які дозволяли б оперативно змінювати орієнтацію СБ в напрямку Сонця [7] для їх перпендикулярного розташування до сонячного випромінювання. Використання механізмів стеження за положенням Сонця на небі (сонячних трекерів) протягом дня є досить поширеним способом розв'язання проблеми підвищення ефективності сонячних панелей [13, 14]. Однак

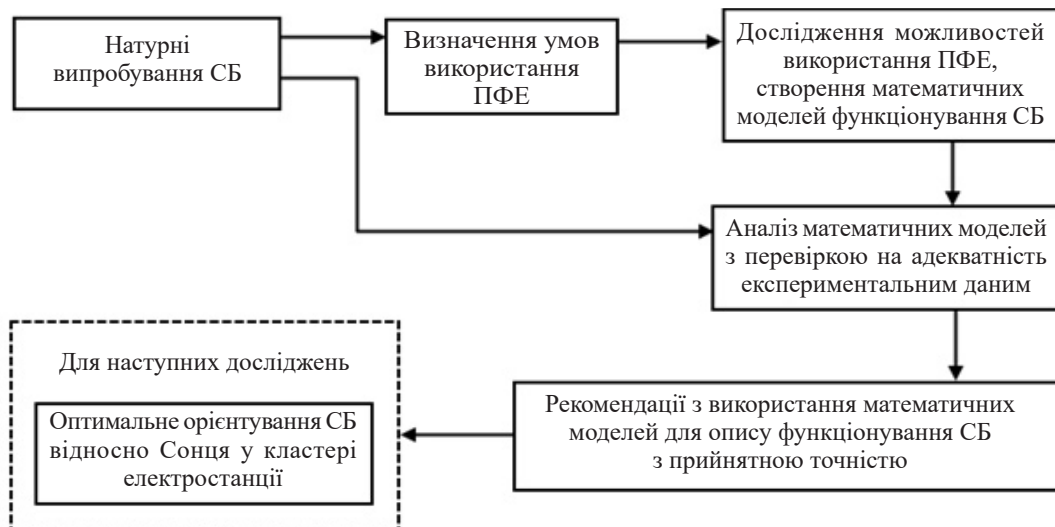


Рис. 1. Послідовність проведення досліджень

такі системи є достатньо складними з точки зору як механіки, так і електроніки, але найголовніше — для їх функціонування необхідні додаткові затрати електроенергії, що, природно, знижує їхню ефективність. Але це не означає, що питання орієнтації СБ не варті уваги і відповідної реалізації. Одним з напрямків підвищення ефективності роботи СБ може бути фіксоване розташування сонячних батарей різної орієнтації відносно Сонця у кластері сонячної електростанції.

Для створення таких електростанцій, а також перевірки ефективності інших рішень необхідні дані (моделі), які дозволяли б з достатньою точністю визначити оптимальне орієнтування окремих СБ для різних умов — залежно від місцеположення за широтою, пори року тощо.

Велика різноманітність умов експлуатації сонячних батарей, а значить і значна кількість вхідних факторів та обмежень, обумовлює необхідність великої кількості математичних моделей, які можуть з прийнятною точністю описувати залежність від них вихідної потужності СБ. Для цього, відповідно, потрібен і великий обсяг натурних випробувань. Щоб спростити створення математичних моделей і в першу чергу зменшити обсяг випробувань, пропонується використовувати повний факторний експеримент (ПФЕ) [15].

Метою цієї роботи є дослідження можливостей використання повного факторного експерименту для створення математичних моделей роботи сонячних батарей, які б в умовах мінімізації обсягу випробувань з достатньою точністю описували їх функціонування і дозволяли оптимізувати їх розташування відносно Сонця.

Дослідження умов використання повного факторного експерименту для створення математичних мо-

делей проводились у послідовності, представленій на **рис. 1**.

Умови використання повного факторного експерименту

Як модель, що описує поведінку сонячних батарей в умовах експлуатації, використаємо представлену на **рис. 2** схему.

Розглянемо вимоги та умови використання повного факторного експерименту.

Вхідні фактори мають бути:

- сумісними, тобто їх можна використовувати у будь-якій комбінації;
- значною мірою незалежними, тобто між ними не має бути значного кореляційного зв'язку;
- кількісними, мати фізичну природу, придатними до вимірювання.

Планування експерименту передбачає вибір для кожного фактору верхнього (найбільше значення) та нижнього (найменше значення) рівнів, які визначають інтервал їх змінювання в експерименті [15]. Ці рівні призначаються дослідником.

Вибір інтервалу варіювання факторів, який кількісно відображається як різниця між верхнім (чи

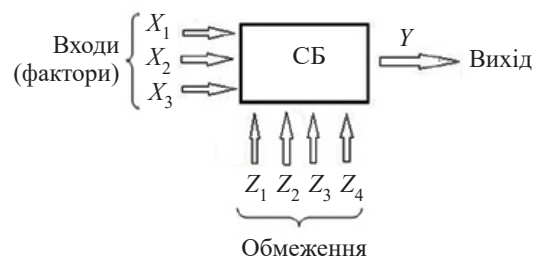


Рис. 2. Модель поведінки сонячних батарей в умовах експлуатації

нижнім) і основним рівнями, має супроводжуватися такими обмеженнями:

обмеження знизу — інтервал зміни має бути більше похибки виміру рівнів фактору;

обмеження зверху — рівні фактору мають лежати в межах області його визначення, тобто тих значень, які потім будуть використовуватись в реальних умовах експлуатації СБ.

Основний рівень — це значення фактору, яке відповідає середині між верхнім та нижнім рівнями.

В нашому випадку вхідними факторами будемо вважати такі: X_1 — кут нахилу СБ до горизонту (кут місця); X_2 — азимут розташування СБ (вибрано кут відносно напрямку на південь); X_3 — певний час світлового дня, що характеризується положенням Сонця як за азимутом, так і за кутом місця, і яке залежить від широти розташування СБ та пори року. З безлічі обмежувальних факторів виділимо Z_1 — ступінь хмарності; Z_2 — ступінь забрудненості атмосфери; Z_3 — ступінь забрудненості поверхні СБ; Z_4 — тип СБ.

Вихідний параметр Y , тобто параметр оптимізації, має відповідати таким необхідним вимогам [15]:

— ефективність (найкращим чином забезпечується досягнення оптимального положення СБ);

— універсальність (забезпечується можливість оцінювання поведінки необмеженої кількості СБ, у тому числі різних типів);

— статистична однозначність (вбраному набору факторів X_1, X_2, X_3 відповідає тільки одне значення параметра Y з точністю, яка визначається лише похибкою експерименту);

— має фізичний зміст;

— виражається кількісно одним числом, яке легко розраховується;

— існує при всіх можливих робочих станах СБ.

В нашому випадку вихідним параметром є потужність, якої досягає СБ при зазначених вхідних та обмежувальних факторах, і всі ці вимоги тою чи іншою мірою виконуються. При цьому, зважаючи на розв'язувану задачу, найкращим чином задовольняються вимоги універсальності та ефективності, а також умова щодо легкості розрахунку (за значеннями напруги та струму, що доступно вимірюються). Крім того, оскільки потужність СБ є техніко-економічним параметром, це дозволяє одночасно розглядати питання оптимізації як технічного, так і економічного характеру.

Дуже важливим для дослідження СБ є вибір математичної моделі для планування експерименту. Керуючись рекомендаціями [15], будемо використовувати поліноміальну модель. При цьому існує альтернатива вибору степені полінома для досягнення необхідної точності при мінімальній кількості коефіцієнтів рівняння, тобто вибору найбільш точної

та простої моделі. Надаючи перевагу точності, прийmemo таку математичну модель:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{123}X_1X_2X_3. \quad (1)$$

Проведення експеримента та аналіз отриманих результатів

Для всебічного дослідження можливостей використання ПФЕ натурні випробування проводилися з такими значеннями факторів:

— $X_1 = 15, 30, 45, 60, 75, 90^\circ$ (для зручності сприйняття надалі позначатимемо його α);

— $X_2 = 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90^\circ$ (позначимо β);

— $X_3 = 7.00; 7.45; 8.30; 9.00; 9.30; 10.30; 12.30$ год (позначимо t).

Дослідження проводилися 09.07.2021 р. в умовах повністю безхмарного неба протягом всього часу експерименту на березі Чорного моря в м. Одеса (Україна). Використовувалась сонячна батарея АВ320-60МНС з максимальною потужністю 320 Вт.

В кожній точці, що відповідає певному значенню факторів X_1, X_2, X_3 , вимірювалися напруга холостого ходу U_{xx} та струм короткого замикання $I_{кз}$. Для зручності подальшого використання ці параметри були приведені до одного параметру потужності [6]

$$P = 0,72U_{xx}I_{кз}. \quad (2)$$

План проведення експерименту представлено в **табл. 1**. Для отримання більшої точності моделі були використані складові, що враховують ефект взаємодії факторів: $X_1X_2; X_1X_3; X_2X_3; X_1X_2X_3$. Для зручності подальших розрахунків також введено фіктивний фактор X_0 , який завжди знаходиться на верхньому рівні («+») і не змінює рівняння (1).

Таблиця 1

План проведення експерименту

i	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	Y_i
1	+	-	-	-	+	+	+	-	50,6
2	+	+	-	-	-	-	+	+	12,8
3	+	-	+	-	-	+	-	+	59,1
4	+	+	+	-	+	-	-	-	129,7
5	+	-	-	+	+	-	-	+	250,9
6	+	+	-	+	-	+	-	-	116,2
7	+	-	+	+	-	-	+	-	244,8
8	+	+	+	+	+	+	+	+	99,4

Значення Y_i були розраховані за формулою (2) з використанням значень рівнів факторів (**табл. 2**), ці величини представляють собою потужність у ватах.

Таблиця 2

Значення рівнів факторів

Фактор	Рівень			Інтервал зміни
	верхній	нижній	основний	
$X_1, ^\circ$	90	15	52,5	37,5
$X_2, ^\circ$	90	0	45	45
$X_3, \text{год}$	12,5	7,0	9,75	2,75

Для визначення коефіцієнтів b_i в моделі (1) використовуємо залежність [15]

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z) Y_i, \quad (3)$$

де N — число дослідів;

Y_i — значення параметра для всіх можливих сполучень рівнів факторів X_1, X_2, X_3 (верхнього (+) чи нижнього (-)).

У цій формулі (z) вказує на необхідність враховувати знаки факторів («+» чи «-») для всіх доданків кожної із сум N . Так, при розрахунку b_0 всі складові суми мають знаки стовпця X_0 ; при розрахунку b_1 — знаки стовпця X_1 , і так далі. Наприклад:

$$b_0 = \frac{1}{8} (50,6 + 12,8 + 59,1 + 129,7 + 250,9 + 116,2 + 244,8 + 99,4) = 120,4;$$

$$b_1 = \frac{1}{8} (-50,6 + 12,8 - 59,1 + 129,7 - 250,9 + 116,2 - 244,8 + 99,4) = -30,9.$$

Аналогічно отримаємо значення інших коефіцієнтів:

$$b_2 = 12,8; b_3 = 57,4; b_{12} = 12,2;$$

$$b_{13} = -39,1; b_{23} = -18,5;$$

$$b_{123} = -14,9.$$

В результаті використання простої нелінійної поліноміальної моделі (1) та розрахунку коефіцієнтів отримуємо нелінійне рівняння регресії

$$Y_{н1} = 120,4 - 30,9X_1 + 12,8X_2 + 57,4X_3 + 12,2X_{12} - 39,1X_{13} - 18,5X_{23} - 14,9X_{123}. \quad (4)$$

Тут нелінійна взаємодія двох та трьох факторів позначена простіше, ніж в моделі (1), наприклад замість X_1X_2 використано X_{12} .

Модель перевірялась на адекватність через оцінку відхилення δ розрахункових значень потужності $P_{розр}$, генерованої сонячною батареєю, від експериментальних значень $P_{експ}$:

$$\delta = |P_{експ} - P_{розр}| / P_{експ}. \quad (5)$$

Експериментальні значення потужності $P_{експ}$, як вказувалося раніше, були визначені в результаті натурних випробувань при вказаних значеннях факторів. Обчислення $P_{розр}$ проводилося при тих самих значеннях факторів з використанням рівняння (4).

Для отримання дійсних значень потужності у вагах в рівнянні (4) фактори X_1, X_2, X_3 замінюються на кодові значення, які розраховуються за формулою [15]

$$x_j = (\tilde{x}_j - x_{j0}) / I_j, \quad (6)$$

де \tilde{x}_j — натуральне значення фактору;

x_{j0} — натуральне значення основного рівня;

I_j — інтервал варіювання.

Розраховані кодові значення факторів наведено в **табл. 3**.

Розрахуємо для прикладу значення параметра при $X_1 = 15^\circ, X_2 = 0^\circ, X_3 = 7.00$ год:

$$Y_{н1} = 120,4 - 30,9 \cdot (-1,0) + 12,8 \cdot (-1,0) + 57,4 \cdot 1,0 + 12,2 \cdot [(-1,0) \cdot (-1,0)] - 39,1 \cdot [(-1,0) \cdot (-1,0)] - 18,5 \cdot [(-1,0) \cdot (-1,0)] - 14,9 \cdot [(-1,0) \cdot (-1,0) \cdot (-1,0)] = 50,6.$$

Таблиця 3

Кодові значення факторів

Фактор X_1							
Натуральне значення, $^\circ$	15	30	45	60	75	90	—
Кодове значення	-1,0	-0,6	-0,2	0,2	0,6	1,0	—
Фактор X_2							
Натуральне значення, $^\circ$	0	15	30	45	60	75	90
Кодове значення	-1,0	-0,67	-0,33	0	0,33	0,67	1,0
Фактор X_3							
Натуральне значення, год	7.00	7.45	8.30	9.00	9.30	10.30	12.30
Кодове значення	-1,0	-0,73	-0,45	-0,27	-0,09	0,27	1,0

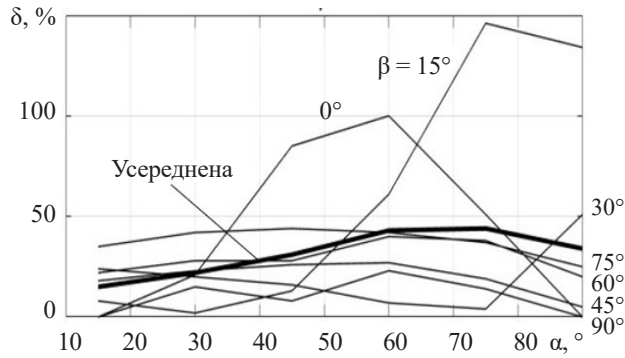


Рис. 3. Графіки залежності відхилення δ від кута місця α для різних положень СБ за азимутом (β), отримані за моделлю регресії (4)

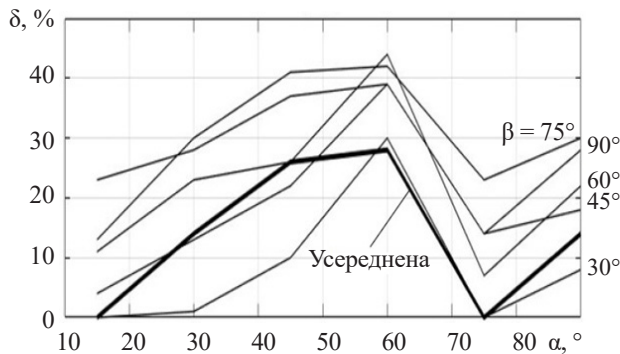


Рис. 4. Графіки залежності відхилення δ від кута місця α для різних положень СБ за азимутом (β), отримані за уточненою моделлю регресії (8)

Результати перевірки моделі на адекватність представлено на **рис. 3** у вигляді залежностей відхилення δ від кута місця для різних положень СБ за азимутом. На рисунку окремо наведено усереднену залежність, що може розглядатись як інтегральне оцінювання.

Ще більш інтегральною оцінкою може бути середнє відхилення для всіх значень α

$$\delta_{\text{інт}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i \cdot 100\%, \quad (7)$$

де n — кількість значень α .

В нашому випадку отримали $\delta_{\text{інт}} = 31,5\%$.

Аналіз залежностей на **рис. 3** показує значні викиди даних для значень азимуту $\beta = 0^\circ$ та $\beta = 15^\circ$. Щоб підвищити точність моделі, ці значення β були виключені, і було отримано нове рівняння регресії

$$Y_{\text{н2}} = 128,3 - 27,7X_1 + 5X_2 + 54,8X_3 + 10X_{12} - 37,3X_{13} - 16X_{23} - 16,7X_{123} \quad (8)$$

та проведено аналогічну перевірку моделі на адекватність, результати якої наведено на **рис. 4**. В цьому випадку було отримано $\delta_{\text{інт}} = 20\%$.

З метою отримання рівнянь регресії, які б більш точно описували експериментальні дані, було зменшено кількість факторів з трьох до двох: був виключений фактор X_3 — час світлового дня. Звичайно, це призводить до збільшення кількості рівнянь регресії

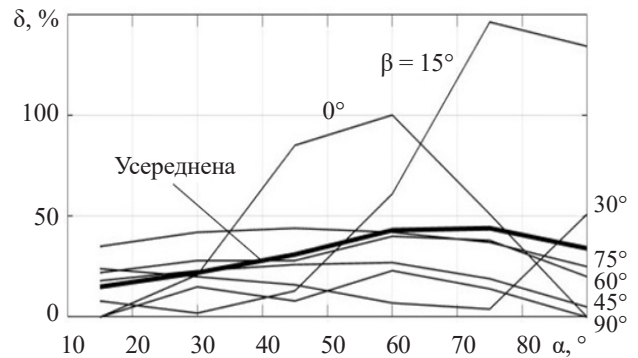


Рис. 5. Графіки залежності відхилення δ від кута місця α для різних положень СБ за азимутом (β) для часу 7.00 год, отримані за моделлю регресії (9)

у разі необхідності визначення поведінки СБ протягом дня, але заради підвищення точності ця дія може бути виправданою.

Отримана в такому випадку модель регресії для часу 7.00 год виглядає так:

$$Y_{\text{н3}} = 63,1 + 8,2X_1 + 31,4X_2 + 27,1X_{12}. \quad (9)$$

Результати перевірки її на адекватність наведено на **рис. 5**. В цьому випадку було отримано $\delta_{\text{інт}} = 31\%$. Аналіз цих залежностей показує, що вони практично повторюють графіки на **рис. 3**. Крім того, дуже близькими є і значення $\delta_{\text{інт}}$.

Висновки

Проведене дослідження продемонструвало, що у зв'язку зі значними похибками використання повного факторного експерименту в діапазоні значень факторів, що наближаються до всіх можливих, є доцільним лише для попереднього моделювання роботи сонячної батареї та приблизної оцінки результатів моделювання. Звуження діапазону значень факторів значно зменшує величину відхилень результатів моделювання від експериментальних даних, що в багатьох випадках може бути прийнятним, особливо якщо використовувати результати моделювання для конкретних умов використання сонячної батареї.

Зменшення кількості факторів, а саме виключення фактору часу, дозволяє значно спростити рівняння регресії, але не дає бажаних результатів щодо зменшення відхилень розрахункових параметрів від експериментальних.

Поясненням незадовільних результатів щодо точності моделей регресії при використанні повного факторного експерименту може бути існування складних залежностей параметра від факторів, що важко узагальнити в широкому діапазоні їх значень.

Очевидно, що для створення математичних моделей, які б з більшою точністю наближалися до дійсних, отримуваних експериментально даних, потрібно використовувати залежності для конкретизованих значень факторів.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Слипченко Н.И., Письменецкий В.А., Фролов А.В. и др. Экспериментальные исследования характеристик солнечной панели KV 150/24(12) в зимних условиях. *Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»*, Харьков, 2011, №24, с. 86–92.
2. Kamanga B. et al. Optimum tilt angle for photovoltaic solar panels in Zomba district, Malawi. *Hindawi Publishing corporation journal of solar energy*, 2014, article ID 132950: <https://dx.doi.org/10.1155/2014/132950>.
3. Le Roux W. G. Optimum tilt and azimuth angles for fixed solar collectors in South Africa using measured data. *Renewable Energy*, 2016, vol. 96, p. 603–612. <https://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.05.003>.
4. Lataa H. et al. The influence of photovoltaic panels on the amount of electric energy production for consumers, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2019, 214012032.
5. Степанов В.М., Горелов Ю. И., Пахомов С. Н. Анализ способов повышения эффективности функционирования солнечных батарей. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2018, вып.12, с. 17–23.
6. Саврасов Ф.В., Ковалев И.К. Исследования эффективности работы солнечной батареи в полевых условиях. *Известия Томского политехнического университета*, 2012, т. 321, №4, с. 165–168.
7. Нго Сян Кыонг. Повышение эффективности солнечных батарей с помощью следящей системы. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2013, вып. 1, с. 318–321.
8. Гульков В. Н., Колесниченко И. Д., Коротков К. Е. Исследование влияния нагрева солнечных модулей на эффектив-

ность преобразования излучения. *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*, 2019, №1, с. 10–16.

9. Антонова Е. А., Горячев С. В. Повышение эффективности солнечных батарей нового поколения за счет использования новых материалов и их гибридизации. *Вестник Северо-Кавказского федерального университета*, 2019, №1 (70), с. 7–11.
10. Deshmukh A. N., Chandrakar V. K. Design and performance analysis of grid-connected solar photovoltaic system with performance forecasting approach (PFA). *J. Inst. Eng. India Ser. B*, 2022. <https://doi.org/10.1007/s40031-022-00779-7>
11. Mardy Huot et al. Performance investigation of tempered glass-based monocrystalline and polycrystalline solar photovoltaic panels. *Hindawi International Journal of Photoenergy*, vol. 2021, article ID 2335805. <https://doi.org/10.1155/2021/2335805>.
12. Єфіменко А. А., Логвінов О.В., Присяжнюк Л. І. Використання повного факторного експерименту для моделювання роботи сонячних батарей. *Труди 23-ї МНПК «CIET-2022»*. Україна, Одеса, 2022, с. 22–24.
13. Abel D., Reif E., Littman M. Improving solar panel efficiency using reinforcement learning. *Proceedings of the Multi-disciplinary Conference on Reinforcement Learning and Decision Making (RDLM)*, Ann Arbor (MI), 2017.
14. Nikitenko G.V. et al. Improving the energy efficiency of using solar panels. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2020 613012092.
15. Яншин А.А. *Теоретические основы конструирования, технологии и надежности ЭВА*, Москва, Радио и связь, 1983.

Дата надходження рукопису
до редакції 01.08 2022 р.

DOI: 10.15222/TKEA2022.4-6.32
UDC 621.311.24

A. A. YEFIMENKO, O. V. LOGVINOV, L. I. PRISYAZHNIUK
Ukraine, Odessa, Odessa Polytechnic National University
E-mail: bogachevalyuba523@gmail.com

USING FULL FACTORIAL EXPERIMENT TO SIMULATE ELECTRICITY GENERATION BY SOLAR BATTERIES

The amount of electrical energy generated by solar batteries (SB) depends significantly on their position relative to the Sun. The presence of dependencies of the initial parameter of the SB on the factors determining this position allows finding the optimal orientation of fixed or partially fixed SBs.

This paper presents the results of the study on the conditions of using a full factorial experiment for creating mathematical models — regression equations — to simulate the operation of solar batteries under the condition of reducing the amount of field tests necessary for this. It is shown that the simulation accuracy significantly depends on the range of factor values.

The conducted study demonstrates that the use of a full factorial experiment in the range of factor values approaching all possible is appropriate for preliminary simulation of the solar battery operation and an approximate assessment of the simulation results in connection with significant errors. Narrowing the range of factor values significantly reduces the deviations of simulation results from experimental data, which in many cases can be accepted, especially if the simulation results are used for specific operating conditions of the solar cell. In order to create mathematical models that would more accurately approach the actual ones obtained experimentally, it is necessary to use dependencies for concretized values of factors.

Keywords: solar cell, modeling, full factorial experiment, regression equation.

REFERENCES

1. Slipchenko N.Y., Pysmenetskyi V.A., Frolov A.V. et al. [Experimental studies of the characteristics of the solar panel KV 150/24(12) in winter conditions]. *Vestnik Nats. tekhn. universiteta «KHPI»*, Kharkiv, 2011, no. 24, pp. 86–92. (Rus.)
2. Kamanga B. et al. Optimum tilt angle for photovoltaic solar panels in Zomba district, Malawi. *Hindawi Publishing corporation journal of solar energy*, 2014, article ID 132950: <https://dx.doi.org/10.1155/2014/132950>.

3. Le Roux W. G. Optimum tilt and azimuth angles for fixed solar collectors in South Africa using measured data. *Renewable Energy*, 2016, vol. 96, pp. 603–612. <https://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.05.003>.
4. Lataa H. et al. The influence of photovoltaic panels on the amount of electric energy production for consumers, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2019, 214012032.
5. Stepanov V. M., Gorelov Yu. I., Pakhomov S. N. [Analysis of ways to improve the efficiency of the functioning of solar bat-

teries]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki*, 2018, iss. 12, pp. 17–23. (Rus.)

6. Savrasov F. V., Kovalev I. K. [Studies of the efficiency of the solar battery in the field]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2012, vol. 321, no. 4, pp. 165–168. (Rus.)

7. Ngo Hsiang Kyong. Increasing the efficiency of solar batteries with the help of a tracking system. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki*, 2013, vol. 1, pp. 318–321. (Rus.)

8. Gul'kov V. N., Kolesnichenko I. D., Korotkov K. Ye. [Investigation of the effect of heating solar modules on the efficiency of radiation conversion]. *Izvestiya SPbGETU "LETI"*, 2019, no. 1, pp. 10–16. (Rus.)

9. Antonova E. A., Goryachev S. V. [Improving the efficiency of solar batteries of a new generation through the use of new materials and their hybridization]. *Vestnik Severo-Kavkazskogo federal'nogo universiteta*, 2019, no. 1 (70), pp. 7–11. (Rus.)

10. Deshmukh A. N., Chandrakar V. K. Design and performance analysis of grid-connected solar photovoltaic system with performance forecasting approach (PFA). *J. Inst. Eng. India Ser. B*, 2022. <https://doi.org/10.1007/s40031-022-00779-7>

11. Mardy Huot et al. Performance investigation of tempered glass-based monocrystalline and polycrystalline solar photovoltaic panels. *Hindawi International Journal of Photoenergy*, vol. 2021, article ID 2335805. <https://doi.org/10.1155/2021/2335805>.

12. Yefimenko A. A., Logvinov O. V., Prisyazhniuk L. I. [Use of a full factorial experiment for modeling the operation of solar batteries]. *Proceedings of the 23rd International scientific-practical conference "Modern information and electronic technologies"*, Ukraine, Odesa, 2022, p. 22–24. (Ukr)

13. Abel D., Reif E., Littman M. Improving solar panel efficiency using reinforcement learning. *Proceedings of the Multi-disciplinary Conference on Reinforcement Learning and Decision Making (RDLM)*, Ann Arbor (MI), 2017.

14. Nikitenko G.V. et al. Improving the energy efficiency of using solar panels. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020 613012092.

15. Yanshyn A. A. *Teoreticheskiye osnovy konstruirovaniya, tekhnologii i nadezhnosti EVA* [Theoretical foundations of construction, technology and reliability of EVA]. Moscow, Radio i svyaz', 1983. (Rus)

Опис статті для цитування:

Єфіменко А. А., Логвінов О. В., Присяжнюк Л. І. Використання повного факторного експерименту для моделювання генерації електроенергії сонячними батареями. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2022, № 4–6, с. 32–38. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2022.4-6.32>

Cite the article as:

Yefimenko A. A., Logvinov O. V., Prisyazhniuk L. I. Using full factorial experiment to simulate electricity generation by solar batteries. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature*, 2022, no. 4–6, pp. 32–38. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2022.4-6.32>

НОВІ КНИГИ

НОВІ КНИГИ

Василів К. М. Експлуатація електричних станцій.— Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2022.

Систематизовано та викладено базовий матеріал теоретичних засад та практики технологій експлуатації теплових та частково атомних електричних станцій. Описано проблеми нагріву, перевантаження та випробування ізоляції електротехнічного обладнання електростанцій на базі аналізу фізики відповідних процесів. Детально розглянуто питання нагляду, догляду та ремонту турбогенераторів і електричних двигунів власних потреб електростанцій. Проаналізовано питання електричних схем і забезпечення надійності електроживлення власних потреб 6 та 0,4 кВ. Викладено теоретичну концепцію математичного моделювання в практиці експлуатації теплових та атомних електричних станцій.

Для студентів спеціальності “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”.



К. т. н. С. О. БАГАНОВ¹, к. т. н. С. В. ШУТОВ², к. т. н. В. В. ЦИБУЛЕНКО², к. т. н. С. М. ЛЕВИЦЬКИЙ²

Україна, ¹Херсонський національний технічний університет;
м. Київ, ²Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України
E-mail: shutov_sv@isp.kiev.ua

ПРОЦЕСИ КРИСТАЛІЗАЦІЇ ТОНКИХ ПОЛІКРИСТАЛІЧНИХ ШАРІВ СТИБНІТУ ГАЛІЮ ДЛЯ ТЕРМОФОТОВОЛЬТАЇЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ

Встановлено умови кристалізації тонких полікристалічних шарів GaSb, розмір зерен яких достатній для виготовлення структур ефективних термофотовольтаїчних перетворювачів на підкладці з плавленого кварцу, який не має орієнтаційного ефекту. Показано, що форма зерна в процесі зростання мало чутлива до початкового розміру зародка та швидкості охолодження і достатньо чутлива до щільності зародків на поверхні. Вирощено тонкі полікристалічні шари GaSb з задовільною планарністю та однорідністю, середній розмір зерен яких складає до 25 мкм.

Ключові слова: полікристалічний GaSb, тонкі плівки, розмір зерна, кристалізація, термофотовольтаїка.

Стибніт галію завдяки своїм електрофізичним властивостям лишається одним із найперспективніших напівпровідникових матеріалів для виготовлення перетворювачів інфрачервоного випромінювання, зокрема термофотовольтаїчних перетворювачів (ТФВП) [1, 2]. Стимувальним фактором для більш широкого застосування GaSb в цьому напрямку є відносно велика вартість монокристалічного матеріалу, а саме монокристалічної підкладки, яка є пасивною з погляду підвищення коефіцієнта корисної дії перетворювача, але робить значний внесок у його собівартість. Відомо, що прилади на основі p - n -структур полікристалічного GaSb практично не поступаються в ефективності перетворювання аналогічним пристроям, отриманим на монокристалічних підкладках [3 — 5], однак значно дешевші за них. Наразі найбільш широко використовуються полікристалічні підкладки, які отримуються з полікристалів стибніту галію, але це потребує додаткових технологічних операцій і, відповідно, підвищує вартість перетворювача.

Вартість ТФВП можна зменшити, якщо для отримання тонких полікристалічних шарів GaSb використовувати підкладки з аморфних матеріалів, що не мають орієнтаційного ефекту, такі як скло або плавнений кварц. Зараз відповідні дослідження активно проводяться для сонячних елементів на базі кремнію [6, 7]. Перспективність використання плавненого кварцу як підкладки для отримання полікристалічного GaSb в умовах короткочасної мікрогравітації показана у роботі [8]. Нами запропоновано більш простий метод отримання тонких полікристалічних шарів GaSb без використання монокристалічної підкладки в умовах звичайної гравітації, який потребує простого обладнання [9]. Сутність метода полягає у примусовому охолодженні тонкого (декілька мікрометрів) шару стибію у

розплаві галію у вакуумі. Для реалізації цього методу необхідно знати технологічні параметри, що забезпечують кристалізацію зерен достатнього розміру для виготовлення структур ефективних ТФВП.

Метою цієї роботи є встановлення умов кристалізації тонких полікристалічних шарів GaSb із заданими параметрами запропонованим у [9] методом для визначення необхідних технологічних параметрів процесу.

Головними факторами, які необхідно враховувати для визначення технологічних умов кристалізації, є розмір зерен та відсутність у них викликаних розвиненістю границь зерна просторових дефектів, які призводять до збільшення площі дефектних областей між зернами та зменшення ефективної площі зерна.

Моделювання процесу кристалізації

Розглянемо математичну модель, за якою проводилося двовимірне моделювання росту вихідного зародка з метою дослідження впливу технологічних умов кристалізації на форму зерен.

Вважалося, що на один зародок припадає кільцева зона розчину-розплаву радіусом L , звідки відбувається його незалежне зростання. Площа цієї зони πL^2 пов'язана із поверхневою щільністю зародків N_n і дорівнює середній площі зерна S_g :

$$\pi L^2 = 1 / N_n = S_g. \quad (1)$$

Границя цієї зони є лінією симетрії для розподілу концентрації $C(r, t)$.

Процес росту зерна змінює концентрацію стибію у галії, що може бути описано рівнянням дифузії

$$\frac{\partial C(r, t)}{\partial t} = D \Delta C(r, t) + f(r, t) \quad (2)$$

з початковими і граничними умовами

$$\left\{ \begin{array}{l} C(r_0, t) = C_0; \\ \left. \frac{\partial C(r, t)}{\partial r} \right|_{r=L} = 0; \\ C(r, 0) = \phi(r); \\ \frac{\partial r_0}{\partial t} = D \frac{1}{N_s} \frac{\partial C(r_0, t)}{\partial n_0}, \end{array} \right. \quad (3)$$

де r_0 — радіус зерна;

D — коефіцієнт дифузії атомів стибію у галії;

C_0 — концентрація атомів на границі зерна;

$\phi(r)$ — початковий розподіл концентрації;

n_0 — нормаль до границі зерна;

N_s — концентрація атомів у твердій фазі GaSb.

Тут $f(r, t)$ описує появу надлишкових нерівноважних атомів стибію внаслідок охолодження насиченого розчину-розплаву стибію у галії.

Під час охолодження розчину-розплаву потік речовини до зони кристалізації буде відносно невеликим, тому можна припустити, що режим росту є лімітованим дифузією. У цьому випадку концентрація атомів стибію на границі зерна дорівнює рівноважній концентрації C_p ($C_0 = C_p$). Відповідно, у рівняннях (2) та (3) зручно перейти до надлишкової концентрації C_s :

$$C_s(r, t) = C(r, t) - C_p(T). \quad (4)$$

В процесі моделювання вважали, що температура розчину-розплаву визначається виключно тепловідводом від підкладки, а теплота фазового переходу не має значного впливу. За такого припущення температура розчину-розплаву T не залежить від координати, і замість рівнянь (2) і (3) можна отримати

$$\frac{\partial C_s(r, t)}{\partial t} = D \Delta C_s(r, t) - \frac{\partial C_p(T)}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t}; \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C_s(r_0, t) = 0; \\ \left. \frac{\partial C_s(r, t)}{\partial r} \right|_{r=L} = 0; \\ C_s(r, 0) = \psi(r); \\ \frac{\partial r_0}{\partial t} = D \frac{1}{N_s} \frac{\partial C_s(r_0, t)}{\partial n_0}, \end{array} \right. \quad (6)$$

де $\psi(r)$ — початковий розподіл концентрації надлишкових атомів стибію;

$C_p(T)$ — температурна залежність розчинності атомів стибію у розплаві галію.

У зробленому припущенні параметр $\partial T / \partial t$, що являє собою швидкість охолодження розчину-розплаву, буде технологічним параметром установки.

Величина $C_p(T)$ визначається рівнянням [10, с. 142]

$$C_p(T) = A \cdot \exp(-B/T), \quad (7)$$

де для GaSb $A = 3,83 \cdot 10^{25} \text{ см}^{-3}$, $B = 7819,1 \text{ К}$.

Відповідно:

$$\frac{\partial C_p(T)}{\partial T} = \frac{A \cdot B}{T^2} \exp(-B/T) = \frac{1}{m}, \quad (8)$$

де m — нахил лінії ліквідусу.

Товщина епітаксійного шару h буде співвідноситися з висотою розчину-розплаву l таким чином:

$$h = \frac{C_p(T_1) - C_p(T_2)}{N_s} l, \quad (9)$$

де T_1 і T_2 — значення температури початку та кінця кристалізації відповідно.

Оскільки кристалізований епітаксійний шар буде мати певну товщину, то, з одного боку, необхідно проводити тривимірне моделювання. Однак, зважаючи на те, що l має порядок мікрметра, а L — десятка мікрметрів, розподілом концентрації перпендикулярно підкладці можна знехтувати і розглядати двовимірну задачу. При цьому у рівнянні (5) потрібно врахувати різницю значень товщини зерна та розчину-розплаву. Це можна зробити за допомогою корегувального множника l/h :

$$\frac{\partial C_s(r, t)}{\partial t} = D \Delta C_s(r, t) - \frac{l}{h} \frac{\partial C_p(T)}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (10)$$

і з урахуванням (8) і (9) отримаємо

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_s(r, t)}{\partial t} = & D \Delta C_s(r, t) + \\ & + \frac{N_s}{C_p(T_1) - C_p(T_2)} \times \\ & \times \frac{A \cdot B}{T^2} \exp(-B/T) \frac{\partial T}{\partial t}. \end{aligned} \quad (11)$$

При розв'язанні системи рівнянь (6) та (11), яка являє собою задачу Стефана, було зроблено спрощення: зміна у часі величини r_0 проводиться не безперервно, а дискретно, коли зміна r_0 сягає кроку моделювання за простором. Це надало можливість розв'язати стандартну параболічну задачу, час від часу пересуваючи одну з границь.

Для дискретизації рівнянь використовувалась схема Пісмента — Рекфорда [11, с. 49] та прямокутна система координат. Останнє надало можливість автоматично вносити збурення у початкову циліндричну форму зерна і досліджувати подальшу її еволюцію. При моделюванні було прийнято: коефіцієнт дифузії $7,1 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$ [10, с. 23], крок за простором $0,5 \text{ мкм}$, крок за часом $0,1 \text{ мс}$.

Результати моделювання процесу кристалізації та їх обговорення

Моделювання показало, що форма зерна під час його зростання мало чутлива до начального розміру зародка та швидкості охолодження, однак чутлива до щільності зародків на поверхні, тобто до величини L (рис. 1). Отримані результати моделювання можна пояснити так. Для утворення стійкої хвилі збурення поверхні зерна потрібна достатня довжина його периметра, тобто відносно великий радіус. Мала амплітуда хвилі збурення практично не впливає на масові потоки у розчині-розплаві (рис. 2, а).

Якщо амплітуда збурення суттєва, а величина L незначна, зона розчину-розплаву, що забезпечує ріст збурення, має невелику площу та незначне викривлення ліній потоку відносно радіальних ліній (рис. 2, б). Для значної величини L має місце суттєве відхилення потоків від радіальних, що значно зменшує підживлення росту западин (рис. 2, в), отримувані при цьому структури наведено на рис. 1, е, ж.

Таким чином, можна зробити висновок, що немає сенсу зменшувати щільність зародків нижче $(8-14) \cdot 10^8 \text{ м}^{-2}$, що відповідає $L = 20-15 \text{ мкм}$ відповідно.

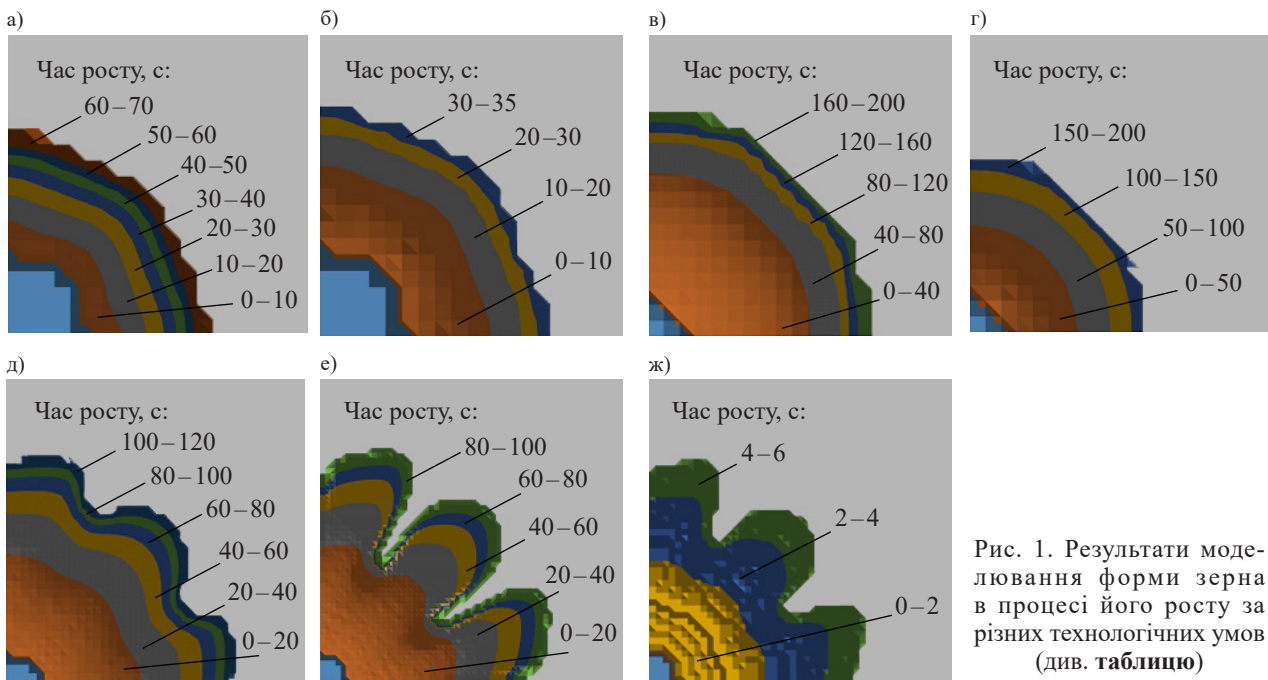


Рис. 1. Результати моделювання форми зерна в процесі його росту за різних технологічних умов (див. таблицю)

Параметри моделювання

Номер рисунка	Швидкість охолодження, °C/с	Початковий радіус зародка, мкм	Радіус зони моделювання, L , мкм	Температура початку росту, °C
1, а	1	3	10	500
1, б	4	3	10	
1, в	1	1,5	10	
1, г	0,33	1,5	10	
1, д	1	3	20	
1, е	1	3	30	
1, ж	1	3	30	600

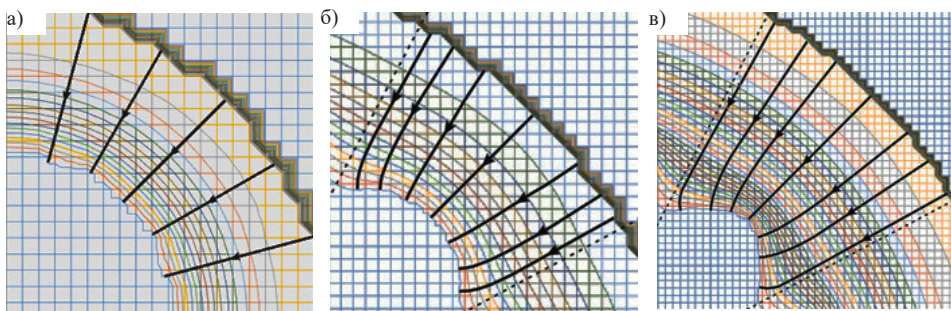


Рис. 2. Лінії потоків за наявності збурення для $L=10 \text{ мкм}$ (а), $L=20 \text{ мкм}$ (б) і $L=30 \text{ мкм}$ (в)

Розрахунок середньої поверхневої щільності зародків та обговорення отриманих результатів

Для оцінки середньої поверхневої щільності зерен виконано оцінювання середньої поверхневої щільності зародків нової фази на поверхні підкладки, які мають тенденцію до зростання.

Кількість зародків визначали із результатів моделювання їх утворення на початковій стадії росту в умовах значного перенасичення. Основним фактором у виникненні зародків на цьому етапі буде поверхнева дифузія атомів. Детальний розгляд атомістичних моделей показав, що зростання зародків — стохастичний процес, кожна стадія якого носить випадковий характер. Тому нами було використано метод Монте-Карло [12, 13], який дозволяє моделювати будь-який процес, на протікання якого впливають випадкові фактори.

Для моделювання процесу були зроблені такі припущення:

- процес поверхневої дифузії відбувається через рідку фазу;
- одиницею часу в системі є час життя атома в адсорбованому стані (час знаходження атома в елементарній комірці);
- визначальними для процесу зародження вважаються атоми стибію, тому що процес відбувається з розплаву галію. Атоми стибію попадають на підкладку дискретно у часі однаковими порціями, де кількість атомів визначається температурою й залежним від неї коефіцієнтом розчинення стибію в галії, а також коефіцієнтом дифузії, при цьому розподіл атомів у площині підкладки є випадковим;
- поверхня підкладки є ізотропною.

Розташування атомів підкладки на поверхні апроксимувалось квадратною сіткою, сторона якої дорівнює постійній ґратки монокристалічного GaSb. Взаємодія враховувалася з першими та з другими найближчими сусідами.

Можливі переходи одиничного атома показані на **рис. 3** (чорне коло — атом, білі — вакансії). Ймовірність переходу приймалася обернено пропорційною відстані переходу, тобто $P_1/P_2 = 1/\sqrt{2}$, ймовірність того, що атом залишиться у своїй комірці, — рівною P_1 .

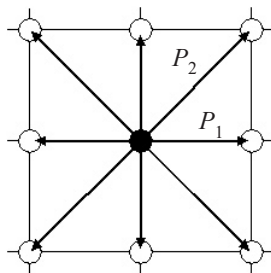


Рис. 3. Можливі напрямки переходів одиничного атома при моделюванні методом Монте-Карло

Ймовірність переходу за можливими напрямками, так само як і ймовірність того, що атом залишиться на своєму місці, задавалася генератором псевдовипадкових чисел, і перехід реалізовувався за максимальним числом.

Якщо на місці можливого переходу знаходився інший атом, то перехід на це місце вважався неможливим, видана генератором ймовірність переходу додавалася до ймовірності, що атом залишиться на своєму місці. Такий підхід відбиває залежність енергії адсорбції кластера від числа атомів у ньому.

Моделювання проводилося на сітці 10000×10000 квадратів. Число атомів на сітці між вкиданнями атомів, що підійшли з розчину-розплаву, залишалося постійним через те, що сітка приймалася у вигляді однічної замкненої поверхні.

У результаті моделювання були отримані графіки розподілу поверхневої концентрації зародків, представлені на **рис. 4**.

Типова картина поля моделювання наведена на **рис. 5**. Для зручності візуалізації комірки 500×500 були об'єднані в одну.

Як витікає з наведених на рис. 4 та рис. 5 результатів, при підвищенні температури поверхнева концентрація зародків збільшується, а розмір зерна зменшується. При зниженні температури маємо протилежний результат. Визначеному вище діапазону поверхневої щільності зерен відповідає температурний інтервал 450—550°C.

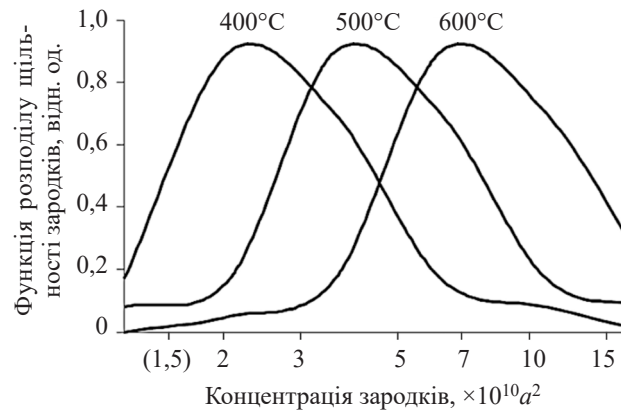


Рис. 4. Розподіл щільності зародків на поверхні підкладки за різної температури процесу (a — стала ґратки)

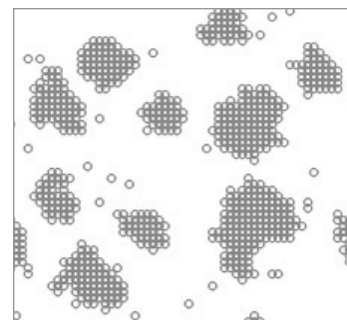


Рис. 5. Типова картина модельованого поля утворення зародків

Проведення експерименту та обговорення отриманих результатів

Для формування тонких шарів GaSb підкладки з плавненого кварцу розміром 20×20 мм товщиною 1 мм обробляли послідовним кип'ятінням в суміші HCl:HNO₃ = 3:1 та деіонізованій воді, а потім висушували в парах ізопропілового спирту. Нанесення на підкладку шарів галію та стибію (розрахункові значення товщини 300 нм та 400 нм відповідно) здійснювалось термічним випаровуванням у вакуумі (остаточний тиск в камері складав 10⁻⁵ Па).

Виготовлена структура розташовувалась у вакуумній камері пристрою для відпалу, що складається з плоского нагрівального елемента з графітової тканини та кварцової пластини (рис. 6). Для гомогенізації розчину-розплаву він витримувався при температурі 520°C протягом 10 хвилин. Після цього проводили його охолодження зі швидкістю 10°C/хв до температури 400°C. Далі вимикали струм через нагрівальний елемент, і подальше зниження температури відбувалось природним охолодженням системи. Температура контролювалась за допомогою двох хромель-алюмелевих термопар на поверхнях підкладки та кварцової пластини. Кварцова пластина використовувалась для контролю теплового потоку крізь підкладку методом допоміжної стінки. Початкові режими потужності нагрівального елемента були одержані при моделюванні процесів теплообміну в системі [14] та корегувалися під час проведення експериментів.

Отримані зразки обробляли концентрованою соляною кислотою HCl для видалення залишків галію та стибію, а потім визначали межі зерен у розчині HNO₃:HCl:H₂O = 1:1:1 [15].

На рис. 7 наведено типову морфологію поверхні та відповідну інтерференційну картину в білому світлі отриманих полікристалічних шарів GaSb. Дослідження виконувалось на інтерференційному мікроскопі МІИ-4. Як видно з рисунка, шари мають хорошу планарність та однорідність. За оцінкою вигину інтерференційних ліній на межі «шар — підкладка» товщина шару складає 300 — 350 нм. Оцінка розміру зерен з їх поверхневої концентрації показала, що

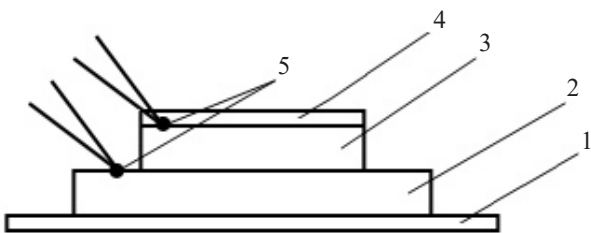


Рис. 6. Схематичне зображення елемента установки відпалу зразків:

1 — нагрівальний елемент; 2 — кварцова пластина; 3 — підкладка; 4 — шар Ga+Sb; 5 — термопар

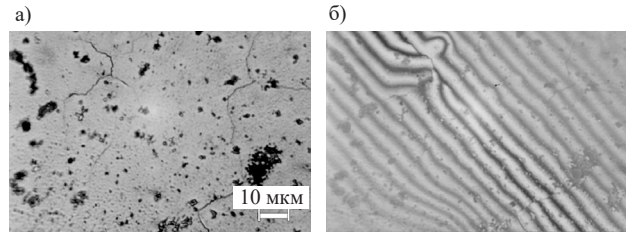


Рис. 7. Типова морфологія поверхні (а) та відповідна інтерференційна картина (б) отриманих полікристалічних шарів GaSb

середня площа зерна складає близько 600 мкм², а середній лінійний розмір — близько 25 мкм. Такі параметри цілком достатні для виготовлення ефективних пліткових термофотovoltaїчних перетворювачів на основі GaSb [16].

Ступінь кристалічності зразків оцінювалась зі спектрів крайової фотолюмінесценції (ФЛ) при 77 К, які реєструвалися за методикою, описаною в [17]. Типовий спектр ФЛ (рис. 8) складається з двох смуг випромінювання: смуга з $h\nu_m \approx 796$ меВ і напівшириною 0,30 меВ та смуга з $h\nu_m \approx 775$ меВ і напівшириною 0,39 меВ. Перша смуга відповідає переходам «зона провідності — валентна зона» [18]. Природа другої може бути пояснена випромінювальними переходами «зона провідності — акцепторний рівень V_{Ga}Ga_{Sb}» [18]. Переважна інтенсивність цієї смуги свідчить про наявність значної кількості точкових дефектів та відхилення від стехіометрії отриманих плівок у порівнянні з об'ємними кристалами GaSb.

Підвищена концентрація точкових дефектів може бути пояснена особливостями умов кристалізації, пов'язаних з дифузією атомів стибію до поверхні розділу розплаву галію з кварцовою підкладкою. Оцінки, виконані на основі результатів моделювання кінетики зародкоутворення в розглянутій системі, показали, що початок процесу зародження найбільш вірогідний саме на цій межі розділу.

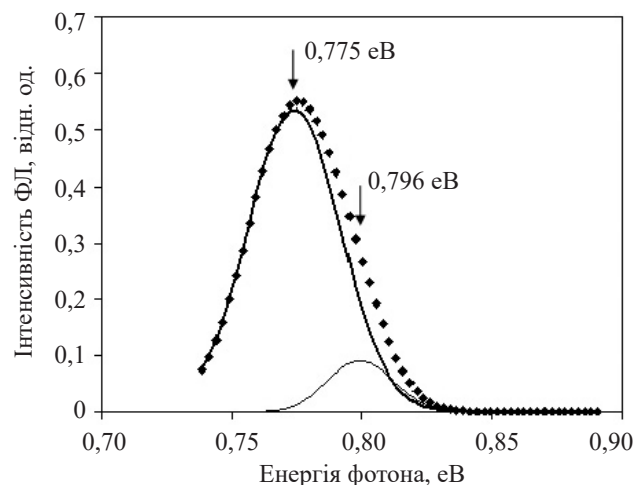


Рис. 8. Типовий спектр крайової фотолюмінесценції полікристалічної плівки GaSb (суцільні лінії — розкладення на гаусіани)

Висновки

Проведене моделювання дозволило встановити умови кристалізації тонких полікристалічних шарів GaSb із заданими параметрами на підкладці з плавненого кварцу, який не має орієнтаційного ефекту, а експеримент підтвердив справедливості запропонованих моделей. Розроблений метод, який відрізняється простотою обладнання та технологічних процесів, дозволив отримати шари з середнім розміром зерна до 25 мкм. Наразі метод потребує оптимізації режимів відпалу для зменшення кількості точкових дефектів. Запропонована технологія може бути використана для виготовлення дешевих перетворювачів інфрачервоного випромінювання, зокрема термофотовольтаїчних перетворювачів.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Marangi F., Lombardo M., Villa A., Scotognella F. (INVITED) New strategies for solar cells beyond the visible spectral range. *Optical Materials: X*, 2021, vol. 11, p. 100083. <https://doi.org/10.1016/j.omx.2021.100083>
2. Burger T., Sempere C., Roy-Layinde B., Lenert A. Review: Present efficiencies and future opportunities in thermophotovoltaics. *Joule*, 2020, vol. 4, iss. 8, p. 1660–1680. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.06.021>
3. Curran A., et al. High hole mobility polycrystalline GaSb thin films. *Crystals*, 2021, vol. 11, p. 1348. <https://doi.org/10.3390/cryst11111348>
4. Shafa M., Pan Y., Kumar R. A., Najjar A. Photoresponse investigation of polycrystalline gallium antimonide (GaSb) thin films. *AIP Advances*, 2020, vol. 10, no. 3, p. 035201. <https://doi.org/10.1063/1.5139056>
5. Gocalinska A., Pescaglioni A., Secco E. et al. Next generation low temperature polycrystalline materials for above IC electronics. High mobility n-and p-type III–V metalorganic vapour phase epitaxy thin films on amorphous substrates. *Journal of Physics: Photonics*, 2020, vol. 2, no. 2, p. 025003. <https://doi.org/10.1088/2515-7647/ab7557>
6. Okil M., Salem M.S., Abdolkader T.M., Shaker A. From crystalline to low-cost silicon-based solar cells: a Review. *Silicon*, 2022, vol. 14, p. 1895–1911. <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01032-4>
7. Soleimani-Amiri S. Low temperature nickel induced crystallization of amorphous silicon nanorods on silicon and glass substrates. *Materials International*, 2020, vol. 2, iss. 2, p. 0164–0169. <https://doi.org/10.33263/Materials22.164169>
8. Miyazaki H., Mamiya M., Okutani T. Solidification of GaSb on a ceramic substrate in short-duration microgravity. *Japanese Journal Applied Physics*, 2003, vol. 42, p. 6265. <https://doi.org/10.1143/JJAP.42.6265>
9. Шутов С.В., Баганов С.О., Саріков А.В. *Спосіб гетероепітаксійного вирощування шарів напівпровідникових багатокомпонентних сполук*. Патент 38628 України, 2009, бюл. №1.
10. Соколов И.А. *Расчеты процессов полупроводниковой технологии*. М.: Металлургия, 1994.
11. Довгий Б.П. *Методи обчислень*. К.: КНУ імені Тараса Шевченка, 2021.
12. Binder K. Applications of Monte Carlo methods to statistical physics. *Reports on Progress in Physics*, 1997, vol. 60, p. 487–559.
13. Zhikharev, P. V., Shwartz, N. L. Monte Carlo simulation of GaSb cluster formation on Si (111) substrate. *2020 21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, 2020, p. 9–13. <https://doi.org/10.1109/EDM49804.2020.9153540>
14. Баганов С., Саріков А., Чернов А., Шутов С. Отримання полікристалічних плівок GaSb кристалізацією з тонкого шару розчину-розплаву. *Вісник Львів. ун-ту. Серія фізична*, 2008, вип. 41, с. 137–142.
15. Nishinaga T., Ge P., Huo C. et al. Melt growth of striation and etch pit free GaSb under microgravity. *Journal of Crystal Growth*, 1997, vol. 174, iss. 1–4, p. 96–100. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(96\)01084-6](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(96)01084-6)
16. Zaixiang Q., Yun S., Weiyu H. et al. Polycrystalline GaSb thin films grown by co-evaporation. *Journal of Semiconductors*, 2009, vol. 30, no. 3, p. 033004-1 — 033004-4. <https://doi.org/10.1088/1674-4926/30/3/033004>
17. Kovalenko V.F., Shutov S.V., Baganov Ye.A., Smykalo M.M. Near band-edge luminescence of semi-insulating undoped gallium arsenide at high levels of excitation. *Journal of Luminescence*, 2009, vol. 129, iss. 9, p. 1029–1031. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2009.04.017>
18. Dutta P.S., Mendes B., Piqueras J. et al. Nature of compensating luminescence centers in Te-diffused and -doped GaSb. *Journal of Applied Physics*, 1996, vol. 80, no. 2, p. 1112–1115.

Дата надходження рукопису
до редакції 04.07 2022 р.

DOI: 10.15222/TKEA2022.4-6.39
UDC 539.23/.785+621.315.592/.362

Ye. O. BAGANOV¹, S. V. SHUTOV², V. V. TSYBULENKO², S. N. LEVYTSKYI²

Ukraine, ¹Kherson National Technical University;
Kyiv, ²V. Ye. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, NAS of Ukraine
E-mail: shutov_sv@isp.kiev.ua

CRYSTALLIZATION PROCESSES OF THIN POLYCRYSTALLINE LAYERS OF GALLIUM STYBNIDE FOR THERMOPHOTOVOLTAIC APPLICATION

The cost of thermophotovoltaic converters can be reduced by making substrates of amorphous materials, which do not have an orienting effect, such as glass or fused quartz, for obtaining thin polycrystalline GaSb layers. The study establishes the conditions for the crystallization of thin polycrystalline GaSb layers with grain size sufficient to produce efficient thermophotovoltaic converter structures on a non-orienting substrate made of fused quartz. The authors carry out a two-dimensional modeling of the initial nucleus growth to study how the crystallization conditions affect the shape of the grains. It is shown that the form

of grain growth is not very sensitive to the initial nucleus size and cooling rate, but is rather sensitive to nucleus density on the surface. The paper provides an estimate of the average surface density of the new phase nuclei, which tend to grow, on substrate surfaces. When the temperature is increased, the surface concentration of nuclei grows, and the grain size decreases. It is determined that the selected range of grain surface density corresponds to the cultivation temperature range of 450–550°C. Thin polycrystalline GaSb layers are grown at 520°C with a cooling rate of 10°C/min to a temperature of 400°C, using a method developed by us, which requires simple equipment and consists in the forced cooling of a thin layer of stibium in a gallium melt in a vacuum. The degree of crystallinity of the samples is estimated from the photoluminescence spectra at 77 K. The spectra show two emission bands: one at 796 meV and another, the predominant one, at 775 meV, which indicates the presence of a significant number of point defects and deviations from the stoichiometry of the obtained films.

The studies performed on an interference microscope show that the obtained layers have good planarity and homogeneity, and the average grain size is up to 25 microns, which confirms the validity of the proposed models. This technology can be used to manufacture inexpensive infrared radiation converters and, in particular, thermophotovoltaic converters.

Keywords: polycrystalline GaSb, thin films, grain size, crystallization, thermophotovoltaics.

REFERENCES

1. Marangi F., Lombardo M., Villa A., Scotognella F. (INVITED) New strategies for solar cells beyond the visible spectral range. *Optical Materials: X*, 2021, vol. 11, pp. 100083. <https://doi.org/10.1016/j.omx.2021.100083>
2. Burger T., Sempere C., Roy-Layinde B., Lenert A. Review: Present efficiencies and future opportunities in thermophotovoltaics. *Joule*, 2020, vol. 4, iss. 8, pp. 1660–1680. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.06.021>
3. Curran A., et al. High hole mobility polycrystalline GaSb thin films. *Crystals*, 2021, vol. 11, pp. 1348. <https://doi.org/10.3390/cryst11111348>
4. Shafa M., Pan Y., Kumar R. A., Najar A. Photoresponse investigation of polycrystalline gallium antimonide (GaSb) thin films. *AIP Advances*, 2020, vol. 10, no. 3, pp. 035201. <https://doi.org/10.1063/1.5139056>
5. Gocalinska A., Pescaglioni A., Secco E. et al. Next generation low temperature polycrystalline materials for above IC electronics. High mobility n- and p-type III–V metalorganic vapour phase epitaxy thin films on amorphous substrates. *Journal of Physics: Photonics*, 2020, vol. 2, no. 2, pp. 025003. <https://doi.org/10.1088/2515-7647/ab7557>
6. Okil M., Salem M.S., Abdolkader T.M., Shaker A. From crystalline to low-cost silicon-based solar cells: a Review. *Silicon*, 2022, vol. 14, pp. 1895–1911. <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01032-4>
7. Soleimani-Amiri S. Low temperature nickel induced crystallization of amorphous silicon nanorods on silicon and glass substrates. *Materials International*, 2020, vol. 2, iss. 2, pp. 0164–0169. <https://doi.org/10.33263/Materials22.164169>
8. Miyazaki H., Mamiya M., Okutani T. Solidification of GaSb on a ceramic substrate in short-duration microgravity. *Japanese Journal Applied Physics*, 2003, vol. 42, pp. 6265. <https://doi.org/10.1143/JJAP.42.6265>
9. Shutov S.V., Baganov Ye.O., Sarikov A.V. [Method for heteroepitaxial growth of layers of semiconductor multicomponent compounds]. *Pat. UA*, no. 38628, 2009, bull. no. 1. (Ukr)
10. Sokolov I.A. *Raschety protsessov poluprovodnikovoy tekhnologii* [Calculations of Semiconductor Technology Processes]. Moscow, Metallurgiya, 1994. (Rus)
11. Dovhyi B.P. *Metody obchyslen'* [Calculation methods]. Kyiv, Taras Shevchenko National University of Kyiv, 2021. (Ukr)
12. Binder K. Applications of Monte Carlo methods to statistical physics. *Reports on Progress in Physics*, 1997, vol. 60, pp. 487–559.
13. Zhikharev, P. V., Shwartz, N. L. Monte Carlo simulation of GaSb cluster formation on Si (111) substrate. *2020 21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, 2020, pp. 9–13. <https://doi.org/10.1109/EDM49804.2020.9153540>
14. Baganov Ye., Sarikov A., Chernov A., Shutov S. Obtaining of the GaSb polycrystalline films by the crystallization from the thin solution-melt layer. *Visnyk of the Lviv University. Series Physics*, 2008, iss. 41, pp. 137–142 (Ukr)
15. Nishinaga T., Ge P., Huo C. et al. Melt growth of striation and etch pit free GaSb under microgravity. *Journal of Crystal Growth*, 1997, vol. 174, iss. 1–4, pp. 96–100. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(96\)01084-6](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(96)01084-6)
16. Zaixiang Q., Yun S., Weiyu H. et al. Polycrystalline GaSb thin films grown by co-evaporation. *Journal of Semiconductors*, 2009, vol. 30, no. 3, pp. 033004-1 — 033004-4. <https://doi.org/10.1088/1674-4926/30/3/033004>
17. Kovalenko V.F., Shutov S.V., Baganov Ye.A., Smykalo M.M. Near band-edge luminescence of semi-insulating undoped gallium arsenide at high levels of excitation. *Journal of Luminescence*, 2009, vol. 129, iss. 9, pp. 1029–1031. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2009.04.017>
18. Dutta P.S., Mendes B., Piqueras J. et al. Nature of compensating luminescence centers in Te-diffused and -doped GaSb. *Journal of Applied Physics*, 1996, vol. 80, no. 2, pp. 1112–1115.

Опис статті для цитування:

Баганов Є.О., Шутов С.В., Цибуленко В.В., Левицький С.М. Процеси кристалізації тонких полікристалічних шарів стибніту галію для термофотовольтаїчного застосування. *Технологія и конструирование в электронной аппаратуре*, 2022, № 4–6, с. 39–45. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2022.4-6.39>

Cite the article as:

Baganov Ye. O., Shutov S. V., Tsybulenko V. V., Levytskyi S. N. Crystallization processes of thin polycrystalline layers of gallium stibnide for thermophotovoltaic application. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature*, 2022, no. 4–6, pp. 39–45. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2022.4-6.39>

К. ф. -м. н. О. І. КОНДРИК¹, д. ф. -м. н. Г. П. КОВТУН^{1, 2}, к. ф. -м. н. О. П. ЩЕРБАНЬ¹,
к. ф. -м. н. Д. О. СОЛОПІХІН¹

Україна, ¹ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України,

²Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

E-mail: kondrik@kipt.kharkov.ua

ОЦІНКА ЧИСТОТИ Cd, Zn, Pb ШЛЯХОМ БЕЗКОНТАКТНОГО ВИМІРЮВАННЯ ПИТОМОГО ЕЛЕКТРООПОРУ ЗА ТЕМПЕРАТУРИ РІДКОГО АЗОТУ

Залежність електроопору легкоплавких металів Cd, Zn, Pb від ступеня їхньої чистоти досліджувались за допомогою неруйнівної методики безконтактної реєстрації згасних вихрових струмів, індукованих в циліндричних зразках. В результаті комп'ютерного аналізу записаних сигналів були встановлені ділянки спадних кривих, з яких можна визначити питомий опір досліджуваних матеріалів. Встановлено залежність між чистотою металів та їхнім питомим опором за температури 77 К. Обґрунтовано можливість якісної оцінки чистоти легкоплавких металів без використання рідкого гелію.

Ключові слова: неруйнівний аналіз, питомий опір, чистота, легкоплавкі метали.

Високочисті легкоплавкі метали Cd, Zn, Pb та ^{арх}Pb (археологічний свинець) знайшли використання як складові компоненти напівпровідникових датчиків гамма- та рентгенівського випромінювання на основі CdTe та CdZnTe [1—3], а також низькофонових сцинтиляційних детекторів CdWO₄ [4—6], PbWO₄ [7, 8], ZnWO₄ [9—11], необхідних для проведення актуальних експериментів, спрямованих на дослідження властивостей нейтрино, пошуку частинок темної матерії, рідкісних альфа- й бета-розпадів [12]. Нейтрино відіграють ключову роль у фізиці елементарних частинок. Виявити їх та встановити їхню природу дозволяє, крім іншого, вивчення 2β-розпаду ядер ізотопів ¹⁰⁶Cd, ¹¹⁶Cd та ⁶⁴Zn. Зокрема, вольфрамат археологічного свинцю ^{арх}PbWO₄ з низьким вмістом радіоактивного ізотопу ²¹⁰Pb, використовують як світловоди для низькофонових сцинтиляційних детекторів з кристалами CdWO₄ [13]. Також наразі розробляється новітній міжнародний проєкт RES-NOVA, спрямований на виявлення випромінювань нейтрино від космічних об'єктів з використанням масивних криогенних детекторів з кристалів ^{арх}PbWO₄ [14].

Ефективність реєстрації та чутливість детекторів суттєво залежить від чистоти складових елементів детекторних матеріалів [15, 16]. Досить простим та ефективним методом оцінки чистоти металів є вимірювання їхнього питомого опору ρ в умовах низьких температур. Найбільшого поширення набули вимірювання ρ за температури 4,2 К, проте рідкий гелій є досить дорогим і його застосування не завжди виправдано. Певний інтерес представляють методики неруйнівного аналізу, однією з яких є безконтактна реєстрація згасних вихрових струмів, що індукуються у циліндричних зразках після вимкнення зовнішнього магнітного поля, створюваного соленоїдом.

Метою роботи було визначення можливості оцінки чистоти легкоплавких металів за допомогою методики вимірювання характерного часу затухання вихрових струмів за температури рідкого азоту.

Прилади та устаткування

На рис. 1 зображено блок-схему створеної установки, яка складається з гелієвого (або азотного) кріостату, тримача, в контейнері якого розміщується циліндричний зразок металу, соленоїда, вимірювальної (реєструвальної) котушки. Для наочності на рис. 1 показані умовні схеми з роздільним підведенням провідників до котушок. У реальній схемі комутація здійснюється через спільний роз'єм.

До системи реєстрації сигналу входять блок керування, який складається з джерела струму та

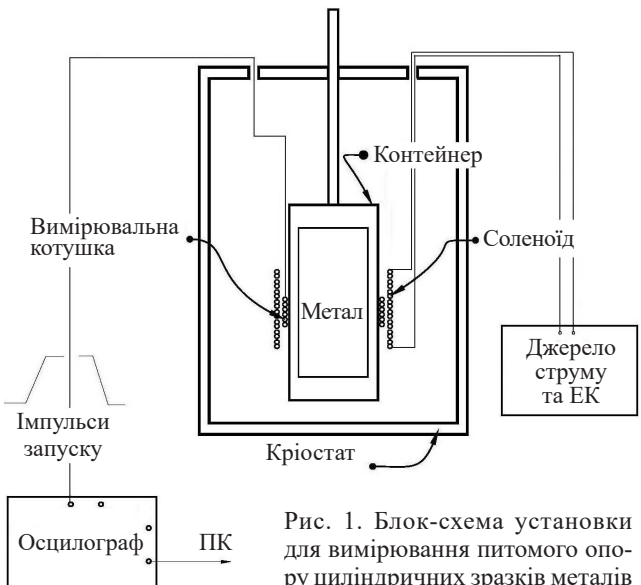


Рис. 1. Блок-схема установки для вимірювання питомого опору циліндричних зразків металів

електронного ключа (ЕК), цифрового осцилографа OWON XDS2102A. Механічна кнопка блока керування з'єднується зі схемою електронного ключа. Регуляторами струму (від 0 до 5 А) та напруги (до 15 В) змінювалась величина магнітного поля соленоїда, який складається з двошарової намотки у 200 витків мідного проводу діаметром 0,5 мм. Реєструвальна котушка складається з багатошарової намотки в 3000 витків діаметром 0,12 мм. Після натискання кнопки ЕК через соленоїд починає текти струм величиною 2—3 А, при цьому через металевий зразок всередині контейнера проходять силові лінії постійного магнітного поля. Після відпускання кнопки ЕК та переривання струму магнітне поле починає різко зменшуватися, але в зразку, що виступає в ролі сердечника соленоїда, починають протікати вихрові струми, що перешкоджають зменшенню напруженості цього магнітного поля. Оскільки зразок за кімнатної температури $T_{\text{кімн}}$ має відносно великий питомий опір ρ , індуковані вихрові струми у зразку згасають приблизно за кілька сотень мікросекунд залежно від величини ρ . Згасальні вихрові струми наводять у реєструвальній котушці напругу (е.р.с.), яка подається на вхід одного з двох каналів осцилографа.

Реєстрація сигналу осцилографом здійснюється в режимі запису поодинокого сигналу (опція *Single*) при запуску по фронту *Edge*, який відбувається, коли фронт вхідного сигналу досягає встановленого рівня. В нашому випадку запис сигналу починається з певної величини напруги згасних по амплітуді осциляцій, що створюються брязканням механічних контактів кнопки ключа. Ця напруга задається регулюванням рівня тригера *Trigger Level*. Сигнал відображається на екрані у вигляді початкових великих осциляцій амплітудою до 5 В, які частково придушуються схемою ЕК, з подальшим корисним сигналом у вигляді спадної кривої.

На описаній установці спочатку виконували пробні вимірювання сигналів, одержаних від зразків

міді технічної чистоти (діаметр $d = 14$ мм, довжина $L = 70$ мм) та зразків чистого кадмію ($d = 16$ мм, $L = 30$ мм). Результати показані на **рис. 2**: початкові частини (ліворуч) зображують згасні синусоїдні осциляції, далі (праворуч) — струми затухання, що індукуються у циліндричних зразках. Як видно, крива вихрових струмів затухання для міді більш полого, ніж для кадмію, через більший характерний час затухання τ й, відповідно, меншу величину ρ для Cu у порівнянні з Cd. На кривій затухання накладаються малі короткочасні імпульси, що викликані наводками в електричній мережі від працюючих технологічних установок.

Матеріали для досліджень та технології їх одержання

Для визначення відносного залишкового опору кадмію, цинку і свинцю використовували матеріали технічної чистоти (вміст основи 99,90...99,98 %) і зразки тих же металів після очищення (> 99,990...99,999 %).

Очищення кадмію і цинку виконували комплексним методом рафінування, який складався з двох етапів. На першому етапі проводили очищення від легколетких домішок (Na, Ca, S, P, Cl тощо) шляхом прогріву та фільтрації металу в атмосфері інертного газу високої чистоти, на другому — від важколетких домішок (Fe, Ni, Si, Al, Cu тощо) методом дистиляції з конденсацією пару чистого металу на гарячий конденсатор. Важколеткі домішки при цьому залишалися на дні тигля. Схему дистиляційного пристрою наведено, наприклад, у роботі [17]. Всі деталі пристрою, які контактували з металом, виготовлялися з графіту високої чистоти марки МПГ-7. Процес дистиляції виконували у вакуумі за остаточного тиску 10^{-4} — 10^{-2} Па.

Свинець очищували за допомогою раніше розробленого пристрою [18], який дозволяє проводити процес рафінування металу з конденсацією його пару [19]. Така процедура очищення обумовлена специфі-

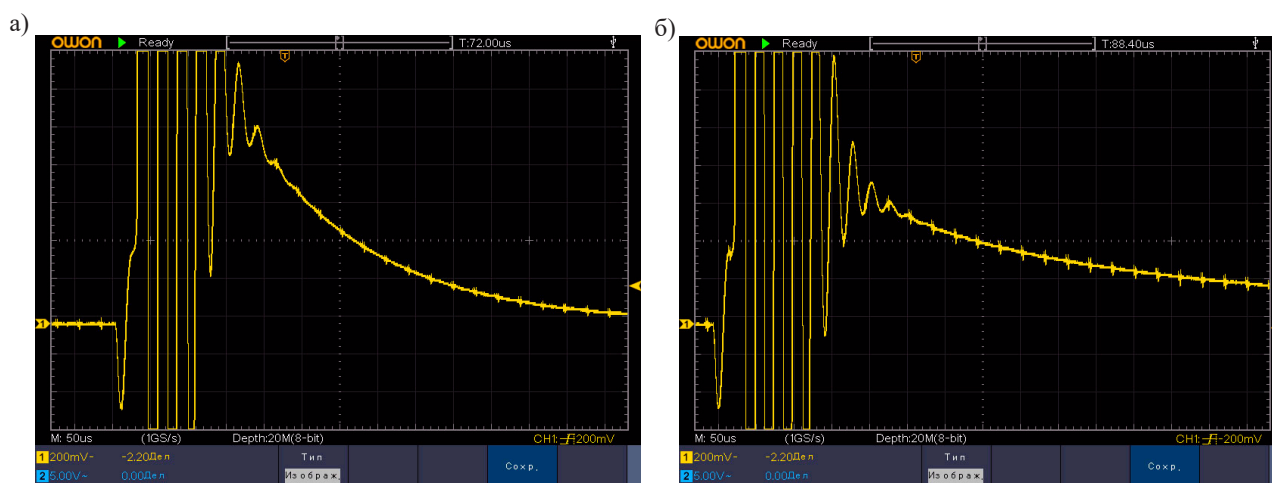


Рис. 2. Сигнали на екрані осцилографа при вимірюванні згасної е.р.с., що наводиться у вимірювальній котушці вихровими струмами в зразках чистого Cd (а) та Cu технічної чистоти (б)

кою властивостей свинцю — великою різницею між температурами плавлення та випаровування металу.

Пристрій для дистиляції свинцю виготовляли із щільного графіту високої чистоти, хімічно інертного до свинцю. В запропонованій схемі рафінування одночасно відбувається очищення від важколетких і легколетких домішок, що значно підвищує продуктивність процесу та вихід придатного продукту.

Отримані після очищення метали Cd, Zn, Pb, ^{арх}Pb розливалися, як і вихідні, в циліндричні мірні зливки заданого діаметра для подальшого вимірювання відносного залишкового опору за кімнатної температури та температури рідкого азоту ($T = 77$ К).

Результати досліджень та їх обговорення

Залежності електроопору легкоплавких металів Cd, Zn, Pb, ^{арх}Pb від ступеня їхньої чистоти досліджувались за допомогою описаної установки. Вихрові струми відображались на екрані цифрового осцилографа у вигляді спадних кривих, крутизна яких залежала від питомого опору ρ металічних зразків, розміщених всередині соленоїда та реєструвальної котушки. Отримані криві у цифровій формі передавалися з пам'яті осцилографа до персонального комп'ютера. Для спрощення подальшої обробки ці цифрові сигнали відображали спадні криві без осциляцій в межах екрана осцилографа й склалися з 1000 точок.

В результаті кількісного комп'ютерного аналізу записаних сигналів було встановлено, що їхні початкові ділянки $U(t)_{\text{init}}$ можна представити у вигляді суми

$$U(t)_{\text{init}} = \sum_{i=1}^n U_i \exp(-t / \tau_i), \quad (1)$$

де t — час;

U_i — амплітуда i -тої кривої;

τ_i — характерний час i -тої експоненційно спадної кривої вихрового струму.

Кінцеві ділянки спадних кривих, що розташовуються безпосередньо перед сигналом величиною $U(t) \rightarrow 0$, можна представити як

$$U(t) = U_0 \exp(-t / \tau), \quad (2)$$

де U_0 — початкова амплітуда корисного сигналу;

τ — характерний час затухання вихрового струму, індукованого в металічному зразку.

Для визначення τ використовувався метод найменших квадратів. Аналіз та співставлення значень характерного часу затухання зразків Cd, Zn, ^{арх}Pb, Pb, виміряних за кімнатної температури, з відомими величинами питомого опору $\rho_{20^\circ\text{C}}$, які були отримані для цих металів при $T = 20^\circ\text{C}$, показав, що питомий опір зразків можна приблизно описати формулою

$$\rho = \frac{2,17d^2}{4\tau} \cdot 10^{-9} [\text{Ом} \cdot \text{см}], \quad (3)$$

де d — [см], τ — [с].

Похибка такого вимірювання не перевищувала 3% і залежала головним чином від точності вибору однакових ділянок згасних кривих, отриманих в різних вимірюваннях.

Потім було проведено аналіз характерного часу затухання τ вихрових струмів в зразках, виміряного за температури 77 К, та обчислення питомого опору зразків за формулою (3).

Дані, отримані в результаті досліджень, представлені у **таблиці**. Слід зазначити, що вимірювання характерного часу затухання й формування цифрових сигналів для Cd і Zn за кімнатної температури проводилось на початкових ділянках спадних кривих вихрових струмів, тому одержані величини τ виявились меншими, а ρ — більшими, ніж відомі величини, отримані при $T = 20^\circ\text{C}$.

Вимірювання τ для зразків свинцю №9 — №11 проводились на кінцевих ділянках спадних кривих, але за температури навколишнього середовища близько 13°C , тому величини ρ виявились дещо нижчими, ніж відомі $\rho_{20^\circ\text{C}}$. З іншого боку, після нагріву зразка №11 на кілька градусів виявилось, що його питомий опір збільшився до $2,197 \cdot 10^{-5}$ Ом·см, що практично співпадає з відомим значенням $\rho_{20^\circ\text{C}}$ (див. таблицю).

Оскільки створення системи термостабілізації для вимірювання τ при $T = 20^\circ\text{C}$ ускладнює установку, але не додає нової інформації, в подальших вимірюваннях при визначенні відносного електроопору $\rho_{\text{кімн}} / \rho_{77\text{К}}$ було вирішено користуватись відомими величинами $\rho_{20^\circ\text{C}}$, а вимірювання проводити тільки за температури рідкого азоту.

Запис цифрових сигналів та вимірювання τ для зразків Pb №7 і №8 при $T = 77$ К проводилися на серединних ділянках спадних кривих, тому одержані величини $\rho_{77\text{К}}$ були дещо завищеними.

Для зразка Cd №3, отриманого з матеріалу із Заводу чистих металів (м. Світловодськ), величина $\rho_{77\text{К}}$ склала $2,38 \cdot 10^{-6}$ Ом·см, тоді як для Cd після двократної дистиляції (зразок №4) $\rho_{77\text{К}}$ дорівнювало $1,988 \cdot 10^{-6}$ Ом·см, тобто менше на $\approx 16,5\%$, що значно перевищує допустиму похибку застосованої методики. Для зразка Zn(99,996) $\rho_{77\text{К}} = 1,8 \cdot 10^{-6}$ Ом·см, для Zn(99,9993) $\rho_{77\text{К}} = 1,68 \cdot 10^{-6}$ Ом·см, що на $\approx 6,67\%$ менше.

Обробка вимірювань згасних вихрових струмів у зразках свинцю показала, що для Pb технічної чистоти $\rho_{77\text{К}} = (4,4 - 4,5) \cdot 10^{-5}$ Ом·см, а для Pb №9, отриманого після дистиляції, $\rho_{77\text{К}} = (2,95 - 3,28) \cdot 10^{-5}$ Ом·см, що на 29—32% менше.

Отже, з наведених результатів видно, що чим більше зразки відрізняються за чистотою металу, тим більша різниця в значеннях їхнього питомого опору при $T = 77$ К. Інакше кажучи, була встановлена можливість грубої оцінки ступеня чистоти металів шляхом порівняння $\rho_{77\text{К}}$ зразків, одержаних після вищупування та різних процедур глибокої очистки. При цьому, оскільки досліджені метали мають досить

МАТЕРІАЛИ ЕЛЕКТРОНІКИ

Результати вимірювань τ та ρ зразків Cd, Zn, Pb різної чистоти за кімнатної температури $T_{\text{кімн}}$ та $T = 77 \text{ K}$

№	Метал; чистота, %	Діаметр, мм	$\rho_{20\text{C}}$ Ом·см	$\rho_{\text{кімн}}$ Ом·см	$\rho_{77\text{K}}$ Ом·см	$\rho_{\text{кімн}}/\rho_{77\text{K}}$	τ , нс	
							$T_{\text{кімн}}$	77 K
1	Cd технічної чистоти; 99,98	12,4	$7,6 \cdot 10^{-6}$	$7,58 \cdot 10^{-6}$	$2,0 \cdot 10^{-6}$	3,78	110	416
2	Cd після дистиляції та НК*; 99,998	12,4		$7,80 \cdot 10^{-6}$	$2,27 \cdot 10^{-6}$	3,44	107	368
3	Cd ЗЧМ**	11,75		$8,1 \cdot 10^{-6}$	$2,38 \cdot 10^{-6}$	3,4	92	314
4	Cd після двократної дистиляції; 99,999	11,80		$8,036 \cdot 10^{-6}$	$1,988 \cdot 10^{-6}$	4,04	94	380
5	Zn після двократної дистиляції; 99,9993	12,3	$5,9 \cdot 10^{-6}$	$6,4 \cdot 10^{-6}$	$1,68 \cdot 10^{-6}$	3,8	130	488
6	Zn після дистиляції; 99,996	12,4		$6,5 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	3,6	128	462
7	Pb після двократної дистиляції та НК; 99,998	12,5	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$2,07 \cdot 10^{-5}$	$3,56 \cdot 10^{-6}$	5,8	41	238
8	^{ар} Pb після двократ- ної дистиляції та НК; 99,999	12,4		$2,0 \cdot 10^{-5}$	$3,50 \cdot 10^{-6}$	5,7	42	242
9	Pb після двократної дистиляції; > 99,999	12		$2,056 \cdot 10^{-5}$	$2,95 \cdot 10^{-6}$	7,45	38	265
				$2,013 \cdot 10^{-5}$	$3,28 \cdot 10^{-6}$	6,7	38,8	238
10	Pb технічної чистоти; 99,93	16		$2,04 \cdot 10^{-5}$	$4,54 \cdot 10^{-6}$	4,84	68	306
11	Pb технічної чистоти; 99,96	16	$2,04 \cdot 10^{-5}$	$4,40 \cdot 10^{-6}$	5	68	316	

*НК — спрямована кристалізація; **ЗЧМ — матеріал Заводу чистих металів (м. Світловодськ).

низьку температуру Дебая: Cd — 210 K, Zn — 328 K, Pb — 105 K [20, с. 438], то більш точну оцінку чистоти металів можна отримати шляхом вимірювання питомого опору за температури рідкого гелію.

Висновки

Проста установка, створена в цій роботі, дає можливість безконтактним неруйнівним способом — шляхом реєстрації експоненційно спадних вихрових струмів, що наводяться у циліндричних зразках — отримувати величину питомого електроопору металів за кімнатної та низьких температур. Запропонована методика дозволяє якісно оцінювати чистоту металів без використання коштовного рідкого гелію. Зразки досліджених металів Cd, Zn, Pb, ^{ар}Pb з відомим домішковим складом, як вихідних, так і після очищення за різними технологіями, можуть слугувати мірилом точності для визначення ефективності використаної експериментальної методики оцінки чистоти.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Abbaspour S., Mahmoudian B., Islamian J. P. Cadmium telluride semiconductor detector for improved spatial and energy resolution radioisotopic imaging. *World J. Nucl. Med.* 2017, vol. 16, iss. 2, p. 101—107. <https://doi.org/10.4103/1450-1147.203079>
2. Johns P. M., Nino J. C. Room temperature semiconductor detectors for nuclear security. *J. Appl. Phys.* 2019, vol. 126, iss. 4, p. 040902-1—040902-21. <https://doi.org/10.1063/1.5091805>
3. Ridzonova K., Belas E., Grill R., Pekarek J., Praus P. Space charge limited photocurrents and transient currents in CdZnTe radiation detectors. *Phys. Rev. Applied*, 2020, vol. 13, iss. 6, 064054. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.13.064054>
4. Christos M., Koukou V., Martini N. et al. Luminescence efficiency of cadmium tungstate (CdWO₄) single crystal for medical imaging applications. *Crystals*, 2020, vol. 10 (6), p. 429-1—426-16. <https://doi.org/10.3390/cryst10060429>
5. Ziluei H., Azimirad R., Larjani M., Ziaie F. Preparation and optimization of CdWO₄-polymer nano-composite film as an alpha particle counter. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 2017, vol. 852, p. 85—90. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.01.015>
6. Ying Zhang, Xianchun Zhu, Yao Zhao et al. CdWO₄:Eu³⁺ nanostructures for luminescent applications. *ACS Appl. Nano*

- Mater.*, 2019, vol. 2, iss. 11, p. 7095—7102. <https://doi.org/10.1021/acsnm.9b01625>
7. Kim M.J., Park H., Kim H.J. Characterization of PbWO₄ crystals for high-energy physics experiments. *Journal of the Korean Physical Society*, 2016, vol. 69, iss. 6, p. 1130—1134. <https://doi.org/10.3938/jkps.69.1130>
8. Nedilko S., Chukova O. Luminescent spectroscopy of the Yb³⁺ ions in the PbWO₄ crystal. *Acta Phys. Polon.*, 2018, vol. 133, no. 4, p. 918—922. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.133.918>
9. Belli P., Bernabei R., Borovlev Yu. A. et al. New development of radiopure ZnWO₄ crystal scintillators. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 2019, vol. 935, iss. 11, p. 89—94. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.05.014>
10. Heon Yong Jeong, Ju Hyuk Lee, Sang Yoon Lee et al. A transparent nano-polycrystalline ZnWO₄ thin-film scintillator for high-resolution x-ray imaging. *ACS Omega*, 2021, vol. 6, iss. 48, p. 33224—33230. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c05962>
11. Belli P., Bernabei R., Borovlev Yu.A. et al. Optical, luminescence, and scintillation properties of advanced ZnWO₄ crystal scintillators. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 2022, vol. 1029, 166400. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.166400>
12. Barabash A.S. Double beta decay experiments: current status and prospects. *Physics Procedia*, 2014, vol. 57, no. 5, p. 416—422. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.09.215>
13. Danevich F.A., Georgadze A.Sh., Kobychiev V.V. et al. Application of PbWO₄ crystal scintillators in experiment to search for 2β decay of ¹¹⁶Cd. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*. 2006, vol. 556, iss. 1, p. 259—265. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.09.049>
14. Pattavina L., Iachellini N.F., Tamborra I. Neutrino observatory based on archaeological lead. *Phys. Rev. D*, 2020, vol. 102, iss. 6, 063001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.102.063001>
15. Guoqiang Li, Xiaolu Zhang, Hui Hua, Wanqi Jie. Upgrading of CdZnTe by annealing with pure Cd and Zn metals. *Semiconductor Science and Technology*, 2006, vol. 21, no. 3, p. 392—396. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/21/3/032>
16. Zaioura A., Ayoubb M., Hamiéc A. et al. Preparation of high purity CdTe for nuclear detector: electrical and nuclear characterization. *Physics Procedia*, 2014, vol. 55, p. 476—484 <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.07.069>
17. Щербань А.П., Ковтун Г.П., Горбенко Ю.В. и др. Получение высокочистых гранулированных металлов: кадмия, цинка, свинца. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2017, № 1–2, с. 55—60.
18. Щербань О.П., Ковтун Г.П., Солопихін Д.О. Пристрій для рафінування металів дистиляцією у вакуумі. Пат. 94547 України, 2011, бюл. № 9.
19. Boiko R.S., Virich V.D., Danevich F.A. et al. Ultrapurification of archaeological lead. *Inorganic Materials*, 2011, vol. 47, no. 6, p. 645—648. <https://doi.org/10.1134/S0020168511060069>
20. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др. Физические величины: Справочник. Энергоатомиздат, 1991, 1232 с.

Дата надходження рукопису
до редакції 28.06 2022 р.

DOI: 10.15222/TKEA2022.4-6.46
UDC 669.054+539.1.074

O. I. KONDRIK¹, G. P. KOVTUN^{1, 2},
O. P. SHCHERBAN¹, D. O. SOLOPIKHIN¹

Ukraine, Kharkiv, ¹NSC «Kharkiv Institute of Physics and Technology»,
²V. N. Karazin Kharkiv National University
E-mail: kondrik@kipt.kharkov.ua

ESTIMATING PURITY OF Cd, Zn, Pb BY NON-CONTACT MEASUREMENT OF SPECIFIC ELECTRICAL RESISTANCE AT LIQUID NITROGEN TEMPERATURE

High-purity fusible metals Cd, Zn, Pb and archaeological ^{arch}Pb are used as component elements in semiconductor and low-background scintillation detectors based on CdTe, CdZnTe, CdWO₄, PbWO₄, ZnWO₄ required for registering ionizing radiation and searching for particles of dark matter, rare alpha and beta decays. The detection efficiency and the sensitivity of detectors significantly depend on the purity of the constituent elements of detector materials. The dependence of the resistivity of fusible metals Cd, Zn, Pb on the degree of their purity was studied using the non-destructive technique of registering the decaying vortex currents induced in cylindrical samples after dropping the external magnetic field. The aim of the work was to determine the possibility of evaluating the purity of fusible metals using a simple methodology for measuring the characteristic times of decay of vortex currents at 77 K without the use of liquid helium.

The computer analysis of the recorded signals presented in the form of decaying curves allowed finding the areas where the signal can be represented as an exponent with a characteristic decay time τ and determining a formula that related τ, specific resistance ρ, and the diameter of cylindrical samples. A comparison of the ρ values of both the initial samples of cadmium, zinc, lead, and archaeological lead, and those samples after various purification procedures, allowed establishing the dependence of the resistivity on the purity of the studied materials at the temperature of liquid nitrogen ρ₇₇. The greater the difference in the purity of the fusible metal, the more their values ρ₇₇ were different. Thus, the authors substantiated the possibility of a qualitative assessment of the purity of metals using contactless measurement and comparison of ρ₇₇ for samples obtained after growing and various deep purification procedures.

Keywords: non-destructive analysis, specific resistance, purity, fusible metals.

REFERENCES

1. Abbaspour S., Mahmoudian B., Islamian J. P. Cadmium telluride semiconductor detector for improved spatial and energy resolution radioisotopic imaging. *World J. Nucl. Med.* 2017, vol. 16, iss. 2, pp. 101—107. <https://doi.org/10.4103/1450-1147.203079>
2. Johns P. M., Nino J. C. Room temperature semiconductor detectors for nuclear security. *J. Appl. Phys.* 2019, vol. 126, iss. 4, pp. 040902-1 — 040902-21. <https://doi.org/10.1063/1.5091805>
3. Ridzonova K., Belas E., Grill R., Pekarek J., Praus P. Space charge limited photocurrents and transient currents in CdZnTe radiation detectors. *Phys. Rev. Applied*, 2020, vol. 13, iss. 6, 064054. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.13.064054>
4. Christos M., Koukou V., Martini N. et al. Luminescence efficiency of cadmium tungstate (CdWO₄) single crystal for medical imaging applications. *Crystals*, 2020, vol. 10 (6), pp. 429-1—426-16. <https://doi.org/10.3390/cryst10060429>
5. Ziluei H., Azimirad R., Larijani M., Ziaie F. Preparation and optimization of CdWO₄-polymer nano-composite film as an alpha particle counter. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 2017, vol. 852, pp. 85—90. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.01.015>
6. Ying Zhang, Xianchun Zhu, Yao Zhao et al. CdWO₄:Eu³⁺ nanostructures for luminescent applications. *ACS Appl. Nano Mater.*, 2019, vol. 2, iss. 11, pp. 7095—7102. <https://doi.org/10.1021/acsnm.9b01625>
7. Kim M.J., Park H., Kim H.J. Characterization of PbWO₄ crystals for high-energy physics experiments. *Journal of the Korean Physical Society*, 2016, vol. 69, iss. 6, p. 1130—1134. <https://doi.org/10.3938/jkps.69.1130>
8. Nedilko S., Chukova O. Luminescent spectroscopy of the Yb³⁺ ions in the PbWO₄ crystal. *Acta Phys. Polon.*, 2018, vol. 133, no. 4, pp. 918—922. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.133.918>
9. Belli P., Bernabei R., Borovlev Yu. A. et al. New development of radiopure ZnWO₄ crystal scintillators. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 2019, vol. 935, iss. 11, pp. 89—94. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.05.014>
10. Heon Yong Jeong, Ju Hyuk Lee, Sang Yoon Lee et al. A transparent nano-polycrystalline ZnWO₄ thin-film scintillator for high-resolution x-ray imaging. *ACS Omega*, 2021, vol. 6, iss. 48, pp. 33224—33230. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c05962>
11. Belli P., Bernabei R., Borovlev Yu. A. et al. Optical, luminescence, and scintillation properties of advanced ZnWO₄ crystal scintillators. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 2022, vol. 1029, 166400. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.166400>
12. Barabash A.S. Double beta decay experiments: current status and prospects. *Physics Procedia*, 2014, vol. 57, no. 5, pp. 416—422. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.09.215>
13. Danevich F.A., Georgadze A.Sh., Kobychyev V.V. et al. Application of PbWO₄ crystal scintillators in experiment to search for 2β decay of ¹¹⁶Cd. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 2006, vol. 556, iss. 1, pp. 259—265. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.09.049>
14. Pattavina L., Iachellini N.F., Tamborra I. Neutrino observatory based on archaeological lead. *Phys. Rev. D*, 2020, vol. 102, iss. 6, 063001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.102.063001>
15. Guoqiang Li, Xiaolu Zhang, Hui Hua, Wanqi Jie. Upgrading of CdZnTe by annealing with pure Cd and Zn metals. *Semiconductor Science and Technology*, 2006, vol. 21, no. 3, pp. 392—396. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/21/3/032>
16. Zaioura A., Ayoubb M., Hamiéc A. et al. Preparation of high purity CdTe for nuclear detector: electrical and nuclear characterization. *Physics Procedia*, 2014, vol. 55, pp. 476—484 <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.07.069>
17. Shcherban A. P., Kovtun G. P., Gorbenko Y. V. et al. Production of high purity granular metals: cadmium, zinc, lead. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2017, no. 1–2, ppp. 55—60. <https://doi.org/10.15222/TKEA2017.1-2.55> [Rus]
18. Shcherban A. P., Kovtun G. P., Solopikhin D. A. *A device for refining metals by vacuum distillation. Pat. 94547 UA*, 2011. [Ukr]
19. Boiko R.S., Virich V.D., Danevich F.A. et al. Ultrapurification of archaeological lead. *Inorganic Materials*, 2011, vol. 47, no. 6, ppp. 645—648. <https://doi.org/10.1134/S0020168511060069>
20. Babichev A.P., Babushkina N.A., Bratkovsky A.M. et al. *Fizicheskiye velichiny. Spravochnik* [Physical quantities. Handbook]. Moscow, Energoatomizdat, 1991, 1232 pp. [Rus]

Опис статті для цитування:

Кондрік О. І., Ковтун Г. П., Щербань О. П., Солопихін Д. О. Оцінка чистоти Cd, Zn, Pb шляхом безконтактного вимірювання питомого електроопору за температури рідкого азоту. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2022, № 4–6, с. 46–51. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2022.4-6.46>

Cite the article as:

Kondrik A. I., Kovtun G. P., Shcherban O. P., Solopikhin D. O. Estimating purity of Cd, Zn, Pb by non-contact measurement of specific electrical resistance at liquid nitrogen temperature. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2022, no. 4–6, pp. 46–51. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2022.4-6.46>

К. т. н. І. В. СЕМКІВ, к. ф.-м. н. В. М. ВАЩИНСЬКИЙ, к. ф.-м. н. А. І. КАШУБА,
д. ф.-м. н. Г. А. ІЛЬЧУК, к. ф.-м. н. М. В. СОЛОВЙОВ

Україна, Національний університет «Львівська політехніка»

E-mail: v.vashchynskyi@gmail.com

ВПЛИВ ПРИРОДИ ЕЛЕКТРОЛІТУ НА ЕЛЕКТРОХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВУГЛЕЦЕВОГО МАТЕРІАЛУ РОСЛИННОГО ПОХОДЖЕННЯ

Методами імпедансної спектроскопії та вольтамперометрії досліджено поведінку конденсаторних систем на основі пористих вуглецевих матеріалів у водних і органічних розчинах електролітів. Встановлено, що катіони K^+ та TEA^+ входять в пори матеріалу в сольватованому стані, причому розміри іонів K^+ менші, ніж TEA^+ . Розміри аніонів BF_4^- менші, ніж катіонів неводних електролітів. Завдяки цьому ємність електрохімічних конденсаторів на основі водних розчинів електролітів є більшою за ємність відповідних джерел живлення в апротонному розчині електроліту.

Ключові слова: конденсаторні системи, пористий вуглецевий матеріал, водний та органічний електроліт, ємність.

Серед систем накопичення енергії одними з найпоширеніших є суперконденсатори, також відомі як електрохімічні конденсатори (ЕК), вони використовуються в різноманітних портативних пристроях, електромобілях, стаціонарних системах накопичення енергії тощо. Порівняно з іншими системами накопичення енергії, такими як батареї та звичайні конденсатори, суперконденсатори мають три основні переваги: високу питому потужність, тривалий термін використання та швидкі процеси зарядки/розрядки, що робить перспективними подальше їх застосування [1].

Накопичення енергії суперконденсаторів відбувається за двома механізмами: перший — подвійна електрична ємність, створена електростатичним тяжінням між іонами та поверхнею зарядженого електрода (вуглецеві матеріали); другий — псевдоємність, що виникає в результаті швидкого оборотного окислення/відновлення на поверхні електрода [2]. Тобто очевидно, що основними робочими складовими суперконденсаторів є електроліти та електроди, які виготовляють з пористих вуглецевих матеріалів (інша назва — карбони) [3]. Відповідно, експлуатаційні характеристики суперконденсаторів сильно залежать від фізико-хімічних властивостей використовуваних електродних матеріалів. Пористі вуглецеві матеріали (ПВМ) отримують з біомаси, і їх використання зумовлено наявністю вуглецевого елемента та добре орієнтованих каналів, що робить ПВМ здатними швидко транспортувати іони під час застосування електрохімічного заряду/розряду [4—6]. Крім того, наявність мікропор у вуглецевих матеріалах може значно збільшити питому поверхню, що відіграє ключову роль у підвищенні питомої ємності.

Одним із найважливіших факторів, який визначає ефективність роботи ЕК, є вид електроліту — вод-

ний чи неводний. Використання неводних електролітів для електрохімічних конденсаторів має величезну перевагу через збільшення робочої напруги, оскільки діапазон електрохімічної стабільності таких електролітів значно ширший. Слід зазначити, що ємність ЕК залежить головним чином від ємності (вираженої у Ф/г), яка забезпечується електродним матеріалом, в той час як напруга й опір такого пристрою залежать від виду електроліту [7].

Широке застосування суперконденсаторів в різноманітних галузях, зокрема як накопичувачів енергії у складі систем енергозабезпечення транспортних засобів, викликає необхідність покращення їхніх енергетичних параметрів. Ця робота присвячується вивченню кінетики перебігу електрохімічних процесів на межі «вуглецевий електрод — електроліт» і встановленню впливу природи електролітів на ємність електрохімічних конденсаторів, сформованих на основі пористих вуглецевих матеріалів.

Зразки та методика досліджень

Для дослідження використовували пористий вуглецевий матеріал, виготовлений у National Institute of Coal (Ов'єдо, Іспанія), з присвоєною йому назвою CSTR-36В.

До складу катодної суміші увіходили активоване вугілля та зв'язувальна добавка (полівінілденотфторид), масова доля яких становила 95 та 5 % відповідно. Для виготовлення катодів нарізали нікелеву сітку відповідної форми площею $0,5 \text{ cm}^2$ і зважували її. В цю сітку загортали суміш та пресували її під тиском 50 kg/cm^2 , після чого встановлювали масу виготовленого електрода. Маса активного матеріалу не перевищувала 3 мг.

Електролітом слугував 30%-вий водний розчин гідроксиду калію (КОН) і 0,7-молярний (0,7М) роз-

чин тетрафторборату тетраетиламонію ($[\text{C}_2\text{H}_5]_4\text{NBF}_4$) в ацетонітрилі (CH_3CN). Електродний потенціал розраховувався відносно стандартного водневого електрода порівняння.

До виготовлених електродів за допомогою зварювального апарату приварювали струмовиводи. Електрохімічні вимірювання проводили за дво- та триелектродною схемами з хлорсрібним електродом порівняння.

Імпедансні спектри (в діапазоні частот $5 \cdot 10^{-3}$ — $5 \cdot 10^5$ Гц) в потенціостатичних умовах, циклічні вольтамперограми та гальваностатичні заряд-розрядні цикли записувались за допомогою вимірювального комплексу “AUTOLAB” фірми “ECO CHEMIE” (Нідерланди), укомплектованого комп’ютерними програмами FRA-2 та GPES.

Результати досліджень та їх обговорення

Із метою виявлення протікання можливих хімічних реакцій, які вносять вклад у загальну ємність конденсаторних систем, проводились потенціодинамічні дослідження в області потенціалів $U = 0$ —1 В. На **рис. 1** представлені циклічні вольтамперограми вуглецевих матеріалів у 30%-му водному розчині КОН.

Форма вольтамперограм не вказує на будь-яку псевдоємнісну поведінку досліджених електрохімічних комірок, оскільки на них не спостерігається піків редокс-реакцій в заданому діапазоні напруги. Загальний характер потенціодинамічних залежностей є типовими для електрохімічних конденсаторів, що працюють за принципом заряду/розряду подвійного електричного шару (ПЕШ). Форма наведеної на рис. 1 залежності, отриманої для двоелектродної електрохімічної комірки, свідчить про квазіоборотність заряду/розряду ПЕШ. На вольтамперограмах відсутня наявність гострих максимумів. Проте, судячи з форми отриманої циклічної вольтамперограми, можна сказати, що до досягнення певно-

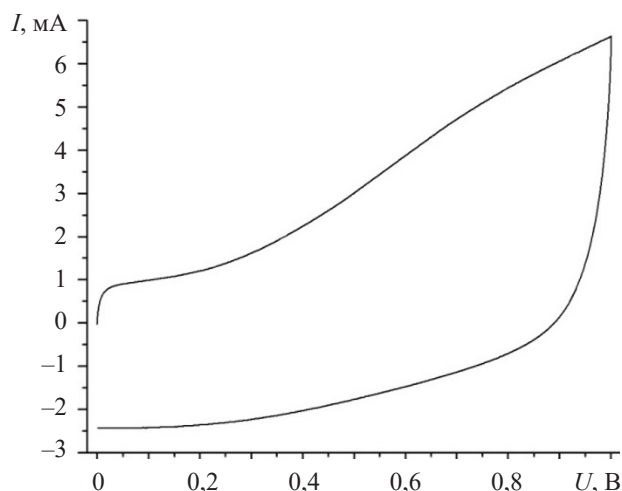


Рис. 1. Вольтамперограми електрохімічних комірок на основі електродів з CSTR-36 у 30%-му водному розчині КОН

го потенціалу — потенціалу розблокування фарадеєвського перенесення ОН-груп через межу розділу «електрод — електроліт» — значення струму, а відповідно і ємності, практично не залежить від потенціалу, що являє собою класичний симетричний суперконденсатор. У цьому випадку ємність забезпечується ємністю ПЕШ, сформованого іонами K^+ на поверхні вуглецю [8]. В області значень потенціалу, більшого за потенціал розблокування, значну роль починають відігравати фарадеєвські редокс-реакції накопичення іонів на поверхні вуглецевого матеріалу, при цьому можна припустити можливість процесу входження цих груп всередину пор матеріалу електрода.

Одним із важливих параметрів ЕК є кулонівська ефективність — це відношення величин розрядної ємності до зарядної, яке характеризує відповідність режимів розряду до потужнісних можливостей суперконденсаторів та може вказувати на наявність побічних хімічних і електрохімічних реакцій [9]. Дослідження показало, що у водному і органічному електролітах криві гальваностатичних циклів заряджання/розряджання ЕК є однотипними (**рис. 2**).

Отримані з гальваностатичних досліджень результати дозволили розрахувати ємність з розрядної частини кривої циклу за допомогою рівняння

$$C = (2I \Delta t) / (m \Delta U),$$

де C — питома ємність;

I — струм (заряду/розряду);

Δt — час розряду електрохімічної комірки.

m — активна маса електроду;

ΔU — спад напруги при замиканні розрядного кола,
 $\Delta U = U_{\text{max}} - U_{\text{drop}}$;

U_{max} — максимальне значення зарядної напруги;

U_{drop} — спад напруги при сталому струмі, викликаний внутрішнім опором електрохімічної системи.

Для цього зразка спостерігався лінійний спад ємності у разі збільшення розрядного струму. Окрім того, вже після двох “тренувальних” циклів наставало типове ємнісне накопичення заряду з кулонівською ефективністю, не нижчою за 97%, яка практично не змінювалась впродовж експерименту. Це свідчить про те, що досліджуваний матеріал забезпечує стабільність конденсаторних систем та довговічність конденсатора. Максимальне значення питомої ємності для ПВМ у 30%-му КОН становить 125 Ф/г та пов’язане із забезпеченням достатнього часу для формування ПЕШ іонами K^+ на поверхні матеріалу електрода та протікання фарадеєвських реакцій накопичення ОН-груп на поверхні вуглецю. В органічному електроліті значення ємності дорівнює 101 Ф/г. Такі результати для великих за розмірами молекул органічного електроліту задовільно корелюють як з більшим значенням найбільш ймовірного розміру пор, так і з частковою присутністю мікророзмірних пор.

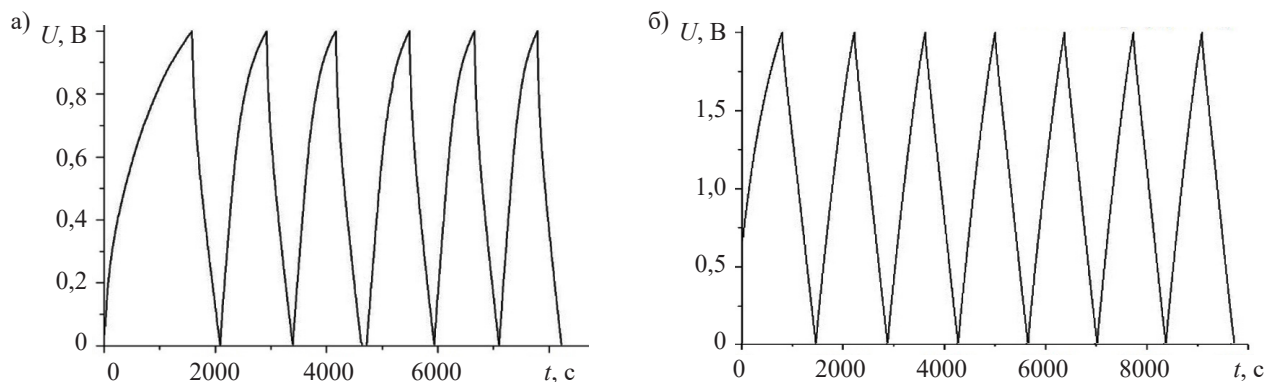


Рис. 2. Гальваностатичні цикли заряду/розряду електродів з CSTR-36 у 30%-му водному розчині KOH (а) та у 0,7М-розчині $[C_2H_5]_4NBF_4$ в ацетонітрилі (б)

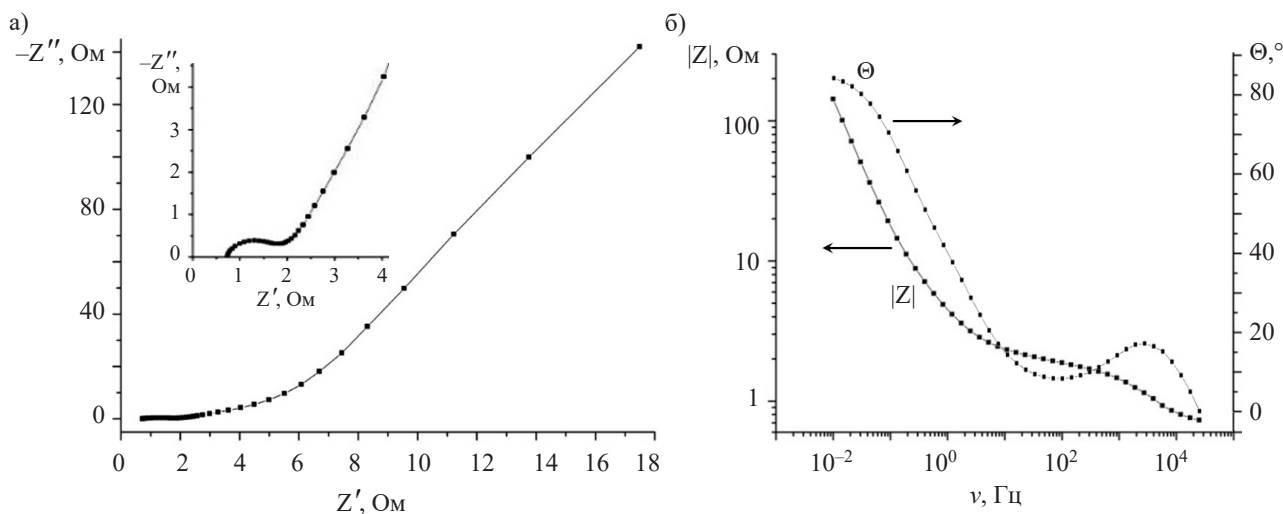


Рис. 3. Діаграми Найквіста (а) та Бодє-діаграми (б) для електродів з CSTR-36 у 30%-му водному розчині KOH

Для вивчення електрохімічних процесів на межі розділу «ПВМ — електроліт» використано метод електрохімічної імпедансної спектроскопії, який дозволяє детальніше встановити взаємозв'язок між внутрішньою структурою електродного вуглецевого матеріалу та його поведінкою у водному розчині електроліту. Цей метод є найбільш доцільним для розв'язання вказаної вище задачі, оскільки дає можливість проводити дослідження в досить широкому інтервалі частот ($\nu = 10^{-3} — 10^6$ Гц) [10].

Частотні залежності комплексного імпедансу аналізувалися графічно-аналітичним методом в середовищі програмного пакета ZView 2.3 (Scribner Associates). Адекватність побудованих імпедансних моделей пакета експериментальних даних була підтверджена повністю випадковим характером частотних залежностей залишкових різниць першого порядку [11]. Значення ємностей для побудови вольт-фарадних залежностей визначалися з точністю 2—8% (коефіцієнт Крамерса-Кроніга, що дозволив врахувати зміни фазового кута Θ при моделюванні годографів імпедансу, був в межах $10^{-6} — 10^{-5}$).

Досліджуваний матеріал CSTR-36 у 30%-му водному розчині KOH демонструє яскраво виражений

ємнісний процес у подвійному електричному шарі межі його розділу з електролітом (рис. 3). Такий результат добре моделюється електричною еквівалентною схемою моделі де Леві [12]. Проте на годографах імпедансу спостерігаються процеси накопичення енергії, що не можна віднести до ємнісного механізму. Це пов'язано зі зростанням товщини області просторового заряду (ОПЗ), і можна припустити, що проблема пов'язана з шунтуванням гелмгольцевої ємності ємністю ОПЗ карбону. А значить, в такому випадку моделювання необхідно базувати на схемі де Леві, модифікованій послідовно приєднаною (у відповідності до підходу Войта) паралельною ланкою $C_{SC} — R_{SC}$ (рис. 4). Наявність височастотних дуг на годографах імпедансу, як правило, пояснюється наявністю закритих з однієї сторони пор [11].

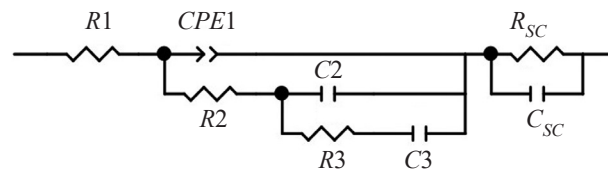


Рис. 4. Електрична еквівалентна схема для моделювання діаграм Найквіста

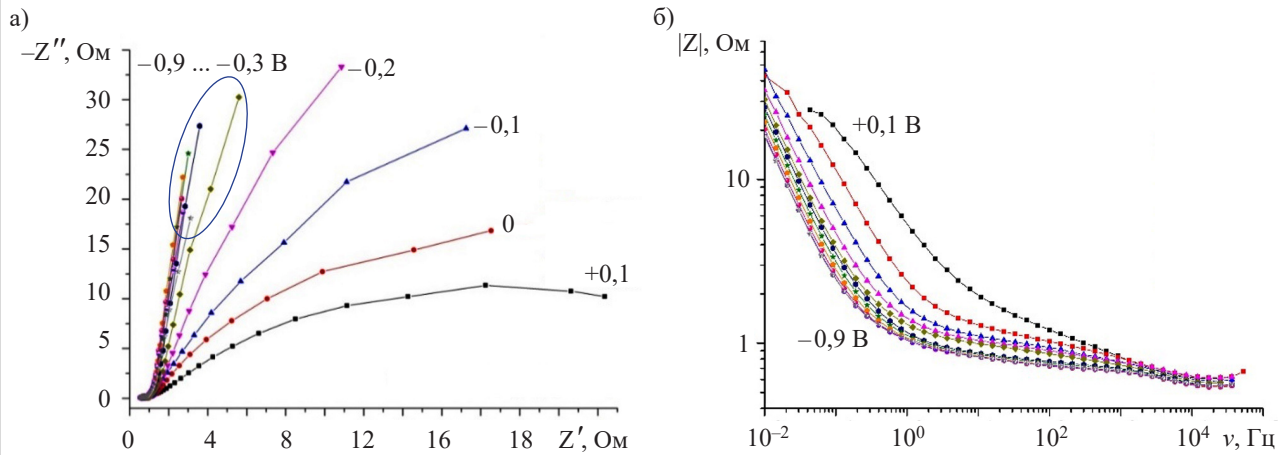


Рис. 5. Діаграми Найквіста (а) та Бодє-діаграми (б, в) для електродів з CSTR-36 у 0,7М-розчині $[C_2H_5]_4NBF_4$ в ацетонітрилі, отримані в діапазоні зміни потенціалу від +0,1 до -0,9 В з кроком 0,1 В

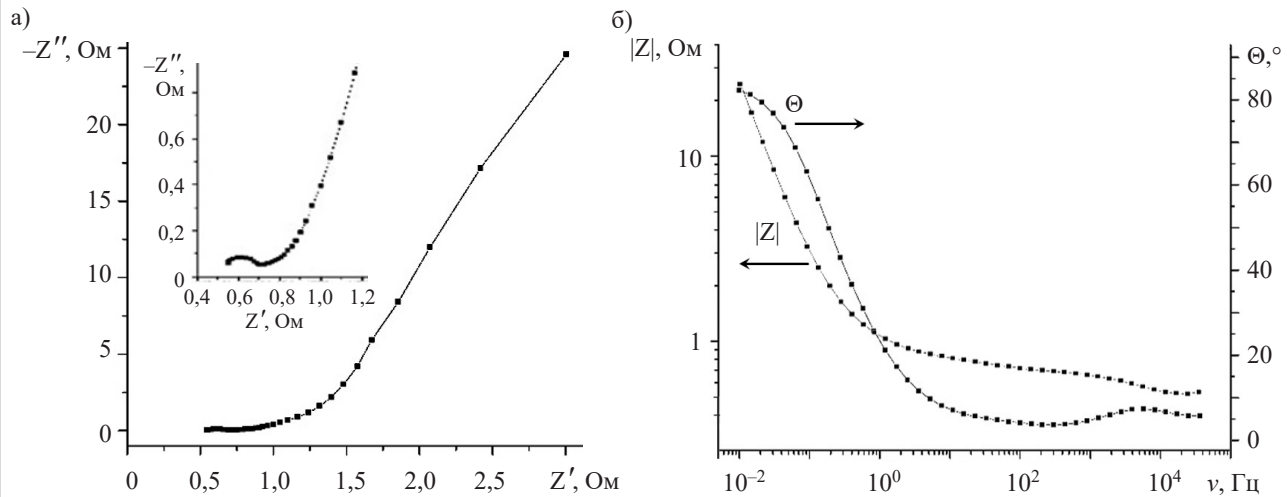
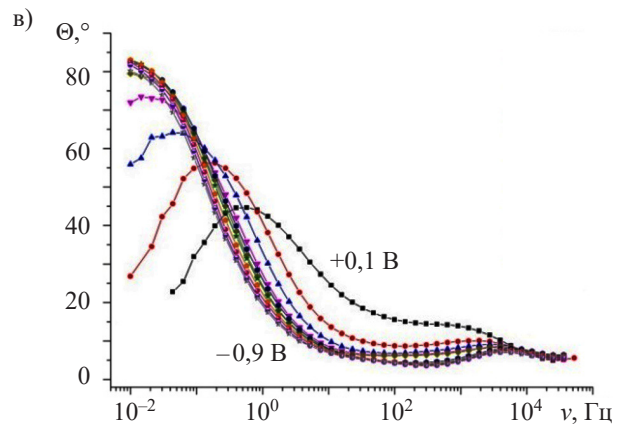


Рис. 6. Діаграми Найквіста (а) та Бодє-діаграми (б) для електродів з CSTR-36 у 0,7М-розчині $[C_2H_5]_4NBF_4$ в ацетонітрилі, отримані за $U = U_p \pm 0,5$ В

Параметри електричної еквівалентної схеми для зразка CSTR-36 у 0,7М-розчині $[C_2H_5]_4NBF_4$ в ацетонітрилі

R1	0,53462 Ом	C2	0,24137 мФ
CPE1-T	0,092823 Ом	R3	2,096 Ом
CPE1-P	0,76811 Ф	C3	0,24014 мФ
R2	0,27024 Ом	R _{SC}	0,16756 Ом

Результат дослідження вуглецевого матеріалу CSTR-36 у 0,7М-розчині $[C_2H_5]_4NBF_4$ в ацетонітрилі за допомогою імпедансної спектроскопії для різних електрохімічних потенціалів представлено на **рис. 5**.

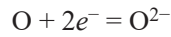
Оскільки значення діелектричної проникності ацетонітрилу суттєво менше ніж у води, в твердому тілі має спостерігатися більше зростання товщини області просторового заряду, й можна припустити, що проблема пов'язана з шунтуванням гельмгольцевої ємності ємністю області просторового заряду карбону. Для моделювання отриманих годографів у цьому випадку використовувалась аналогічна (як для матеріалів з водним електролітом) схема де Леві, модифікована паралельною ланкою $C_{SC} - R_{SC}$ відповідно до підходу Войта (рис. 5), де вона особливо актуальна з огляду на описані вище процеси.

На **рис. 6** представлено діаграму Найквіста та Бode-діаграми для зразка CSTR-36 в 0,7М-розчині $[C_2H_5]_4NBF_4$ в ацетонітрилі, отримані за того ж значення потенціалу, що і в дослідженні з водним розчином КОН: $U = U_p \pm 0,5$ В (U_p — рівноважний потенціал електрода відносно електрода порівняння). У **таблиці** наведені значення параметрів елементів, що входять до електричної еквівалентної схеми де Леві, що використовувалась для моделювання діаграм Найквіста та Бode.

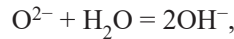
Аналіз залежності ємності області просторового заряду C_{SC} зразків, отриманої з електричної еквівалентної схеми, від прикладеного потенціалу в 30%-му водному розчині КОН показує, що при додатній поляризації спостерігається її зменшення, а при прикладанні від'ємної поляризації — збільшення. Такий процес призводить до певного шунтування гельмгольцевої ємності на цьому проміжку електродної поляризації. Наведене у таблиці значення ємності $C_2 = 0,241$ Ф відповідає вуглецевим матеріалам із високорозвиненою мікро- та мезопористою структурою, оскільки згідно з [9] ланка $CPE1 \parallel R_2$ в еквівалентній електричній схемі відповідає за протікання дифузійних процесів в транспортних порах, до яких відносять макро- та мезопори ПВМ, а елемент схеми $C_2 \parallel R_3 - C_3$ — за вказані процеси в мікропорах. Із даних моделювання годографів імпедансу видно, що $CPE1-P \approx 0,768$ Ф, що свідчить про ємнісний характер поведінки системи «електрод — електроліт».

Залежність ємності області просторового заряду C_{SC} від прикладеного потенціалу в 0,7М-розчині $[C_2H_5]_4NBF_4$ в ацетонітрилі відрізняється за поведінкою та за значеннями. У цьому випадку спостерігається збільшення цієї ємності. З відомої формули для диференційної ємності подвійного електричного шару межі розділу вуглецевого матеріалу з електролітом $1/C = 1/C_H + 1/C_{SC}$ можемо зробити висновок, що за високих значень ємності області просторового заряду C_{SC} диференційна ємність визначається значною мірою величиною ємності шару Гельмгольца. Такі результати дозволяють зробити ви-

сновок, що досліджуваний зразок має велику густину станів на рівні Фермі [13]. Незвична залежність ємності області просторового заряду C_{SC} від прикладеного потенціалу в 30%-му водному розчині КОН пояснюється реакцією адсорбованого кисню з водою на поверхні активованого вуглецевого матеріалу. В цьому випадку атоми кисню забирають з поверхні вуглецевого матеріалу два електрони:



і вступають в реакцію з молекулою води:



відповідним чином зменшуючи на поверхні електрода кількість основних носіїв заряду.

Висновки

Таким чином, дослідження електрохімічних систем з електролітами різної хімічної природи дозволили встановити вплив області об'ємного заряду в матеріалі електрода на ємнісні характеристики конденсатора. Ємнісний характер процесів на поверхні електрода в частотній області 0,1 — 10 Гц, який був встановлений на основі Бode-кривих, пов'язаний з адсорбцією на поверхні вугілля молекулярного кисню в 30%-му розчині КОН і орієнтаційною адсорбцією полярних молекул ацетонітрилу в 0,7-молярному розчині $[C_2H_5]_4NBF_4$. Значення питомої ємності, що становлять 125 Ф/г у КОН та 101 Ф/г у $[C_2H_5]_4NBF_4$, визначаються достатнім часом для формування подвійного електричного шару іонами K^+ на поверхні матеріалу електрода та протікання фарадеївських реакцій накопичення ОН-груп на поверхні вуглецю. Саме розмір іона та його гідратної оболонки є основним показником, що впливає на експлуатаційні параметри лабораторних зразків конденсаторного типу.

Отримані результати гальваностатичних досліджень дозволяють рекомендувати отриманий вуглецевий матеріал для виготовлення електродів суперконденсаторів.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Bi Z., Kong Q., Cao Y. et al. Biomass-derived porous carbon materials with different dimensions for supercapacitor electrodes: a review. *J. Mater. Chem. A.*, 2019., vol. 7, iss. 27, p. 16028–16045. <https://doi.org/10.1039/C9TA04436A>
2. Dianat N., Rahmanifar M.S., Noori A. et al. Polyaniline-lignin interpenetrating network for supercapacitive energy storage. *Nano Lett.*, 2021, iss. 21, p. 9485–9493. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.1c02843>
3. Zapata-Benabith Z., Castro C.D., Quintana G. Kraft lignin as a raw material of activated carbon for supercapacitor electrodes. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, 2022, iss.33, p. 7031–7047. <https://doi.org/10.1007/s10854-022-07884-9>
4. Wang J., Zhang X., Li Z. et al. Recent progress of biomass-derived carbon materials for supercapacitors. *Journal of Power Sources*, 2020, vol. 451, p. 227794. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.227794>
5. Li P., Yang C., Wu C. et al. Bio-based carbon materials for high-performance supercapacitors. *Nanomaterials*, 2022, vol. 12, iss. 17, p. 2931. <https://doi.org/10.3390/nano12172931>

6. Fischer J., Thümmeler K., Fischer S. et al. Activated carbon derived from cellulose and cellulose acetate microspheres as electrode materials for symmetric supercapacitors in aqueous electrolytes. *Energy Fuels*, 2021, vol. 35, iss.15, p. 12653–12665. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c01449>

7. Будзуляк І.М., Іванічок Н.Я., Рачій Б.І. та ін. Електрохімічні властивості нанопористого вуглецевого матеріалу у K^+ -вмісних водних електролітах. *Фізика і хімія твердого тіла*, 2015, т. 16, № 2, с. 341–346.

8. Ostafiychuk B. K., Budzulyak I. M., Kachmar A. I. et al. Effect of thermochemical modification of activated carbon materials on specific capacity of electrochemical capacitors. *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, 2018, vol. 16, no. 2, p. 303–312.

9. Рачій Б.І., Остафійчук Б.К., Будзуляк І.М. та ін. Вплив термохімічної обробки вуглецевих матеріалів на їх електрохімічні

властивості. *Журнал нано- та електронної фізики*, 2014, т. 6, №4, с. 04031(1) – 04031(6).

10. Стойнов З.Б., Графов Б.М., Савова-Стойнова Б., Елкін В.В. *Електрохімічний іміданс*. Москва, Наука, 1991, 336 с.

11. Barsoukov E., Macdonald J.R. *Impedance Spectroscopy. Theory, Experiment and Application*. Canada, Wiley interscience, 2005, 585 p.

12. de Levie R. On porous electrodes in electrolyte solutions: I. Capacitance effects. *Electrochimica Acta*, 1963, vol. 8, iss 10, p. 751–780. [https://doi.org/10.1016/0013-4686\(63\)80042-0](https://doi.org/10.1016/0013-4686(63)80042-0)

13. Mott N.F., Davis E.A. *Electronics Processes in NonCrystallin Materials*. Oxford, Clarendon Press, 1979, 590 p.

Дата надходження рукопису
до редакції 30.10 2022 р.

DOI: 10.15222/TKEA2022.4-6.52
UDC 538.971

I. V. SEMKIV, V. M. VASHCHYNSKYI, A. I. KASHUBA,
H. A. ILCHUK, M. V. SOLOVYOV

Ukraine, Lviv Polytechnic National University

E-mail: v.vashchynskyi@gmail.com

INFLUENCE OF ELECTROLYTE NATURE ON ELECTROCHEMICAL PROPERTIES OF CARBON MATERIAL OF PLANT ORIGIN

Non-aqueous electrolytes are advantageous for power sources due to the increase in the operating voltage since their electrochemical stability range is much wider. It should be noted that the capacitor's capacitance depends on the capacitance provided by the electrode material, expressed in F/g, while its voltage and resistance depend on the electrolyte. Therefore, it is very important to study the electrochemical properties of carbon material in aqueous and organic electrolytes and to determine the effect of the electrolyte on the capacitance of the capacitor formed on its basis.

The cathode mixture was made of porous carbon material obtained from biomass and a binding additive. Then, it was pressed onto a nickel grid with an area of 0,5 cm². A 30% aqueous solution of potassium hydroxide (KOH) and a 0,7-molar solution of tetraethyl ammonium tetrafluoroborate ($[C_2H_5]_4NBF_4$) in acetonitrile (CH_3CN) was used as the electrolyte. The measurements were carried out using two- and three-electrode schemes with a silver chloride reference electrode. Modeling impedance data to equivalent electrical circuits has assisted to establish the influence of the volume charge region in the electrode material on the capacitor's capacitive characteristics. The specific capacitance values of 125 F/g in KOH and 101 F/g in $[C_2H_5]_4NBF_4$ are determined by the electrolyte type used and the nature of salts and bases dissolved in it. The practical significance of the obtained results is the application of the developed methods for obtaining carbon material with developed micro- and mesoporous structures and improved physicochemical properties.

Keywords: capacitor systems, porous carbon material, aqueous and organic electrolytes, capacitance.

REFERENCES

1. Bi Z., Kong Q., Cao Y. et al. Biomass-derived porous carbon materials with different dimensions for supercapacitor electrodes: a review. *J. Mater. Chem. A.*, 2019., vol. 7, iss. 27, pp. 16028–16045. <https://doi.org/10.1039/C9TA04436A>

2. Dianat N., Rahmanifar M.S., Noori A. et al. Polyaniline-lignin interpenetrating network for supercapacitive energy storage. *Nano Lett*, 2021, iss. 21, pp. 9485–9493. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.1c02843>

3. Zapata-Benabith Z., Castro C.D., Quintana G. Kraft lignin as a raw material of activated carbon for supercapacitor electrodes. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 6 2022, iss.33, pp. 7031–7047. <https://doi.org/10.1007/s10854-022-07884-9>

4. Wang J., Zhang X., Li Z. et al. Recent progress of biomass-derived carbon materials for supercapacitors. *Journal of Power*

Sources, 2020, vol. 451, pp. 227794. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.227794>

5. Li P., Yang C., Wu C. et al. Bio-based carbon materials for high-performance supercapacitors. *Nanomaterials*, 2022, vol. 12, iss. 17, pp. 2931. <https://doi.org/10.3390/nano12172931>

6. Fischer J., Thümmeler K., Fischer S. et al. Activated carbon derived from cellulose and cellulose acetate microspheres as electrode materials for symmetric supercapacitors in aqueous electrolytes. *Energy Fuels*, 2021, vol. 35, iss.15, pp. 12653–12665. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c01449>

7. Budzulyak I.M., Ivanichok N.Ya., Rachiya B.I. et al. Electrochemical Properties of Nanoporous Carbon Material in K^+ -containing Aqueous Electrolytes. *Physics and Chemistry of Solid State*, 2015, vol. 16, no. 2, pp. 341–346. (Ukr)

8. Ostafiychuk B. K., Budzulyak I. M., Kachmar A. I. et al. Effect of thermochemical modification of activated carbon materials

on specific capacity of electrochemical capacitors. *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, 2018, vol. 16, no. 2, pp. 303–312.

9. Rachiy B.I., Ostafiychuk B.K., Budzulyak I.M. et al. The effect of thermochemical treatment of carbon materials on their electrochemical properties. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 2014, vol. 6, no. 4, pp. 04031(1)–04031(6). (Ukr)

10. Stoynov Z.B., Grafov B.M., Savova-Stoynova B., Yolkin V.V. *Elektrokhimicheskiy Impedans* [Electrochemical impedance]. Moscow, Nauka, 1991, 336 p. (Rus)

11. Barsoukov E., Macdonald J.R. *Impedance Spectroscopy. Theory, Experiment and Application*. Canada, Wiley Interscience, 2005, 585 p.

12. de Levie R. On porous electrodes in electrolyte solutions: I. Capacitance effects. *Electrochimica Acta*, 1963, vol. 8, iss 10, pp. 751–780. [https://doi.org/10.1016/0013-4686\(63\)80042-0](https://doi.org/10.1016/0013-4686(63)80042-0)

13. Mott N.F., Davis E.A. *Electronics Processes in NonCrystallin Materials*. Oxford, Clarendon Press, 1979, 590 p.

Опис статті для цитування:

Семків І. В., Ващинський В. М., Кашуба А. І., Ільчук Г. А., Соловйов М. В. Вплив природи електроліту на електрохімічні властивості вуглецевого матеріалу рослинного походження. *Технологія и конструирование в электронной аппаратуре*, 2022, № 4–6, с. 52–58. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2022.4-6.52>

Cite the article as:

Semkiv I. V., Vashchynskiy V. M., Kashuba A. I., Ilchuk H. A., Solovyov M. V. Influence of electrolyte nature on electrochemical properties of carbon material of plant origin. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2022, no. 4–6, pp. 52–58. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2022.4-6.52>

НОВІ КНИГИ

НОВІ КНИГИ

Матвійків М. Д., Васьків Г. М., Вус Б. С., Матвійків С. О. Матеріали для електронних пристроїв.— Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2021.

Викладено основні відомості про матеріали та пов'язані з ними технології, які використовуються в галузі створення електронних пристроїв. Розглянуто властивості матеріалів, а також технології створення та використання матеріалів.

Для студентів закладів вищої освіти, які навчаються за спеціальностями, пов'язаними з використанням матеріалів та технологій. Підручник розрахований на широке коло читачів, які цікавляться сучасними матеріалами, технологіями та пристроями.



ПОРІВНЯННЯ НАДІЙНОСТІ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ГЕНЕРАТОРНИХ МОДУЛІВ З РІЗНИМИ СХЕМАМИ СПОЛУЧЕННЯ ТЕРМОЕЛЕМЕНТІВ

На основі немонотонно-дифузійного закону розподілу часу відмов запропоновано аналітичний вираз закону розподілу часу відмов окремого термоелемента, який докорінно відрізняється від традиційно використовуваного простого експоненціального закону зі сталою інтенсивністю відмов. Обчислено середнє напрацювання на відмову, 95%-й ресурс та еквівалентну інтенсивність відмов термоелектричних генераторних модулів з послідовно-паралельним та паралельно-послідовним сполученням термоелементів, та проведено їх порівняння з відповідними показниками модулів з суто послідовним електричним сполученням термоелементів.

Ключові слова: надійність, показники надійності, контакти, схеми сполучення термоелементів.

Одним з ключових питань якості та надійності мікроелектронних і термоелектричних пристроїв є питання якості їхніх контактних систем і вузлів. У термоелектриці основні фізичні явища мають саме контактну природу, а основний об'єм напівпровідникового матеріалу термоелектричних гілок є пасивним. Якість контактної системи відіграє особливу роль в термоелектриці. З точки зору споживчих характеристик термоелектричних генераторних і охолоджувальних модулів особливу роль відіграють електричний та тепловий опори контакту «метал — напівпровідник». Питанням зниження електричного контактного опору приділяється значна увага: його величина має бути тим меншою, чим менша довжина термоелектричної гілки вздовж напрямку градієнта температури, й очевидно, що це є особливо важливим для мініатюрних термоелектричних пристроїв.

У літературі розглянуто досить багато способів зниження контактного опору [1—5], зокрема механічна та хімічна обробка поверхні напівпровідника, вибір матеріалу припою й антидифузійного контактного шару, електрохімічне або суто хімічне (безструмове) нанесення антидифузійних шарів, вибір режиму паяння тощо. Окрім того, значна увага приділяється очищенню контактних поверхонь від оксидних плівок, наприклад шляхом бомбардування поверхні іонами інертного газу. Інтенсивно досліджуються процеси, які проходять у контактних структурах при їх старінні за підвищеної температури, а також зміни фазового складу та структури перехідних контактних шарів. Ці зміни з часом ведуть до утворення інтерметалідів, наприклад телуридів нікелю, наявність і зростання яких зумовлює не лише збільшення електричного та теплового контактних опорів, а й появу порожнин і тріщин у перехідних контактних шарах, які призводять до механічного руйнування контактних структур і розриву

електричних кіл термоелементів, а отже, й термоелектричних модулів в цілому. Особливу роль ці процеси відіграють у генераторних термоелектричних модулях, оскільки внаслідок закону Ареніуса в них вони проходять з більшою швидкістю.

Іншим напрямком підвищення надійності термоелектричних генераторних модулів відносно явищ, які ведуть до розриву електричних кіл термоелементів, є підвищення міцності термоелектричних матеріалів, з одного боку, і зниження механічних напруг у термоелектричних гілках, з іншого. Збільшення міцності термоелектричних матеріалів досягається зміною технології їх вирощування, зокрема заміною зонного плавлення у циліндричних контейнерах на вирощування методом Бріджмена у щільних контейнерах з плоскими щілинами [6]. Цей шлях призводить також і до зменшення витрати матеріалу на виготовлення термоелектричних гілок. Однак при цьому погіршується притаманна зонному плавленню висока однорідність розподілу значень термоелектричних параметрів уздовж зливка. Зниження механічних напруг у термоелектричних гілках досягається спеціальним вибором геометрії термоелектричних гілок і способу їх розташування [7], обмеженням їх можливого переміщення шляхом застосування спеціальних каркасів [8], узгодження між собою параметрів термоелектричного матеріалу, зокрема таких як міцність, коефіцієнт лінійного розширення, модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона та теплопровідність [9], або шляхом нанесення спеціального зміцнювального покриття [10].

Але існує й інший важливий напрямок підвищення надійності термоелектричних генераторних модулів — застосування замість найбільш ненадійної суто послідовної схеми електричного сполучення термоелементів інших варіантів, а саме послідовно-

паралельних та паралельно-послідових схем, які передбачають резервування. Це питання побіжно розглянуто у монографії [11] і більш детально у роботах [12—15]. Основним недоліком цих досліджень є застосування у процесі розрахунків “готових”, узятих з літератури, значень ймовірностей збереження цілісності термоелектричних гілок і контактів або сталих значень відповідної інтенсивності відмов.

Метою цього дослідження є порівняння стандартизованих показників надійності термоелектричних генераторних модулів з послідовно-паралельною та паралельно-послідовою схемами електричного сполучення термоелементів за даними ресурсних випробувань термоелектричних генераторних модулів із суто послідовною схемою електричного сполучення термоелементів.

Методика досліджень

Із загальних міркувань теорії надійності, математичною базою якої виступає теорія ймовірності, відомо, що одним зі способів створення надійних систем з ненадійних компонентів є резервування. В процесі створення термоелектричних генераторних модулів (ТЕГМ) воно може здійснюватись шляхом використання замість суто послідовної схеми електричного сполучення термоелементів послідовно-паралельної або паралельно-послідовної схеми. Як правило, такого роду схеми розробляються та використовуються для того, щоб відмова одного або декількох термоелементів не призвела до виходу з ладу генераторного модуля в цілому.

Найчастіше відмова термоелемента стається в разі розриву його електричного кола безпосередньо у термоелектричній напівпровідниковій гілці або у контактній області. Такі розриви можуть бути миттєвими (наприклад, за наявності підвищених механічних навантажень) або поступовими внаслідок деградації як матеріалу гілок, так і контактної структури (головним чином, перехідних контактних шарів) під впливом одночасної дії градієнта температури й електричного струму. Тому для визначення ресурсних показників ТЕГМ з довільною схемою електричного сполучення термоелементів в разі наявності поступово діючих факторів, що зумовлюють розрив електричного кола термоелемента, необхідно знати часову залежність ймовірності безвідмовної роботи термоелемента. Як правило, для цього пропонується найпростіша експоненціальна залежність [11, с. 21] $P(t) = \exp(-\lambda t)$, (1) де t — час; λ — інтенсивність відмов.

Однак, як було показано нами у [15], істотно краще використовувати немонотонно-дифузійний закон, згідно з яким часова залежність ймовірності безвідмовної роботи термоелектричного генераторного модуля визначається співвідношенням

$$P(t) = \Phi_0 \left(\frac{1-t/\mu}{v\sqrt{t/\mu}} \right) - \exp \frac{2}{v^2} \Phi_0 \left(\frac{-1-t/\mu}{v\sqrt{t/\mu}} \right), \quad (2)$$

де $\Phi_0(z) = 0,5 \operatorname{erf}(\sqrt{2}z/2) + 0,5$;

$\operatorname{erf}(\dots)$ — так званий інтеграл похибок;

μ — середнє напрацювання на відмову;

v — параметр, який явним чином характеризує розсіювання значень швидкості відносної деградації параметрів ТЕГМ.

Наведений закон був отриманий співробітниками Інституту проблем математичних машин НАН України і стандартизований у ДСТУ 3004-95. «Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними», ДСТУ 3433-96 (ГОСТ 27.005-97) «Надійність техніки. Моделі відмов. Основні положення». Алгоритм визначення параметрів закону за даними ресурсних випробувань деталізований у національному стандарті України «Надійність техніки. Оцінювання та прогнозування надійності за результатами випробувань і (або) експлуатації в умовах малої статистики відмов».

Для використання закону (2) необхідно за результатами ресурсних випробувань знайти його параметри, які б відповідали повній відмові модулів. Для цього використаємо закон Вейбула

$$V = V_0 \exp \left[- (t / \tau_d)^{\delta_d} \right], \quad (3)$$

де початкове значення V_0 якогось з нормованих параметрів, наприклад потужності, параметр масштабу τ_d і параметр форми δ_d для кожного модуля є своїми, і за формулою

$$t_f = \tau_d \left[-\ln(1 - \delta_N) \right]^{1/\delta_d}, \quad (4)$$

задаючи відносну втрату потужності δ_N , визначимо прогнозований час t_f повної відмови кожного модуля, поклавши $\delta_N = 0,9$, оскільки прийняти $\delta_N = 1$ ми не можемо. Тобто таким, що повністю відмовив, вважатимемо ТЕГМ, який втратив 90% початкової вихідної потужності.

Методику ресурсних випробувань, на основі яких виконувалось прогнозування, детально описано у [16].

Результати проведених обчислень наведено у таблиці.

Прогнозована часова залежність ймовірності безвідмовної роботи термоелектричних генераторних модулів з суто послідовною схемою сполучення термоелементів стосовно розриву їхнього електричного кола

Напрацювання, 10 ⁴ год	1,075	1,285	1,385	1,389	1,654	3,163	10,12	34,23	504
Ймовірність безвідмовної роботи	8/9	7/9	2/3	5/9	4/9	1/3	2/9	1/9	0

Згладжування даних таблиці методом найменших квадратів дало такі значення параметрів закону (2): $v = 2,276$, $\mu = 7,969 \cdot 10^4$ год, при цьому значення 95%-го ресурсу склало $3,967 \cdot 10^3$ год, а еквівалентна інтенсивність відмов $\lambda = 2,56 \cdot 10^{-5}$ год. Сума квадратів відхилень табличних даних від апроксимувальної кривої склала 0,085. Щодо відносно невеликого отриманого значення 95%-го ресурсу слід зазначити, що протягом ресурсних випробувань сталась відмова лише одного модуля з 9, і вона, судячи з характеру часової залежності вихідної потужності, сталась наприкінці випробувань саме внаслідок руйнування контактної структури протягом короткого часу. Від початку випробувань при цьому минуло 9720 год, тож відносна похибка прогнозування за деградаційною кривою складає близько 10,6%, що цілком прийнятно. А знаючи часову залежність ймовірності безвідмовної роботи генераторного модуля з суто послідовною схемою електричного сполучення термоелементів в цілому відносно дій або впливів, які ведуть до порушення цілісності електричних кіл термоелементів, неважко знайти і часову залежність безвідмовної роботи окремого термоелемента. Справді, за суто послідовної схеми електричного сполучення термоелементів повна відмова ТЕГМ в цілому настає в разі розриву електричного кола хоча б одного або декількох термоелементів. Тому за теоремою множення ймовірностей ймовірність безвідмовної роботи термоелемента дорівнює

$$P = \left[\Phi_0 \left(\frac{1-t/\mu}{v\sqrt{t/\mu}} \right) - \exp \frac{2}{v^2} \Phi_0 \left(\frac{-1-t/\mu}{v\sqrt{t/\mu}} \right) \right]^{1/N}, \quad (5)$$

де N — кількість термоелементів у термоелектричному генераторному модулі.

З врахуванням наведених вище параметрів закону (2) при $N = 128$ було отримано представлену на **рис. 1** часову залежність P у вигляді $P(x)$, де $x \equiv t/\mu$ (до речі, ця залежність дуже нагадує криву виживання людських популяцій).

Як видно з рис. 1, спочатку ймовірність безвідмовної роботи досить швидко знижується, що відповідає періоду припрацювання, коли відбраковують-

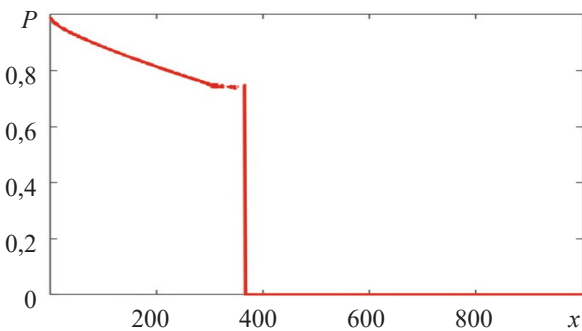


Рис. 1. Часова залежність ймовірності безвідмовної роботи одиничного термоелемента

ся ТЕГМ, а отже, і термоелементи з істотними технологічними дефектами (найімовірніше, дефектами контактних структур), причому цей період відносно короткий. Потім настає відносно довгий “корисний” період, який з врахуванням знайденого значення $\mu = 7,969 \cdot 10^4$ год дорівнює приблизно $3,03 \cdot 10^7$ год, але тут часова залежність ймовірності безвідмовної роботи відрізняється від закону (1), після чого настають масові відмови, які теж відбуваються протягом дуже короткого проміжку часу. Часову залежність ймовірності безвідмовної роботи одного термоелемента, знайдену на підставі результатів ресурсних випробувань ТЕГМ з суто послідовним електричним сполученням термоелементів, використаємо для визначення ресурсних показників генераторних модулів з послідовно-паралельним та паралельно-послідовним сполученням термоелементів.

Схема з послідовно-паралельним сполученням термоелементів

Із загальних міркувань зрозуміло, що найбільш надійною щодо чинників, які ведуть до розриву електричного кола термоелемента, є схема, у якій термоелементи сполучено суто паралельно. Але така схема не застосовується через те, що електрична напруга, яку здатен розвинути один термоелемент, занадто мала для практичного застосування. Тому застосовують послідовно-паралельну схему, в якій паралельно сполучаються ряди послідовно з'єднаних термоелементів. Оскільки працездатність такої схеми є подією, протилежною повній непрацездатності схеми, знайдемо спочатку її ймовірність. Послідовний ряд з N термоелементів є працездатним, коли працездатні всі його елементи, тому ймовірність його непрацездатного стану дорівнює $1 - P^N$. Отже, оскільки своєю чергою схема з M таких паралельних рядів непрацездатна тоді, коли вони всі непрацездатні, ймовірність непрацездатного стану цієї схеми визначається як

$$Q_1 = (1 - P^N)^M, \quad (6)$$

отже, ймовірність її працездатного стану дорівнює

$$P_1 = 1 - (1 - P^N)^M. \quad (7)$$

Середнє напрацювання такої схеми на відмову дорівнює

$$MTBF = \int_0^{\infty} P_1 dt, \quad (8)$$

а γ -відсотковий ресурс визначається як час, за якого ймовірність P_1 стає рівною $\gamma/100$.

Еквівалентна інтенсивність відмов такої схеми визначається як величина, обернена часу, за якого ймовірність P_1 стає рівною $1/e$, тобто $1/2,71828$.

Графіки залежності $MTBF$, 95%-го ресурсу та еквівалентної інтенсивності відмов від N для різних значень M наведено на **рис. 2**. Тут видно, що резер-

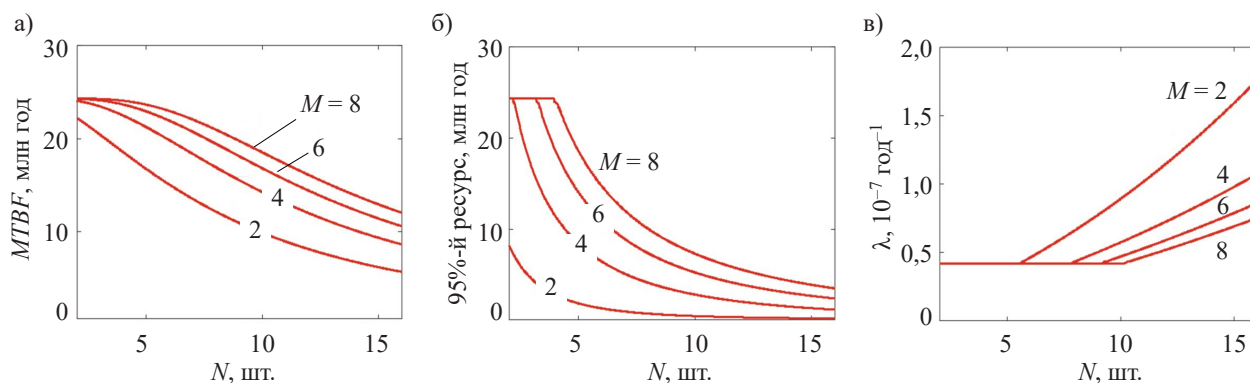


Рис. 2. Залежності середнього напрацювання на відмову (а), 95%-го ресурсу (б) та еквівалентної інтенсивності відмов (в) термоелектричних генераторних модулів з послідовно-паралельною схемою сполучення термоелементів від кількості N термоелементів у ряду за різної кількості M паралельних рядів (вказано на рисунках)

ування істотно підвищує ресурсні показники термоелектричних генераторних модулів. Очевидно, що зі збільшенням кількості термоелементів у ряду величина $MTBF$ та 95%-й ресурс ТЕГМ будуть зменшуватись, еквівалентна інтенсивність відмов зростатиме, і навпаки. Виходить, що застосувавши замість схеми зі 128 суто послідовно сполучених термоелементів схему, яка містить, наприклад, 8 паралельних рядів з 16 послідовно сполучених термоелементів, можна збільшити середнє напрацювання на відмову з 79690 год до 12 млн год, тобто у 150 разів, 95%-й ресурс з 3697 год до 3 млн год, тобто у понад 800 разів, а еквівалентну інтенсивність відмов знизити з $2,56 \cdot 10^{-5}$ до приблизно $8 \cdot 10^{-8}$ год⁻¹, тобто у 320 разів.

Схема з паралельно-послідовним сполученням термоелементів

Розглянемо термоелектричний генераторний модуль, що складається з N послідовно сполучених груп термоелементів, кожна з яких містить M паралельно сполучених термоелементів. Такий ТЕГМ буде працездатним, якщо всі N груп працездатні. Ймовірність працездатного стану такої групи дорівнює

$$P_g = 1 - (1 - P)^M, \tag{9}$$

тому ймовірність працездатного стану термоелектричного генераторного модуля в цілому дорівнює

$$P_2 = [1 - (1 - P)^M]^N. \tag{10}$$

Тепер стандартизовані показники надійності термоелектричного генераторного модуля знаходяться так само, як і для попередньої схеми, але замість ймовірності P_1 використовується P_2 . Результати відповідних розрахунків наведено на **рис. 3**.

Аналіз показує, що використовуючи замість 128 суто послідовно сполучених термоелементів 16 послідовно сполучених груп, кожна з яких складається з 8 паралельно сполучених термоелементів, можна підвищити середнє напрацювання на відмову до 24 млн год, тобто у 300 разів, 95%-й ресурс до 15 млн год, тобто у 4000 разів, а еквівалентну інтенсивність відмов знизити до $4 \cdot 10^{-8}$ год⁻¹, тобто у 640 разів. Таким чином, паралельно-послідовна схема є надійнішою не тільки за схему з суто послідовно сполученими термоелементами, але й за послідовно-паралельну.

Висновки

Закон розподілу часу відмов одиничного термоелемента, отриманий на основі прогнозування часу

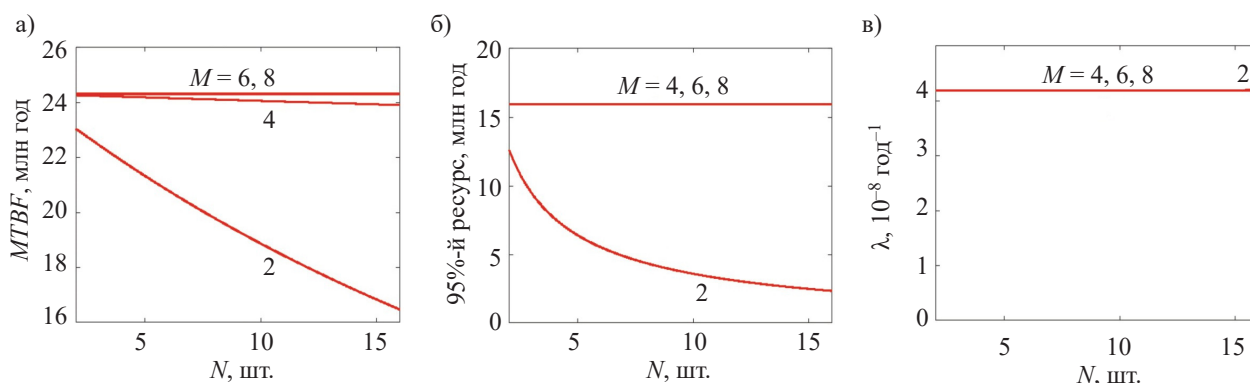


Рис. 3. Залежності середнього напрацювання на відмову (а), 95%-го ресурсу (б) та еквівалентної інтенсивності відмов (в) термоелектричних генераторних модулів з паралельно-послідовною схемою сполучення термоелементів від кількості N термоелементів у ряду за різної кількості M паралельних рядів (вказано на рисунках)

повної відмови термоелектричних генераторних модулів з суто послідовною схемою сполучення термоелементів, дозволив визначити стандартизовані показники надійності термоелектричних генераторних модулів з послідовно-паралельними та паралельно-послідовними схемами електричного сполучення термоелементів, які передбачають резервування. Встановлено, що ці схеми забезпечують суттєво, у сотні разів, вищі показники надійності термоелектричних генераторних модулів, ніж суто послідовне електричне сполучення. При цьому паралельно-послідовна схема є в рази надійнішою за послідовно-паралельну.

Таким чином, наведена методика розрахунків дозволяє наближено спрогнозувати надійність термоелектричних генераторних модулів з будь-яким сполученням термоелементів і вибрати таку схему, яка істотно підвищує надійність завдяки резервуванню. Однак питання про те, як при цьому не знизити істотним чином, наприклад, вихідну потужність модуля, потребує додаткового поглибленого дослідження.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Semenyuk V. Effect of electrical contact resistance on the performance of cascade thermoelectric coolers. *J. Electron. Mater.*, 2019, vol. 48, p. 1870–1876. <https://doi.org/10.1007/s11664-018-6785-5>
2. Gupta R.P. Practical contact resistance measurement method for bulk Bi₂Te₃-based thermoelectric devices. *J. Electron. Mater.*, 2013, vol. 42, p. 1608–1612. <https://doi.org/10.1007/s11664-013-2806-6>
3. Сабо С.П. Технологія халькогенних термоелементів. Фізичні основи. Розділ 3. Технологія комутації віток термоелемента. Продовження. 3.5. Електрохімічна металізація. *Термоелектрика*, 2011, № 1, с. 26–35.
4. Aswal D.K., Basu R., Singh A. Key issues in development of thermoelectric power generators: high figure-of-merit materials and their highly conducting interfaces with metallic interconnects, *Energy Convers. Manag.*, 2016, vol. 114, p. 50–67. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.01.065>
5. He R., Shierning C., Nielsch K. Thermoelectric devices: a review of devices, architectures and contact optimization. *Adv. Mater. Technol.*, 2018, vol. 3, iss. 4, 1700256. <https://doi.org/10.1002/admt.201700256>
6. Горський П.В., Разінков В.В. Вплив геометрії контейнера на орієнтацію та ступінь паралельності площин спайності монокристалів телуриду вісмуту. *Термоелектрика*, 2018, №5, с. 22–32.
7. Karri N.K., Mo C. Reliable thermoelectric module design under opposing requirements from structural and thermoelectric considerations. *J. Electron. Mater.*, 2018, p. 3127–3135. <https://doi.org/10.1007/s11664-017-5934-6>
8. Yan Yi. *Vertical self-defined thermoelectric legs for use in thin-film micro thermo electric generators (μ-TEG)*. Ph.D. diss., Department of Electrical Engineering, University of Michigan, 2019, 216 p.
9. Kim H. S., Wang T., Liu W., Ren Z. Engineering thermal conductivity for balancing between reliability and performance of bulk thermoelectric generators. *Adv. Funct. Mater.*, 2016, vol. 26, p. 3678–3686. <https://doi.org/10.1002/adfm.201600128>
10. Гришин В.И., Котлов Д.В. *Способ изготовления полупроводниковых ветвей для термоэлектрического модуля и термоэлектрический модуль. Изобретение № 216.012.С0Е3*, 10.05.2014.
11. Котырло Г.К., Лобунец Ю.Н. *Расчет и конструирование термоэлектрических генераторов и тепловых насосов. Справочник*. Киев, Наукова думка, 1980, 328 с.
12. Львович Я.Е. *Теоретические основы конструирования, технологии и надежности РЭА*. Москва, Радио и связь, 1986, 192 с.
13. Левин Б.Р. *Элементы теории надежности. Учебное пособие. Выпуск первый*. Москва, Редакционно-издательский отдел ВЗЭИС, 1969, 144 с.
14. Анатичук Л.І., Лусте О.Я. Вплив деградації на ресурсні можливості термоелектричних матеріалів. *Термоелектрика*, 2017, № 5, 84–96.
15. Горський П.В. Особливості визначення показників надійності термоелектричних генераторних модулів. *Труди МНПК «Сучасні інформаційні та електронні технології»*, Україна, Одеса, 2022, с. 38–39.
16. Горський П.В. Особливості визначення показників надійності термоелектричних генераторних модулів за експериментальними даними. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2022, №1–3, с. 50–56. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2022.1-3.50>

Дата надходження рукопису до редакції 19.07 2022 р.

Опис статті для цитування:

Горський П. В. Порівняння надійності термоелектричних генераторних модулів з різними схемами сполучення термоелементів. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2022, № 4–6, с. 59–64. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2022.4-6.59>

Cite the article as:

Gorskyi P. V. Comparison of reliability of thermoelectric generator modules with different schemes for connecting thermoelements *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature*, 2022, no. 4–6, pp. 59–64. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2022.4-6.59>

COMPARISON OF RELIABILITY OF THERMOELECTRIC GENERATOR MODULES WITH DIFFERENT SCHEMES FOR CONNECTING THERMOELEMENTS

The study compares reliability indicators of thermoelectric generator modules using the nonmonotonic-diffusion law of failure time distribution. The authors use the law to propose for the first time an analytical expression of the failure time distribution of an individual thermoelement, which fundamentally differs from the traditional simple exponential law with a constant failure intensity.

The law is used to calculate the mean time between failures (MTBF), the 95% resource and equivalent failure rate of thermoelectric generator modules with series-parallel and parallel-series connection of thermocouples. Considered are the variants of schemes with different number of elements in rows and different number of rows for serial-parallel circuit and with different number of sequential groups and elements in a group for parallel-serial circuit. Coefficients of increase of the average failure time, 95% resource and coefficients of decrease of the equivalent failure intensity for a purely series connection of thermocouples are determined for the considered thermocouple schemes. It is established that these indicators can be improved by more than three orders of magnitude.

Keywords: reliability, reliability indicators, contacts, schemes of thermocouples connection.

REFERENCES

1. Semenyuk V. Effect of electrical contact resistance on the performance of cascade thermoelectric coolers. *J. Electron. Mater.*, 2019, vol. 48, p. 1870–1876. <https://doi.org/10.1007/s11664-018-6785-5>
2. Gupta R.P. Practical contact resistance measurement method for bulk Bi₂Te₃-based thermoelectric devices. *J. Electron. Mater.*, 2013, vol. 42, p. 1608–1612. <https://doi.org/10.1007/s11664-013-2806-6>
3. Sabo E.P. Technology of khalcogene thermoelements. Physical backgrounds. Section 3. Technology of connection of thermoelement legs. Continue. 3.5. Electrochemical metallization. *Thermoelectricity*, 2011, no. 1, pp. 26–35.
4. Aswal D.K., Basu R., Singh A. Key issues in development of thermoelectric power generators: high figure-of-merit materials and their highly conducting interfaces with metallic interconnects, *Energy Convers. Manag.*, 2016, vol. 114, p. 50–67. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.01.065>
5. He R., Shierning C., Nielsch K. Thermoelectric devices: a review of devices, architectures and contact optimization. *Adv. Mater. Technol.*, 2018, vol. 3, iss. 4, 1700256. <https://doi.org/10.1002/admt.201700256>
6. Gorskyi P.V., Razin'kov V.V. The impact of container geometry on the orientation and parallelism rate of the cleavage planes of the bismuth telluride single crystals. *Thermoelectricity*, 2018, no. 5, pp. 22–32.
7. Karri N.K., Mo C. Reliable thermoelectric module design under opposing requirements from structural and thermoelectric considerations. *Journal of Electronic Materials*, 2018, vol. 47, pp. 3127–3135. <https://doi.org/10.1007/s11664-017-5934-6>
8. Yan Yi. *Vertical self-defined thermoelectric legs for use in thin-film micro thermo electric generators (μ -TEG)*. Ph.D. diss., Department of Electrical Engineering, University of Michigan, 2019, 216 p.
9. Kim H. S., Wang T., Liu W., Ren Z. Engineering thermal conductivity for balancing between reliability and performance of bulk thermoelectric generators. *Adv. Funct. Mater.*, 2016, vol. 26, pp. 3678–3686. <https://doi.org/10.1002/adfm.201600128>
10. Grishin V.I., Kotlov D.V. *Method for manufacturing semiconductor legs for thermoelectric module and thermoelectric module. Patent WO/2015/126272*. (2015).
11. Kotyrla G.K., Lobunets Yu.N. *Raschet i konstruirovaniye termoelektricheskikh generatorov i teplovyykh nasosov. Spravochnik [Calculation and design of thermoelectric generators and heat pumps. Handbook]*. Kyiv, Naukova Dumka, 1980, 328 p. (Rus)
12. Lvovich Ya.Ye. *Teoreticheskiye osnovy konstruirovaniya, tekhnologii i nadezhnosti REA [Theoretical foundations of design, technology and reliability of electronic equipment]*. Moscow, Radio and communication, 1986, 192 p. (Rus)
13. Levin B.R. *Elementy teorii nadezhnosti. Uchebnoye posobiye. Vypusk pervyy. [Elements of the theory of reliability. Tutorial. Iss. 1]*. Moscow, Editorial and publishing department of VZEIS, 1969, 144 p. (Rus)
14. Anatyshuk L.I., Luste O.J. Impact of degradation on the resource capabilities of thermoelectric materials. *Thermoelectricity*, 2017, no. 5, pp. 84–96.
15. Horskyy P. V. Particular aspects of determining reliability indicators of thermoelectric generator modules. *Proceedings of the Int. Scient.-Pract. Conf. "Modern Information and Electronic Technologies"*, Ukraine, Odesa, 2022, pp. 38–39. (Ukr)
16. Gorskyi P. V. Particular aspects of determining reliability indicators of thermoelectric generator modules using experimental data. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2022, no. 1–3, pp. 50–56. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2022.1-3.50> (Ukr)

Д. т. н. М. М. ВАКІВ

Україна, м. Львів,

НВП «Електрон-Карат» — дочірнє підприємство ПрАТ «Концерн-Електрон»

E-mail: office@carat.electron.ua

ДО 50-РІЧЧЯ НАУКОВО-ВИРОБНИЧОГО ПІДПРИЄМСТВА «ЕЛЕКТРОН-КАРАТ»

Стаття присвячується Науково-виробничому підприємству «Електрон-Карат», яке було створено у 1972 році як Львівський науково-дослідний інститут матеріалів — головне підприємство галузі з розробки новітніх матеріалів. Сьогодні НВП «Електрон-Карат» є галузевим науково-технологічним закладом України, діяльність якого спрямована на пошук, дослідження, розробку технологій та дрібносерійне виробництво матеріалів функціональної електроніки, зокрема нано-, мікро-, опто-, акусто-, кріо-, магнето- та квантової електроніки. НВП «Електрон-Карат» — атестована наукова організація, внесена до державного реєстру. Частина лабораторій підприємства визнано національним надбанням України.

Ключові слова: НВП «Електрон-Карат», матеріали функціональної електроніки, технології вирощування, монокристали.

22 листопада 2022 року виповнюється 50 років від дня заснування Науково-виробничого підприємства «Електрон-Карат».

Свою історію підприємство розпочинає від моменту створення у 1972 році Львівського науково-дослідного інституту матеріалів, як головного підприємства галузі з розробки новітніх матеріалів. У 1986 році підприємство реорганізовано у Науково-

виробниче об'єднання «Карат», яке у 1991 році увійшло до складу ПрАТ «Концерн-Електрон» як дочірнє підприємство. У 2017 році НВП «Карат» змінило найменування на НВП «Електрон-Карат».

Сьогодні НВП «Електрон-Карат» є галузевим науково-технологічним закладом України, діяльність якого спрямована на пошук, дослідження, розробку технологій та дрібносерійне виробництво матеріалів функціональної електроніки, зокрема нано-, мікро-, опто-, акусто-, кріо-, магнето- та квантової електроніки.

НВП «Електрон-Карат» є атестованою науковою організацією, яка внесена до державного реєстру. Частина лабораторій підприємства визнано національним надбанням України. На підприємстві успішно діють дві філії — «Мікротех-Карат» та «Мікроелектроніка».

Одним з головних напрямків розробок науково-технологічних підрозділів НВП «Електрон-Карат» є технології вирощування монокристалічних матеріалів (об'ємних та плівкових) та їх механічного оброблення. Підприємство бере участь у низці державних науково-технологічних програм, проводить фундаментальні дослідження за проектами Національного фонду досліджень та виконує міжнародні договори про наукове та комерційне співробітництво з науковими установами інших країн. Крім того, НВП «Електрон-Карат» є співвиконавцем у європейських наукових проєктах «IMAGE» та «MEGA», які отримали фінансування від програми ЄС з досліджень та інновацій «Horizon 2020» в рамках грантових угод Марії Склодовської-Кюрі та, починаючи з 2023 року, наукового проєкту «TERAHERTZ» в рамках програми ЄС «Horizon Europe».



Генеральний директор НВП «Електрон-Карат», дійсний член Академії технологічних наук України, Заслужений діяч науки і техніки України, доктор технічних наук, професор Микола Михайлович Ваків

НАУКОВО-ТЕХНОЛОГІЧНІ НАПРЯМКИ НВП «ЕЛЕКТРОН-КАРАТ»

- Виготовлення монокристалічних епітаксійних шарів складних оксидів методом рідинно-фазної епітаксії
- Одержання епітаксійних напівпровідникових структур на основі сполук A^3B^5 методами МОС-гідридної та рідинно-фазної епітаксії
- Прецизійне механічне оброблення монокристалічних матеріалів
- Вакуумне нанесення металевих та діелектричних покриттів
- Дослідження властивостей та контроль параметрів матеріалів
- Виробництво кремнієвих пластин
- Виготовлення радіоелектронних компонентів вузлів на основі керамічної та товстоплівкової технологій

Вирощування монокристалів складних оксидів

Дільниця для вирощування монокристалів тугоплавких оксидів за методом Чохральського з індукційним нагрівом містить шість установок виробництва фірми Physitherm (Франція), укомплектованих датчиками маси.

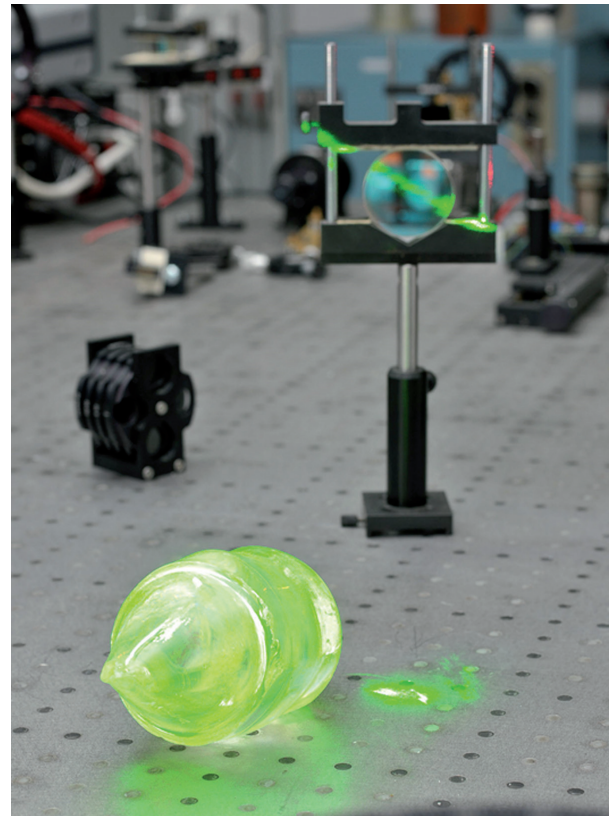
Вирощувані монокристали

$LiNbO_3$, $LiNbO_3:MgO$, $LiTaO_3$ — для електрооптики, нелінійної оптики, акустооптики, акустоелектроніки;

$Gd_3Ga_5O_{12}:Nd$, $Y_3Al_5O_{12}:Nd$, $YAlO_3:Nd$, $YVO_4:Nd$, $YAlO_3:Tm$ — для лазерної техніки;

$CdWO_4$, $CaWO_4$, $PbWO_4$, $CaMoO_4$ — для використання у сцинтиляційних пристроях та у фізиці високих енергій;

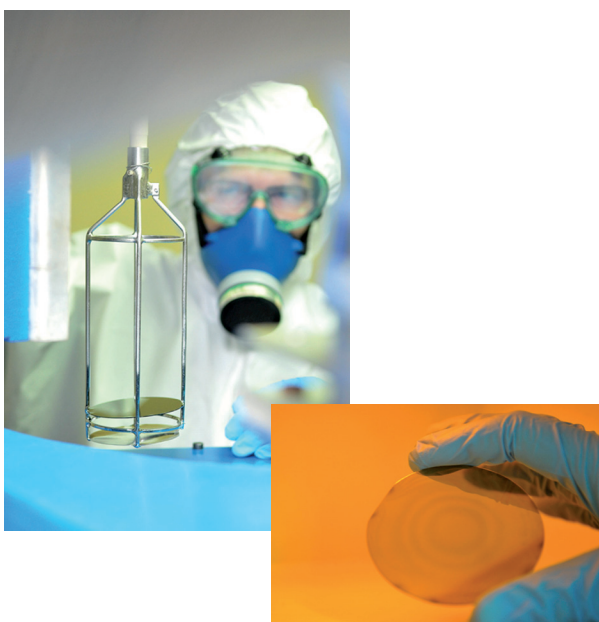
$Gd_3Ga_5O_{12}$, $Y_3Al_5O_{12}$, $YAlO_3$ — для виготовлення підкладок з діаметром до 76,2 мм.



Виготовлення монокристалічних епітаксійних шарів складних оксидів методом рідинно-фазної епітаксії

Дільниця розташовується у модульному чистому приміщенні класу "100" виробництва фірми Physitherm (Франція).

Вирощування монокристалічних епітаксійних шарів проводиться на монокристалічних підкладках діаметром до 76,2 мм у спеціальній п'ятитонній резистивній пічці «Garnet-3» (LPAI, Франція).



Основними отримуваними матеріалами є монокристалічні епітаксійні плівки зі структурою гранату для різноманітного застосування, а саме:

- епітаксійні структури на основі алюмінієвих та галієвих гранатів для створення активних середовищ мікроскопичних лазерів, потужних дискових лазерів та пасивних модуляторів лазерного випромінювання;
- епітаксійні структури на основі залізо-ітрієвого гранату для НВЧ-техніки та спінтроники;
- епітаксійні структури на основі рідкісноземельних залізних гранатів для магнітоелектроніки та сенсорики;
- епітаксійні структури на основі Ві-заміщених залізних гранатів для магнітооптики (візуалізатори магнітних полів, оптичні ізолятори, модулятори тощо).

Прецизійне механічне оброблення монокристалічних матеріалів

Дільниця укомплектована устаткуванням фірми «LOGITECH» (Велика Британія):

- верстат прецизійного різання монокристалічних матеріалів;
- технологічна лінійка шліфувально-полірувальних верстатів;
- лазерний інтерферометр для контролю якості оброблення робочих поверхонь оптичних монокристалічних елементів;
- автоколіматор для контролю паралельності робочих поверхонь оптичних монокристалічних елементів.

Обладнання спеціально призначене для оброблення плоских поверхонь монокристалічних оптичних блоків та стрижнів і дозволяє досягати площинності $\lambda/10$ і непаралельності робочих граней до 5 кутових секунд. Дільниця розташована у чистому приміщенні класу "10000".

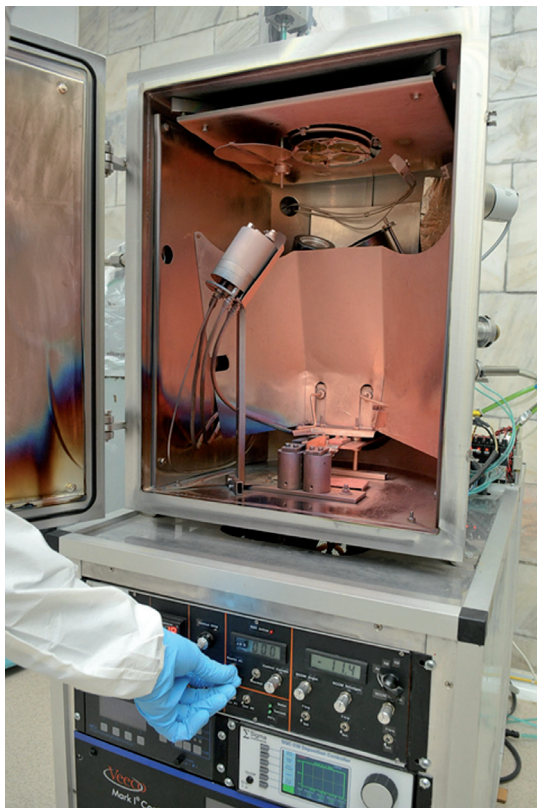


Вакуумне нанесення металевих та діелектричних покриттів

Дільниця, що розташовується у чистому приміщенні класу “10000”, укомплектована устаткуванням фірми «TORR INTERNATIONAL» (США) для нанесення тонкоплівкових діелектричних і металевих покриттів на робочі поверхні активних елементів оптоелектронних пристроїв.

Можливості:

- нанесення електродів на поверхні активних елементів електро- та акустооптичних пристроїв управління лазерним променем;
- нанесення просвітлювальних покриттів на робочі поверхні оптичних елементів;
- створення багатошарових діелектричних та металевих дзеркал лазерних резонаторів та інтерференційних фільтрів.



Одержання епітаксійних напівпровідникових структур на основі сполук A^3B^5 методами МОС-гібридної та рідинно-фазної епітаксії

- Розробка новітніх промислових технологій для виготовлення епітаксійних структур на основі сполук A^3B^5 , а також одноатомних напівпровідників
- Дрібносерійне виробництво оптоелектронних та силових приладів

Потужність установки МОС-гібридної епітаксії Discovery 180LDM VECO (США) в безперервному режимі роботи:

- одноразове завантаження — 6 дводюймових підкладок (або 3 тридюймові);
- 6—8 технологічних процесів на добу;
- 480—500 епітаксійних структур за місяць



Виробництво кремнієвих пластин

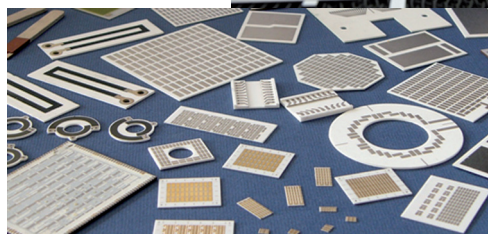
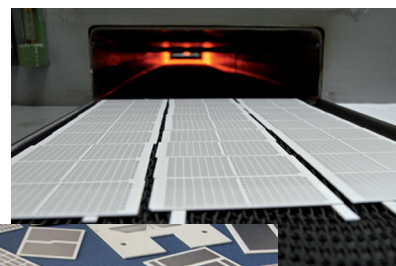
- Виробництво кремнієвих пластин електронної якості діаметром від 2 до 6 дюймів в кількості до 500 000 шт. на рік
- Можливість виробництва полірованих пластин квадратної і псевдоквадратної форми за специфікацією замовника
- Основні параметри пластин електронної якості відповідають стандарту SEMI M1-00



Виготовлення радіоелектронних компонентів на основі керамічної та товстоплівкової технологій

Основна продукція:

- алюмооксидні керамічні плати з товстоплівковою металізацією або адитивними металізованими шарами;
- керамічні пластини різної конфігурації і товщини;
- комплект паст для багаторівневих комутаційних плат;
- комплект паст для однорівневих НЧ та НВЧ товстоплівкових схем;
- припойні пасти.



ON THE 50th ANNIVERSARY OF THE SCIENTIFIC RESEARCH COMPANY
“ELECTRON-CARAT”

The article is dedicated to the Scientific Research Company “Electron-Carat”, which was founded in 1972 as the Lviv Research and Development Institute of Materials — the leading developer of the state-of-art materials. Nowadays, the SRC “Electron-Carat” is leading industrial institution of Ukrainian specialized on search, investigation, technological development and small-scale production of materials for functional electronics, in particular nano-, micro-, opto-, acoustic-, cryo-, magneto- and quantum electronics. The SRC “Electron-Carat” is a certified scientific organization included in the state register. Some of the company’s laboratories have been recognized as national heritage of Ukraine.

The main scientific and technological scope of SRC “Electron-Carat” includes production of single-crystal epitaxial layers of complex oxides using the liquid-phase epitaxy method; production of epitaxial semiconductor structures based on A3B5 compounds by MOCVD and liquid-phase epitaxy methods; precision mechanical processing of single-crystal materials; vacuum deposition of metal and dielectric coatings; property research and parameter control of materials; production of silicon wafers; manufacture of electronic components based on ceramic and thick-film technologies.

Keywords: SRC “Electron-Carat”, functional electronics materials, growth technologies, single crystals.

Опис статті для цитування:

Ваків М. М. До 50-річчя Науково-виробничого підприємства «Електрон-Карат». Технологія и конструирование в электронной аппаратуре, 2022, № 4–6, с. 65–70. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2022.4-6.65>

Cite the article as:

Vakiv M. M. On the 50th anniversary of the Scientific Research Company “Electron-Carat”. Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature, 2022, no. 4–6, pp. 65–70. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2022.4-6.65>

РЕЦЕНЗЕНТИ НОМЕРА

Белоха Галина Сергіївна, канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

Бондаренко Олександр Федорович, канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

Горбатий Іван Володимирович, докт. техн. наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів

Добровольський Юрій Георгієвич, докт. техн. наук, доцент, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, м. Чернівці

Дружинін Анатолій Олександрович, докт. техн. наук, завідувач кафедри, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів

Житник Микола Явтухович, науковий співробітник, Інститут транспортних систем і технологій НАН України, м. Дніпро

Круковський Семен Іванович, докт. техн. наук, начальник відділу, НВП «Електрон-Карат», м. Львів

Прокопенко Юрій Васильович, докт. техн. наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

Тининика Олександр Миколайович, канд. техн. наук, доцент, Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса

ІНФОРМАЦІЯ ДЛЯ АВТОРІВ ЖУРНАЛУ «ТКЕА»

1. До розгляду приймаються статті прикладної спрямованості українською або англійською мовою, що не були опубліковані раніше і не були передані для публікації в інші видання.

2. В журналі публікуються науково-практичні та експериментальні роботи з наступних тематичних напрямків:

- Сучасні електронні технології;
- Нові компоненти для електронної апаратури;
- Електронні засоби: дослідження, розробки;
- НВЧ-техніка;
- Системи передачі та обробки сигналів;
- Мікропроцесорні пристрої та системи;
- Енергетична електроніка;
- Напівпровідникова світлотехніка;
- Біомедична електроніка;
- Сенсоелектроніка;
- Функціональна мікро- та наноелектроніка;
- Забезпечення теплових режимів;
- Технологічні процеси та обладнання;
- Матеріали електроніки;
- Метрологія. Стандартизація.

3. Усі матеріали, які надходять до редакції, піддаються двосторонньо закритому рецензуванню.

4. У разі виявлення плагіату або фальсифікації результатів стаття відхиляється.

5. Редакція не стягує плату за опублікування рукопису та не виплачує авторський гонорар.

6. Обов'язковою умовою для прийняття статті до розгляду є її відповідність загальноприйнятим нормам побудови наукової публікації, тобто в ній мають бути:

- опис проблеми з аналізом публікацій за останні 5 років та обґрунтуванням необхідності проведення дослідження;
- чітко сформульована мета роботи;
- основна частина з обговоренням та інтерпретацією результатів;
- висновки.

Крім цього, редакцію цікавлять наступні аспекти:

- можливість практичного використання результатів досліджень;
- доцільність таблиць, ілюстрацій, у т. ч. відсутність дублювання наведеної в них інформації;
- адекватність використання літературних джерел;
- точність термінології;
- композиція рукопису, у т. ч. виправданість обсягу.

7. Готуючи статтю, слід звернути увагу на наступне:

- назва, мета роботи та висновки мають бути узгоджені між собою;
- назва має бути чіткою, інформативною і водночас по можливості короткою;
- ключові слова підбираються так, щоб ймовірність знаходження статті через пошукові системи була якомога вищою;
- анотація на початку статті має бути досить лаконічною (до 100 слів), демонструвати, що зроблено у роботі, а також містити усі наведені ключові слова;
- вступ знайомить читача з областю досліджень, існуючими в ній проблемами, показує актуальність проведення даного дослідження і закінчується чітко сформульованою метою роботи. Тут необхідно

привести огляд літератури за даною тематикою, вказавши на проблеми, які потребують додаткового дослідження і які вирішуються в даній роботі;

- основна частина може містити такі розділи, як «Зразки для досліджень», «Методика досліджень», «Результати досліджень і їх обговорення» та ін. Опис результатів, представлених на рисунках, має містити інтерпретацію цієї інформації, а не зводитися до дублювання підписів під рисунками або до простого опису наведених залежностей. Наприклад, замість таких неінформативних фраз, як «На рис. 1 наведено графік залежності А від В. З рисунка видно, що при зростанні В значення А монотонно зменшується.», слід дати пояснення типу «Як видно з рис. 1, при зростанні В значення А монотонно зменшується, що свідчить про те, що ... »;
- висновки не мають повторювати анотацію — тут потрібно показати, що заявлену мету досягнуто, навести результати роботи та рекомендації щодо їх практичного використання, а також визначити основні напрямки подальших досліджень. Правильно сформулювати висновки допоможуть такі фрази як «Проведене дослідження показало, що ...», «Авторами встановлено, що ...», «Розроблена методика дозволяє ...» тощо.

8. Список «Використані джерела» (див. зразок на сайті) формується в порядку їх згадування в тексті та оформляється відповідно до наведених нижче вимог. При цьому потрібно мати на увазі наступне:

- не менше половини загальної кількості джерел мають становити статті та монографії, опубліковані за останні п'ять років (до 10 джерел);
- кількість посилань на власні роботи має бути не вище за 25—30% від загальної кількості цитованих джерел;
- не рекомендується включати до списку літератури посилання на нормативні документи (якщо без цього не можна обійтися, краще згадати їх безпосередньо в тексті статті);
- при посиланні у тексті на числові значення, формули та інші фактичні дані, запозичені з книг, слід вказувати не тільки саму книгу, але і сторінку (наприклад, [2, с. 418]).

9. Після статті потрібно привести тематичну інформацію — назву, ПІБ авторів, місце роботи, анотацію і ключові слова — українською та англійською мовами. При цьому перекладні варіанти анотації мають бути представлені в розширеному вигляді (200—250 слів) і відбивати всі структурні розділи (актуальність теми, постановку задачі, опис рішення, висновки та практичну значущість).

10. Редакція не ставить жорстких вимог до обсягу статті — головне, щоб він був виправданий. Як правило, тексти статей в «ТКЕА» займають від трьох до шести журнальних сторінок, що відповідає 7—15 сторінкам, набраним у текстовому редакторі Microsoft Word, шрифт Times New Roman, розмір 12, міжрядковий інтервал 1,5.

11. Набір складних формул, а також спеціальних знаків над літерними позначеннями, підкоренових виразів, меж інтегрування, підсумовування тощо необхідно виконувати у програмах типу MathType (не можна користуватися вбудованим у Word формульним редактором), а в решті випадків (прості формули, шрифтові виділення, під/надрядкові індекси тощо) використовувати тільки звичайні засоби Word.

12. Одиниці виміру всіх величин мають відповідати сучасним вимогам, а термінологія — загальноприйнятій. Всі використані символи та абрєвіатури потрібно пояснити при першому їх згадуванні у тексті.

13. Бажано, щоб обсяг ілюстрацій не перевищував 40% від загального обсягу статті.

14. На початку статті, крім її назви та інформації про авторів (ПІБ, наукові ступені, місце роботи, e-mail), необхідно вказати індекс за Універсальною десятиковою класифікацією (УДК).

15. Матеріали статті разом з Авторською угодою надсилаються до редакції на e-mail <tkea.journal@gmail.com>. Також необхідно заповнити онлайн форму з інформацією про авторів (див. посилання на сайті). У тексті супроводжувального листа необхідно вказати ПІБ авторів, назву статті та відповідний тематичний напрямок (див. п. 2).

16. Для цитування статей з журналу «ТКЕА» латинкою слід використовувати його транслітеровану назву, а саме «Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature».

Всю додаткову інформацію та посилання можна знайти на сторінці <http://www.tkea.com.ua/tkea/recomend.html>

Видавець і виготовлювач версії Online
ПП «Політехперіодика», а/с 17, м. Одеса, 65044
E-mail: tkea.journal@gmail.com
Web-сайт: www.tkea.com.ua, тел. +38 099 444 63 52
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3232 від 09.07.2008

Підписано до друку 31.12 2022 р. Формат 60×84 1/8. Друк. арк. 9,5. Тираж 100 прим. Зам. № 147/149
Оригінал-макет виготовлено у видавництві «Політехперіодика»
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3232 від 09.07.2008 р.
(65044, м. Одеса, а/с 17)

Надруковано ФОП Побута М. І. з готового оригінал-макета
(65044, м. Одеса, пр-т. Шевченка, 1а)

До статті
«До 50-річчя Науково-виробничого
підприємства "Електрон-Карат"»



Одержання епітаксійних напівпровідникових структур на основі сполук A^3B^5 методами МОС-гібридної та рідинно-фазної епітаксії



Виробництво кремнієвих пластин



Вакуумне нанесення металевих та діелектричних покриттів



Прецизійне механічне оброблення монокристалічних матеріалів

*Номер готували
Дніпро, Київ, Львів, Одеса,
Чернівці.*



Пишіть
Передплачуйте
Читайте