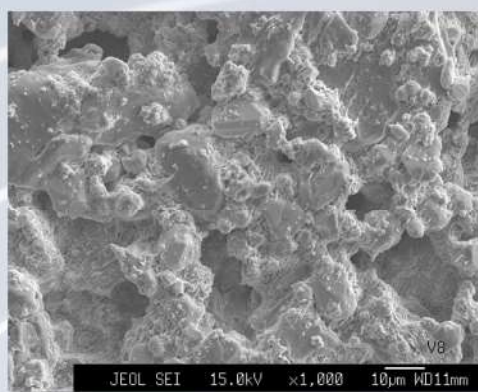
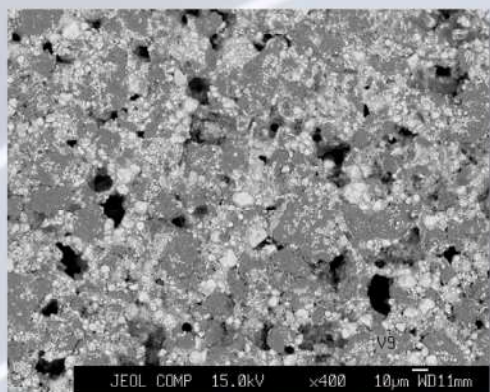
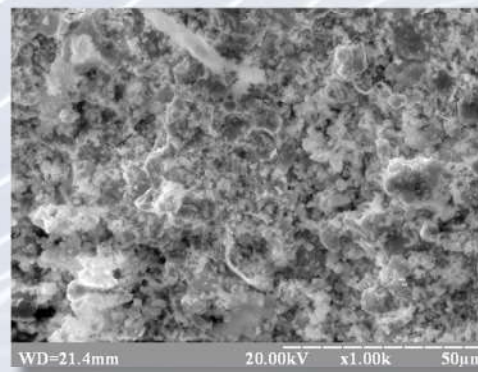
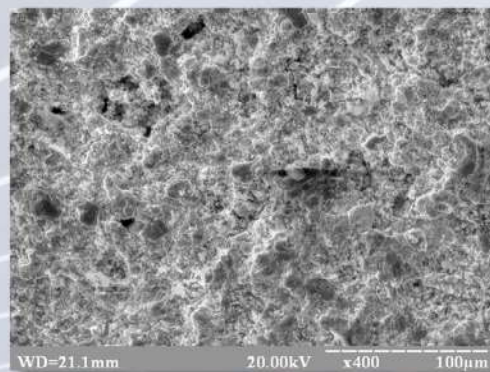


ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ



Мікрофотографії
поверхні зразків
склокераміки

• на основі VO_2



• на основі нано VO_2

До статті
«Електропровідність термочутливої склокераміки
на основі нанорозмірного діоксиду ванадія»

1–3 2022

СІЧЕНЬ — ЧЕРВЕНЬ

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

Д. т. н. С. Г. Антощук (м. Одеса, Україна)
Д. т. н. А. П. Бондарев (м. Львів, Україна)
Prof. I. Vajda (Budapest, Hungary)
Prof. D. Vinnikov (Tallinn, Estonia)
Prof. I. Galkin (Riga, Latvia)
К. т. н. Е. М. Глушеченко (м. Київ, Україна),
заст. головного редактора
Dr. D. Guilbert (Lorraine, France)
Prof. K. Dhoska (Tirana, Albania)
Д. ф.-м. н. В. В. Должиков (м. Харків, Україна)
Д. т. н. А. О. Дружинін (м. Львів, Україна)
Д. т. н. А. А. Єфіменко (м. Одеса, Україна),
заст. головного редактора
Д. ф.-м. н. Д. В. Корбутяк (м. Київ, Україна)
Д. т. н. С. І. Круковський (м. Львів, Україна)
Чл.-кор. НАНУ, д. ф.-м. н. В. С. Лисенко
(м. Київ, Україна)

Prof. J. Martins (Caparica, Portugal)
D. Eng. D. Morales (Granada, Spain)
Д. т. н. І. Ш. Невлюдов (м. Харків, Україна)
Dr. Sc. D. Nika (Chisinau, Moldova)
Д. т. н. Ю. Є. Ніколаєнко (м. Київ, Україна)
Prof. V. Pires (Setúbal, Portugal)
Д. ф.-м. н. С. В. Плаксін (м. Дніпро, Україна)
К. т. н. В. М. Прокопець (м. Київ, Україна)
D. Eng. N. Rodriguez (Granada, Spain)
Prof. E. Romero-Cadaval (Badajoz, Spain)
К. ф.-м. н. О. В. Рибка (м. Харків, Україна)
К. т. н. П. С. Сафронов (м. Київ, Україна)
Д. т. н. В. С. Ситніков (м. Одеса, Україна)
К. т. н. С. А. Степенко (м. Чернігів, Україна)
Dr. Sc. Z. Stević (Belgrade, Serbia)
Д. х. н. В. М. Томашик (м. Київ, Україна)
К. т. н. В. Є. Трофімов (м. Одеса, 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. Алексеєва,
М. Г. Глава, Є. І. Корецька.

**ТЕХНОЛОГИЯ
И
КОНСТРУИРОВАНИЕ
В
ЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЕ**

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ

2022 № 1–3

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 «Карат»

Схвалено до друку Вченою радою Національного університету «Одеська політехніка» (Протокол № 13 від 24.06 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

Вплив температури навколишнього середовища на електричні властивості варисторно-позисторної структури. *Іванченко О. В., Тонкошкур О. С.* 3

Мікропроцесорні пристрої та системи

Розрахунок дискретної кореляційної функції у фасетних системах технічного зору. *Боровицький В. М., Антоненко В. А.* 8

Системи передавання та обробки сигналів

Імпульсний метод оперативного контролю та управління зарядним процесом накопичувача енергії. *Плаксін С. В., Житник М. Я., Левченко Р. Ю., Остаповська С. Я.* 22

Матеріали електроніки

Вплив домішок і дефектів структури на властивості детекторів на основі CdTe та CdZnTe. *Кондрік О. І., Ковтун Г. П.* 31

Електропровідність термочутливої склокераміки на основі нанорозмірного діоксиду ванадія. *Колбунов В. Р., Тонкошкур О. С., Вашерук О. В.* 39

Сенсоелектроніка

Цифрова обробка в ПЛІС імпульсів газового детектора гамма-випромінювання для придушення акустичних завад. *Пудов О. О., Соколов С. О., Абізов О. С., Рибка О. В., Кутній В. Є.* 44

Метрологія, стандартизація

Особливості визначення показників надійності термоелектричних генераторних модулів за експериментальними даними. *Горський П. В.* 50

Показчик статей, опублікованих у журналі у 2021 році 57

Рецензенти номера 60

CONTENTS

New components for electronic equipment

Influence of ambient temperature on electrical properties of varistor-
posistor structure. *Ivanchenko A. V., Tonkoshkur A. S.* 3

Microprocessor-based devices and systems

Calculation of discrete correlation function in facet systems of technical
vision. *Borovytsky V. N., Antonenko V. A.* 8

Signals transfer and processing systems

Methods of controlling electrochemical energy storages: classification
and application features. *Plaksin S. V., Zhytnyk M. Ya., Levchenko R. Yu.,
Ostapovska S. Ya.* 22

Materials of electronics

Influence of impurities and structural defects on the properties of
CdTe- and CdZnTe-based detectors. *Kondrik A. I., Kovtun G. P.* 31

Electrical conductivity of thermosensitive glass-ceramics based
on nanosized vanadium dioxide. *Kolbunov V. R., Tonkoshkur O. S.,
Vasheruk O. V.* 39

Sensors

Digital FPGA-based processing of pulses of gas-filled gamma-
radiation detector for acoustic noise suppression. *Pudov A. O., Sokolov
S. A., Abyzov A. S., Rybka A. V., Kutny V. E.* 44

Metrology, standardization

Particular aspects of determining reliability indicators of thermoelec-
tric generator modules using experimental data. *Gorskyi P. V.* 50

Index of articles published in the journal in 2021

 57

Reviewers

 60

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. 13, 24.06 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 21788-11688IIP
of 21.12.2015

К. ф.-м. н. О. В. ІВАНЧЕНКО, д. ф.-м. н. О. С. ТОНКОШКУР

Україна, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
E-mail: IvanchenkoAV@ukr.net

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА НА ЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВАРИСТОРНО-ПОЗИСТОРНОЇ СТРУКТУРИ

Досліджено вплив температури навколишнього середовища на електричні характеристики комбінованої двошарової структури на основі варисторної кераміки та полімерних позисторних нанокompatитів з вуглецевим наповнювачем, яка використовується як обмежувач вхідної напруги. Встановлено, що у разі її підвищення вихідна напруга та температура структури в діапазоні обмеження змінюються незначно, а струм та потужність розсіювання шарів істотно знижуються.

Ключові слова: варисторна кераміка, полімерний позисторний нанокompatит, обмежувач напруги, електричні характеристики, температура.

Використання комбінованої двошарової структури на основі варисторної кераміки та полімерних позисторних нанокompatитів з вуглецевим наповнювачем, що знаходяться у тепловому контакті, останнім часом розглядається як один з перспективних напрямків розв'язання проблеми захисту електричних кіл від тривалої та постійної перенапруги [1, 2]. Особливий інтерес такі обмежувачі напруги представляють для розробки засобів захисту від електричних і теплових навантажень у фотоелектричних системах сонячних батарей [3, 4].

Слід зазначити, що найвідомішими пристроями захисту від перенапруги на основі неоднорідних діелектриків є керамічні металооксидні варистори. Їхньою основною функціональною властивістю є нелінійність вольт-амперної характеристики (ВАХ), що дозволяє вирішувати завдання захисту електричних кіл від імпульсної перенапруги практично будь-якого діапазону (від небажаних кидків напруги в електронних пристроях до грозових розрядів) [5—7]. Однак у разі виникнення перенапруги тривалої або майже постійної дії застосування таких пристроїв захисту є проблематичним через їх значне нагрівання, що призводить до деградації їхніх нелінійних ВАХ і насамкінець до руйнування самих варисторів [8, 9].

Компонентами такої комбінованої структури є шари з металооксидної варисторної кераміки та нанокompatита, що використовуються в запобіжниках РРТС технології PolySwitch, що знаходяться в тепловому контакті. Елементи типу PolySwitch, які називають також самовідновлювальними запобіжниками, або запобіжниками РРТС [4, 10, 11], виготовляють на основі композитів з нанорозмірними вуглецеви-

ми наповнювачами і, як правило, поліетиленової матриці. В таких композитах відбувається різке, на кілька порядків, збільшення електричного опору при нагріванні до температури фазового переходу T_{cp} , а після зниження температури — повернення до вихідного високопровідного стану.

Варисторний шар комбінованих структур підключається паралельно до об'єкта захисту, а позисторний — послідовно (рис. 1). Основною функціональною властивістю такого пристрою є згадане вище різке збільшення електричного опору шару позисторного нанокompatита в процесі передачі теплової енергії від розігрітого перенапругою варисторного шару, що знаходиться в тепловому контакті з ним. В результаті відбувається перерозподіл вхідної перенапруги між шарами, що забезпечує обмеження вихідної напруги на варисторному шарі та, відповідно, включеному паралельно йому навантаженні.

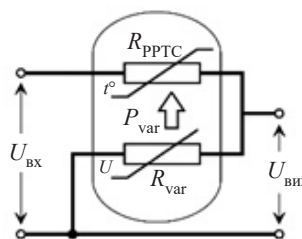


Рис. 1. Еквівалентна електрична схема обмежувача перенапруги на основі двошарової варисторно-позисторної структури:

$U_{BX}, U_{VИХ}$ — вхідна та вихідна напруга; $R_{var}, R_{PPТС}$ — електричний опір варисторного та позисторного шарів; P_{var} — тепла потужність, що передається позистору від варистора за наявності перенапруги U_{BX}

Для ефективного технічного застосування досліджених комбінованих електротеплових пристроїв необхідна детальна інформація про їхню поведінку в різних умовах, зокрема в різних температурних режимах. У зв'язку з цим одним з актуальних завдань є вивчення впливу факторів, пов'язаних з навколишнім середовищем, на їхні електричні характеристики.

Метою роботи було дослідження впливу температури навколишнього середовища на електричні характеристики, потужність розсіювання та температуру позисторного шару обмежувача напруги на основі двошарової варисторно-позисторної структури.

Зразки та методика експерименту

Досліджувалися зразки обмежувачів напруги, основою робочого елемента яких (шар діаметром 14,5 мм товщиною 3 мм) був робочий елемент серійного варистора VCR-14D180L (диск діаметром 14,5 мм, товщиною 1,5 мм; класифікаційна напруга 18 В) [12], другим шаром був запобіжник PPTC типу FRX110-60F (шар діаметром 11 мм, товщиною 1 мм; опір елемента у провідному стані 0,38 Ом; температура спрацювання 125°C) [13] на основі полімерного нанокompозита з вуглецевим наповнювачем. Тепловий контакт між шарами забезпечувався використанням кремнієвої теплопровідної пасти КПТ-8 [14].

Вхідна напруга $U_{вх}$ подавалася від стандартного регульованого джерела напруги та прикла-

далася до послідовно з'єднаних шарів структури. Вимірювання значень струму I , напруги вхідної $U_{вх}$ та вихідної (напруги на варисторному шарі) $U_{вих}$ проводилися промисловими амперметрами та вольтметрами. Обмежувач напруги розміщували у термостаті, який дозволяв змінювати температуру. Вимірювання проводилися після встановлення заданої температури всередині термостата, яка відповідала температурі навколишнього середовища для досліджуваного зразка. Температура структури T та навколишнього середовища T_0 фіксувалася за допомогою термопар.

Результати експериментальних досліджень

Залежності напруги на виході досліджуваної структури від прикладеної вхідної напруги в режимі холостого ходу представлені на рис. 2, а. Як видно, зі збільшенням вхідної напруги вихідна напруга структури має тенденцію до обмеження. Вплив температури навколишнього середовища на абсолютну величину обмеженої вихідної напруги є незначним (не перевищує 10% в досліджуваному діапазоні температури T_0). Цей ефект супроводжується підвищенням температури структури T до значення, близького до температури T_{tr} фазового переходу «провідник — ізолятор», що спостерігається в нанокompозитах з додатними коефіцієнтами температурного опору (рис. 2, б).

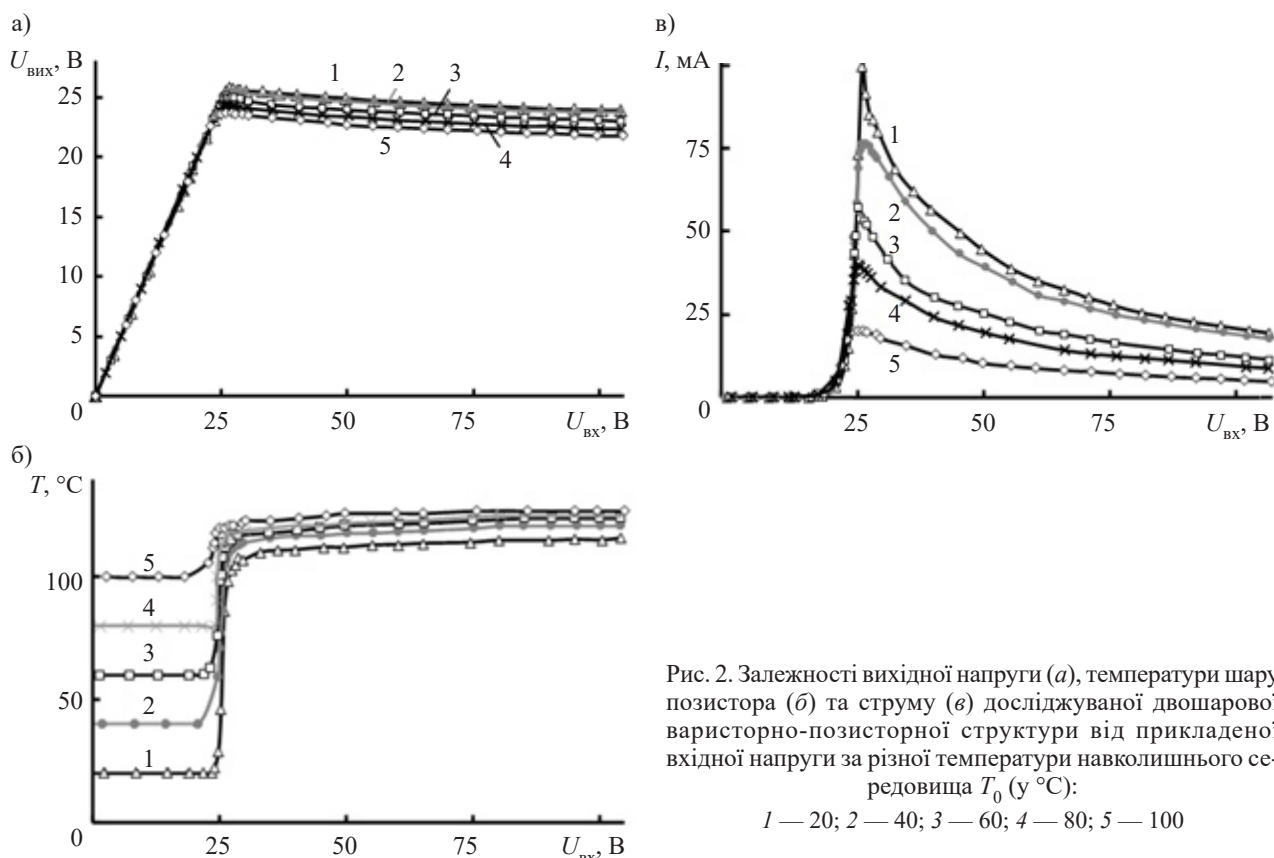


Рис. 2. Залежності вихідної напруги (а), температури шару позистора (б) та струму (в) досліджуваної двошарової варисторно-позисторної структури від прикладеної вхідної напруги за різної температури навколишнього середовища T_0 (у °C):

1 — 20; 2 — 40; 3 — 60; 4 — 80; 5 — 100

Підвищення температури навколишнього середовища T_0 веде до незначного збільшення температури позисторного шару структури в діапазоні вихідної напруги, де реалізується процес її обмеження. Температура варисторного шару дещо перевищувала температуру позистора, але її залежність від $U_{\text{вх}}$ була аналогічною залежності для позистора (див. рис. 2, б).

На рис. 2, в представлені вхідні характеристики досліджених структур. Як видно, вони відповідають типовим вольт-амперним характеристикам позисторів [15, 16]. Основна функція варистора — обмеження імпульсу перенапруги — реалізується тільки впродовж короткого проміжку часу на початку її дії, коли варисторний елемент нагріває структуру до температури фазового переходу позисторного елемента, і далі він вже виконує функцію тільки підігрівача. Після перемикання позисторного елемента в низькопровідний стан після досягнення $T_{\text{тр}}$ струм структури зменшується до величини, достатньої для його утримання в цьому стані [13].

Таким чином, зі збільшенням напруги $U_{\text{вх}}$ струм I , що протікає через досліджувану комбіновану структуру, збільшується та проходить через максимум (коли температура структури наближається до $T_{\text{тр}}$, що відповідає зазначеному раніше фазовому переходу). Надалі струм, що протікає через структуру, зменшується через збільшення опору нанокон-

позитного позисторного шару. Згідно з даними на рис. 2, в підвищення температури навколишнього середовища T_0 обумовлює значне зменшення величини струму I .

На рис. 3 представлені відповідні залежності електричної потужності, яка розсіюється всією структурою та її складовими, тобто шарами варисторної кераміки та позисторного полімерного наноконпозита.

На початку збільшення вхідної напруги електрична потужність розсіюється в основному на варисторному шарі, який нагрівається сам і нагріває позисторний шар. Після переходу позисторного шару у високоомний стан при $T_{\text{тр}}$ відбувається перерозподіл вхідної напруги та розсіюваної електричної потужності у бік збільшення її позисторної складової.

Можна зауважити, що після переходу двошарової варисторно-позисторної структури у режим обмеження вхідної напруги сумарна її потужність розсіювання виходить на деяке постійне значення, яке перестає залежати від напруги, що прикладається, у досліджених межах. Це значення потужності може бути використане при підборі варисторних та інших елементів електротеплових обмежувачів напруги розглянутого типу. Підвищення температури навколишнього середовища призводить до зменшення додаткової електричної потужності, необхідної для досягнення позисторним шаром температури фазового переходу.

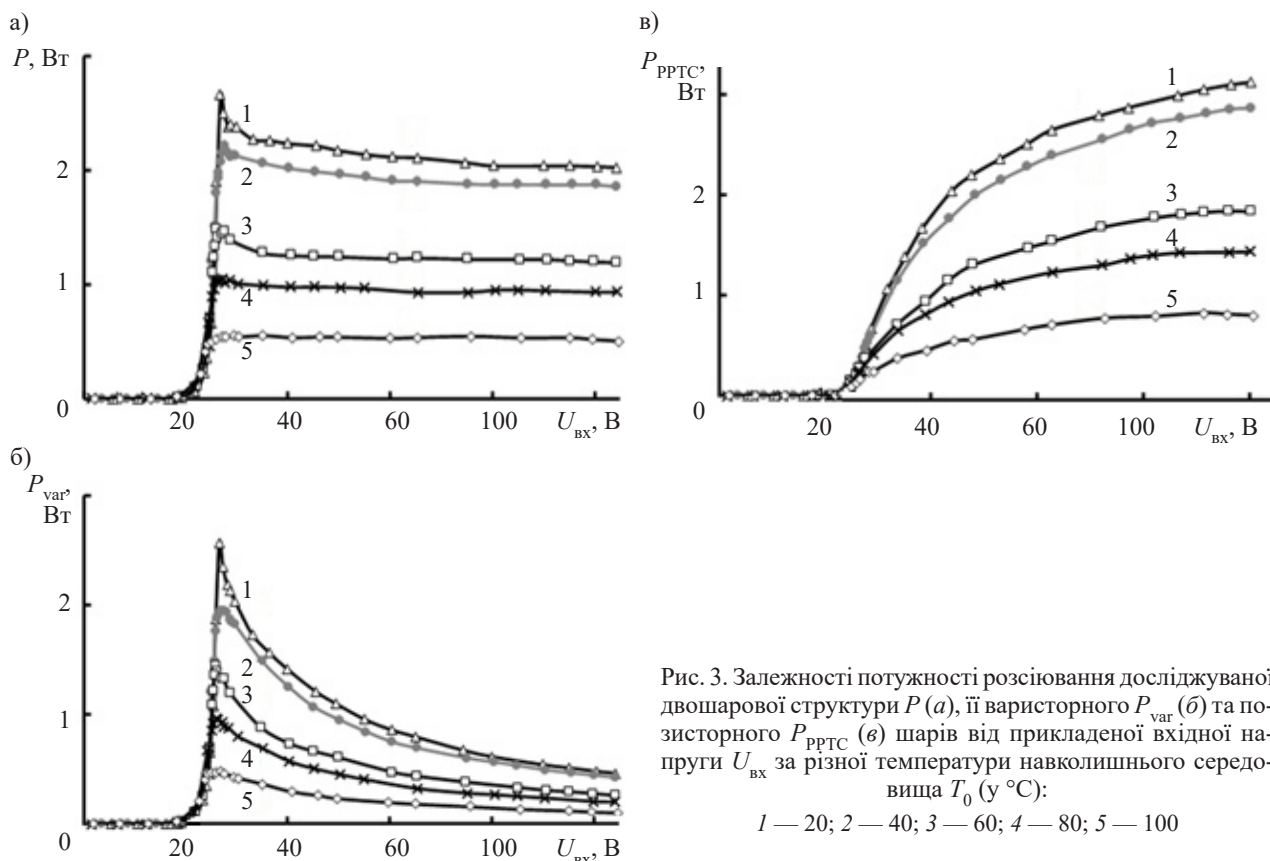


Рис. 3. Залежності потужності розсіювання досліджуваної двошарової структури P (а), її варисторного P_{var} (б) та позисторного $P_{\text{РРТС}}$ (в) шарів від прикладеної вхідної напруги $U_{\text{вх}}$ за різної температури навколишнього середовища T_0 ($^{\circ}\text{C}$):

1 — 20; 2 — 40; 3 — 60; 4 — 80; 5 — 100

Висновки

Отримані залежності основних характеристик електротеплового обмежувача напруги на основі комбінованої структури з шарів металооксидної варисторної кераміки та позисторного полімерного нанокompозита від температури навколишнього середовища дозволили встановити, що:

— у разі підвищення температури навколишнього середовища температура структури та вихідна напруга пристрою на ділянці її обмеження змінюються незначно, а величина струму та потужність розсіювання структури істотно знижуються;

— при фіксованій температурі навколишнього середовища розсіювана потужність практично не змінюється в діапазоні обмеження вхідної напруги;

— залежності розсіюваної варисторним шаром потужності та струму від вхідної напруги ідентичні, а потужність розсіювання позисторного шару має тенденцію до зростання.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Golubovic B., Becker P. N., Moore R. P. *Circuit protection device having thermally coupled MOV overvoltage element and PPTC overcurrent element. Patent USA*, no. 7660096.
2. Tonkoshkur A. S., Ivanchenko A. V. Electrical properties of structures based on varistor ceramics and polymer nanocomposites with carbon filler. *Journal of Advanced Dielectrics*, 2019, vol. 9, no. 03, 1950023. <https://doi.org/10.1142/S2010135X19500231>
3. Тонкошкур А. С., Накашидзе Л. В. Применение самовосстанавливающихся предохранителей «Polyswitch» для предотвращения токовых перегрузок в фотоэлектрических системах. *Відновлювана енергетика*, 2020, № 2, с. 34–44. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.2\(61\).34-44](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.2(61).34-44)
4. Tonkoshkur A. S., Ivanchenko A. V., Nakashydz L. V. et al. *Application of polymer posistor nanocomposites in systems for protecting photovoltaic components of solar arrays from electrical overloads. Monograph*. USA, Boston, Primedia eLaunch, 2021, 172 p. <https://doi.org/10.46299/978-1-63972-054-5>

5. Валеев Х. С., Квасков В. Б. *Нелинейные металлооксидные полупроводники*. Москва, Энергоиздат, 1983, 160 с.
6. Gupta T. K. Application of zinc oxide varistors. *Journal of the American Ceramic Society*, 1990, vol. 73, no. 7, pp. 1817–1840. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1990.tb05232.x>
7. Standler R. B. *Protection of electronic circuits from overvoltages*. Mineola, New York, Dover Publications, INC., 2002, 442 p.
8. Ivanchenko A. V., Tonkoshkur A. S., Makarov V. O. Desorption thermal degradation model of zinc oxide ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 2004, vol. 24, no. 15–16, pp. 3709–3712. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2003.12.004>
9. Тонкошкур А. С., Иванченко А. В. *Моделирование деградации металлооксидных варисторных элементов защиты электрических цепей*. Днепр, Акцент ПП, 2019, 157 с.
10. Brice C. W., Dougal R. A., Hudgins J. L. Review of technologies for current-limiting low-voltage circuit breakers. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1996, vol. 32, no. 5, pp. 1005–1010. <https://doi.org/10.1109/28.536858>
11. Cheng S., Tom K., Pecht M. Failure precursors for polymer resettable fuses. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 2010, vol. 10, no. 3, pp. 374–380. <https://doi.org/10.1109/TDMR.2010.2053371>
12. *Metal oxide varistors, Transient voltage surge suppressors*. https://www.hitano.com.tw/wp-content/uploads/doc/14D_20180620.pdf (Дата звернення: 20 февраля 2022)
13. *FRX Series - Radial Leaded PTC*. https://www.fuzetec.com/products_2.php?bgid=1&gid=31 (Дата звернення: 20 февраля 2022)
14. *Теплопроводность термораст, сравнение терморастм по теплопроводности и вязкости*. <http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/materialy-raznye/teploprovodnost-termopast-sravnienie-termopast-po-teploprovodnosti-i-vyazkosti> (Дата звернення: 20 февраля 2022)
15. Шефтель И. Т. *Терморезисторы*. Москва, Наука, 1973, 415 с.
16. *Thermistor types – their workings and applications*. <https://www.elprocus.com/introduction-to-thermistor-types-with-its-workings-and-applications/> (Дата звернення: 20 февраля 2022)

Дата надходження рукопису до редакції 23.02 2022 р.

Опис статті для цитування:

Іванченко О. В., Тонкошкур О. С. Вплив температури навколишнього середовища на електричні властивості варисторно-позисторної структури. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2022, № 1–3, с. 3–7. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2022.1-3.03>

Cite the article as:

Ivanchenko A. V., Tonkoshkur A. S. Influence of ambient temperature on electrical properties of varistor-positor structure. *Tekhnologiya i Konstruirovanie v Elektronnoi Apparature*, 2022, no. 1–3, pp. 3–7. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2022.1-3.03>

INFLUENCE OF AMBIENT TEMPERATURE ON ELECTRICAL PROPERTIES OF VARISTOR-POSISTOR STRUCTURE

Recently, the combined two-layer structure based on varistor ceramics and polymer posistor nanocomposites with carbon filler (known as PolySwitch resettable fuses) has been seen as one of the promising elements for protecting electrical circuits from long-term overvoltages. The varistor and posistor layers are in thermal contact. The main functional property of such a structure is a sharp increase (by several orders of magnitude) in the electrical resistance of the posistor nanocomposite layer during the transfer of thermal energy from the varistor layer heated by overvoltage.

Detailed information about the behavior of such combined varistor-posistor structures under different conditions, particularly in different temperature conditions, is necessary for the effective technical application of such structures as electrothermal overvoltage limiters.

This paper offers research results on the effect of ambient temperature on the electrical characteristics of such voltage limiters.

Structures based on metal oxide ceramics used in the production of serial varistors VCR 14D and a posistor nanocomposite for FRX-type PPTC fuses were used in the experiments of this study.

It has been established that with an increase in the ambient temperature, the temperature and output voltage of such a device change insignificantly in the limitation region, while the current and power dissipation of the layers significantly decrease.

At a fixed ambient temperature, the total power dissipated by the varistor and posistor layers practically does not change in the range of input voltage limitation. The dependence of the power dissipated by the varistor layer on the input voltage is identical to the analogous dependence of the current, and the power dissipation of the posistor layer tends to increase.

Keywords: varistor ceramics, polymer posistor nanocomposite, voltage limiter, electrical characteristics, temperature

REFERENCES

- Golubovic B., Becker P. N., Moore R. P. *Circuit protection device having thermally coupled MOV overvoltage element and PPTC overcurrent element. Patent USA*, no. 7660096.
- Tonkoshkur A. S., Ivanchenko A. V. Electrical properties of structures based on varistor ceramics and polymer nanocomposites with carbon filler. *Journal of Advanced Dielectrics*, 2019, vol. 9, no. 03, 1950023. <https://doi.org/10.1142/S2010135X19500231>
- Tonkoshkur A. S., Nakashidze L. V. The use of resttable fuses "Polyswitch" to prevent current overloads in photovoltaic systems. *Vidnovluvana Energetika*, 2020, no. 2. pp. 34–44. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.2\(61\).34-44](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.2(61).34-44) (Rus)
- Tonkoshkur A. S., Ivanchenko A. V., Nakashidze L. V. et al. *Application of polymer posistor nanocomposites in systems for protecting photovoltaic components of solar arrays from electrical overloads. Monograph*. USA, Boston, Primedia eLaunch, 2021, 172 p. <https://doi.org/10.46299/978-1-63972-054-5>
- Valeev Kh. S., Kvaskov V. B. *Nonlinear metal-oxide semiconductors*. Moscow, Energoizdat, 1983, 160 p.
- Gupta T. K. Application of zinc oxide varistors. *Journal of the American Ceramic Society*, 1990, vol. 73, no. 7, pp. 1817–1840. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1990.tb05232.x>
- Standler R. B. *Protection of electronic circuits from overvoltages*. Mineola, New York, Dover Publications, INC., 2002, 442 p.
- Ivanchenko A. V., Tonkoshkur A. S., Makarov V. O. Desorption thermal degradation model of zinc oxide ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 2004, vol. 24, no. 15–16, pp. 3709–3712. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2003.12.004>
- Tonkoshkur A. S., Ivanchenko A. V. *Modeling of degradation of metal oxide varistor elements for protection of electrical circuits*. Dnipro, Aktsent PP, 2019, 157 p.
- Brice C. W., Dougal R. A., Hudgins J. L. Review of technologies for current-limiting low-voltage circuit breakers. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1996, vol. 32, no. 5, pp. 1005–1010. <https://doi.org/10.1109/28.536858>
- Cheng S., Tom K., Pecht M. Failure precursors for polymer resettable fuses. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 2010, vol. 10, no. 3, pp. 374–380. <https://doi.org/10.1109/TDMR.2010.2053371>
- Metal oxide varistors, Transient voltage surge suppressors*. https://www.hitano.com.tw/wp-content/uploads/doc/14D_20180620.pdf (Data of access: 20 February 2022)
- FRX Series - Radial Leaded PTC*. https://www.fuzetec.com/products_2.php?bgid=1&gid=31 (Data of access: 20 February 2022)
- [The thermal conductivity of the thermal pastes, comparison of the thermal pastes for thermal conductivity and viscosity]. <http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/materialy-raznye/teploprovodnost-termopast-sravnienie-termopast-po-teploprovodnosti-i-vyazkosti> (Data of access: 20 February 2022) (Rus)
- Sheftel I. T. *Thermistors*. Moscow, Nauka, 1973, 415 p. (Rus)
- Thermistor types – their workings and applications*. <https://www.elprocus.com/introduction-to-thermistor-types-with-its-workings-and-applications/> (Data of access: 20 February 2022)

Д. т. н. В. М. БОРОВИЦЬКИЙ, В. А. АНТОНЕНКО

Україна, Національний технічний університет України
«Київський Політехнічний Інститут ім. Ігоря Сікорського»
E-mail: vborovytsky@yahoo.com

РОЗРАХУНОК ДИСКРЕТНОЇ КОРЕЛЯЦІЙНОЇ ФУНКЦІЇ У ФАСЕТНИХ СИСТЕМАХ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ

Запропоновано фасетну систему технічного зору, яка складається з однакових фасетних елементів. Кожний фасетний елемент містить оптичну систему, декілька фотоприймачів, попередній підсилювач та універсальний мікроконтролер. У такій системі всі фасетні елементи працюють паралельно та незалежно один від одного. Кожний фасетний елемент здійснює швидке вимірювання кутової швидкості об'єктів у своєму полі зору шляхом обчислення дискретних кореляційних функцій сигналів фотоприймачів. Досліджено можливість застосування у фасетних елементах недорогих універсальних мікроконтролерів.

Ключові слова: системи технічного зору, цифрова обробка сигналів, кутова швидкість, дискретна кореляційна функція, цифрові камери, безпілотні літальні апарати.

Зараз автономні транспортні засоби (АТЗ), у тому числі безпілотні літальні апарати (БПЛА) та самокеровані автомобілі, стають важливою частиною інфраструктури доставлення товарів і продукції [1, 2]. Щоб уникнути зіткнень з рухомими та нерухомими об'єктами, які їх оточують, їм потрібні швидкі системи технічного зору з широким полем зору. Такі системи мають забезпечувати блок керування АТЗ надійними даними про значення та напрямок швидкості оточуючих об'єктів. Зараз системи технічного зору застосовують цифрові або нейроморфні камери, зокрема камери, які використовують обробку подій — event-based cameras — саме вони вважаються одним з найкращих варіантів для АТЗ [3, 4]. Основними елементами цих камер є:

- оптична система, що формує зображення віддаленого об'єкта в площині його зображення;
- матричний фотоприймальний пристрій у вигляді матриці фоточутливих елементів і зчитувальної електроніки, розробленої спеціально для виявлення руху;
- цифровий сигнальний процесор для швидкої локалізації рухомих об'єктів;
- механічні, електричні та електронні компоненти для стабілізації та кутових переміщень камери.

Проте камери, що використовують обробку подій, мають низку недоліків. Наприклад, сучасні матричні фотоприймальні пристрої мають багатоканальні електронні блоки з послідовним зчитуванням сигналу. Кількість каналів зчитування та кількість ядер у процесорах для обробки сигналів дуже малі в порівнянні з кількістю фоточутливих елементів [5], що знижує продуктивність обробки сигналів. Також важко спроектувати систему бачення з широким або дуже

широким полем зору. Виконання таких камер з кутом огляду більше ніж $\pm 90^\circ$ є проблематичним, при цьому для АТЗ бажано, щоб датчик зображення міг «бачити» у полі зору близькому $\pm 180^\circ$ для виключення ймовірності зіткнення по всіх напрямках. Крім того, камери з матричними фотоприймальними пристроями потребують механічних компонентів для обертання в різних напрямках і стабілізації зображення, що робить їх достатньо дорогими, а також збільшує їх вагу та розміри.

Перераховані недоліки властиві й звичайним цифровим камерам, підключеним до цифрових сигнальних процесорів. Одним з найкращих альтернатив цифровим камерам є фасетні системи технічного зору (ФСТЗ), побудовані по аналогії з фасетними органами зору живих істот [6, 7]. Такі системи містять певну кількість однакових фасетних елементів і мають такі переваги:

- швидка обробка сигналів (велика кількість фасетних елементів здійснює паралельне зчитування та обробку сигналу; кожний фасетний елемент обробляє сигнали від своїх світлочутливих елементів, в результаті система зору може виявляти рухомі об'єкти за дуже короткий час);

- широке поле зору (фасетні елементи можуть покривати велику вигнуту поверхню, щоб забезпечити поле зору більше за півсферу) [7];

- достатня просторова роздільна здатність (такі системи мають майже постійну просторову роздільну здатність по всьому полю зору без будь-якого механічного сканування) [6];

- фасетні елементи можуть містити фотоприймачі, активовані поляризацією або певними спектральними смугами оптичного випромінювання, це

дає змогу фіксувати сигнали, які характеризують розподіл поляризації або оптичного спектру по всьому полю зору;

— висока надійність системи завдяки незалежній паралельній роботі численних фасетних елементів (система може працювати, навіть якщо деякі фасетки пошкоджені).

Ці переваги приваблюють дослідників та інженерів, які намагаються розробити ФСТЗ для керування автономними транспортними засобами [8—11]. ФСТЗ мають хороші перспективи застосування для навігації, безпечного наведення, відстеження об'єктів, усунення зіткнень з рухомими та нерухомими об'єктами шляхом вимірювання кутової швидкості переміщення об'єктів у полі зору кожного фасетного елемента [8—10]. Це дозволяє виявляти рухомі та нерухомі об'єкти та уникати зіткнень з ними [11]. Як показали дослідження, навіть один фасетний елемент, який вимірює кутову швидкість у малому полі зору, може забезпечити рух БПЛА з відслідковуванням профілю поверхні, а декілька фасетних елементів — рух з обминанням перешкод [11, 12].

Обробка сигналів у фасетних елементах може здійснюватися аналоговими або цифровими електричними схемами, зокрема мікроконтролерами (МК) та схемами програмованої логіки [12—14]. Відомо, що кутову швидкість можна вимірювати за допомогою обчислення дискретної кореляційної функції (ДКФ) сигналів, які зчитуються з різних фотоприймачів, з наступним розрахунком положення та значення максимуму цієї функції [14, 15]. Математично доведено, що кореляційно-екстремальні системи є оптимальними, бо саме вони забезпечують максимізацію співвідношення сигнал/шум системи у вихідному сигналі, а значить, і мінімальні похибки вимірювання [15].

Розрахунок ДКФ вимагає виконання великого обсягу обчислень, і тому виникає протиріччя: фасетні елементи у ФСТЗ мають бути компактними та дешевими, але це обмежує застосування спеціалізованих аналогових або цифрових інтегральних схем, а також потужних процесорів, зокрема багатоядерних, які мають високу вартість або недоступні для широкого застосування. З іншої сторони, для найкращого визначення кутової швидкості треба обчислювати ДКФ, що вимагає здійснення великого обсягу обчислень у кожному фасетному елементі за дуже короткий час — від 1 до 10 мс. У більшості ФСТЗ це протиріччя вирішується відмовою від обчислення ДКФ та застосуванням менш точних методів багатоканальної аналогової або цифрової фільтрації сигналів [8—14].

В цьому дослідженні автори поставили за мету знайти метод обчислення ДКФ за допомогою дешевого універсального мікроконтролера, який дозволить обчислювати не менше сотні значень цієї функції за 1—10 мс і тим самим зробить можливим створення вітчизняних недорогих та швидких фасетних елементів на елементній базі, яка доступна на ринку електронних компонентів.

Фасетна система технічного зору

Запропонована ФСТЗ (рис. 1) складається з однакових фасетних елементів 1, кожний з яких містить [16, 17]:

- однокомпонентну оптичну систему 2 (формує зображення у площині, де розташовуються фоточувливі елементи фотоприймачів 3);
- фотоприймачі 3 (фотодіоди або фототранзистори) у кількості від трьох до восьми;
- багатоканальний попередній програмований підсилювач 4 (перетворює струм фотоприймачів у

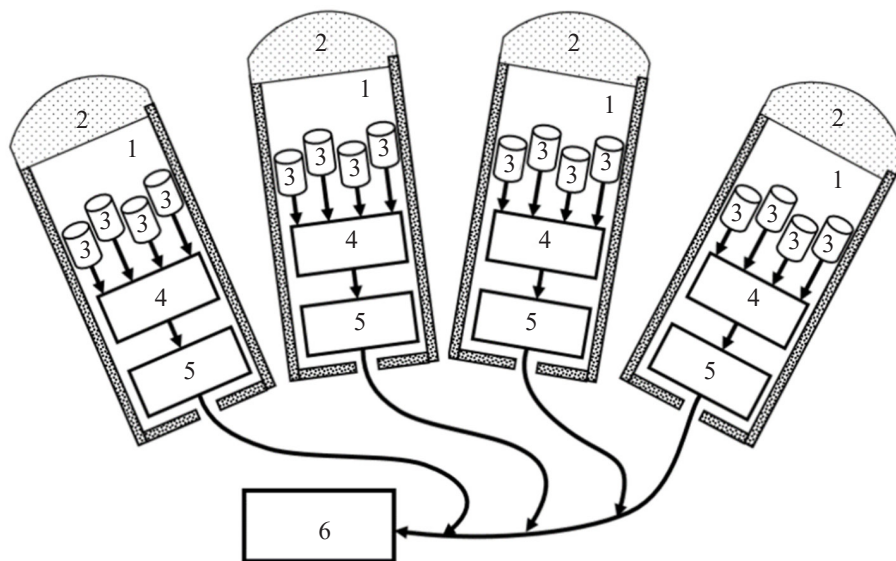


Рис. 1. Запропонована фасетна система технічного зору

напругу та забезпечує потрібний рівень цієї напруги в вихідному сигналі);

— мікроконтролер 5 з аналого-цифровим перетворювачем (АЦП).

Після підсилення сигнал з фотоприймачів подається на вхід АЦП, де він переводиться у цифрову форму та у вигляді масиву цілих чисел записується в оперативну пам'ять мікроконтролера. Програма, що зберігається у постійній пам'яті МК, забезпечує зчитування та перетворення у цифрову форму сигналів усіх фотоприймачів шляхом подачі сигналів управління на програмований підсилювач та АЦП. Головним призначенням цієї програми є розрахунок кутової швидкості переміщення зображення шляхом обчислення положення максимального значення кореляційної функції зареєстрованих цифрових сигналів. Ці дані допомагають автономним транспортним засобам орієнтуватися в просторі під час руху [8, 9, 11, 12] — максимальне значення цієї функції та його положення у масиві показує відстань, на яку змістився сигнал на одному фотоприймачі відносно сусіднього, та напрям його переміщення. Якщо порахувати часову затримку максимального значення, то при відомих значеннях фокусної відстані оптичної системи 2 та відстані між фоточутливими елементами фотоприймачів 3 можна визначити кутову швидкість, з якою рухається об'єкт у полі зору фасетного елемента 1. Розраховані дані МК передає у центральний комп'ютер 6, де розраховується траєкторія руху з обминанням перешкод. Застосування масиву таких фасетних елементів дозволяє побудувати біологічно подібну ФСТЗ з широким полем зору та паралельною обробку сигналів. При цьому умовою створення придатних для практичного застосування фасетних елементів є швидкий розрахунок кореляційних функцій при застосуванні недорогих універсальних мікроконтролерів.

Розрахунок дискретної кореляційної функції

Сьогодні навіть невеликі БПЛА, які є у відкритому продажі, можуть розвивати швидкість в межах 50—130 км/год, і для орієнтування у просторі їм необхідно отримувати значення кутової швидкості кожні декілька мілісекунд [18]. Тому задача визначення часу розрахунку ДКФ за допомогою найдешевших МК стає дуже важливою в процесі розробки сучасних ФСТЗ.

Детальний опис методів розрахунку ДКФ та кореляційно-екстремальних систем наведено у [12].

Усі методи обчислення ДКФ можна розділити на дві групи: прямий розрахунок та розрахунок із застосуванням швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). Перша група об'єднує методи, які полягають у виконанні операцій зчитування значення k -го елемента першого вхідного масиву та значення $(k+m)$ -го елемента другого вхідного масиву, їх перемноження та

подальшого додавання добутку до результату, що і є значенням ДКФ:

$$r_m = r_m(a, b) = \sum_{k=0}^{N-1} a_k b_{k+m}, \quad m = 0, 1, \dots, M-1, \quad (1)$$

де r_m — ДКФ вхідних масивів даних a та b ;

N — кількість елементів вхідних масивів, які використовуються для обчислення кореляційної функції;

M — кількість значень ДКФ;

k, m — індекси масивів вхідних даних та масиву ДКФ відповідно.

Далі проводиться пошук максимального значення ДКФ та його індексу, який використовується для визначення кутової швидкості. Звертаємо увагу на те, що для визначення напрямку кутової швидкості треба два рази обчислювати ДКФ — $r_m(a, b)$ та $r_m(b, a)$, тобто спочатку для випадку зсуву сигналу в одному напрямку, а потім у протилежному. Для таких обчислень розмір усіх масивів даних має дорівнювати $N + M$.

Методи з застосуванням ШПФ полягають у виконанні прямого перетворення Фур'є над двома вхідними масивами, перемноження двох отриманих комплексних спектрів та зворотного перетворення Фур'є [19]:

$$\begin{aligned} c_m &= c_m(a, b) = \text{IFFT} \left[\text{FFT}(a) \cdot \text{FFT}(b)^* \right] = \\ &= \text{IFFT}(Sa \cdot Sb^*) = \\ &= \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} (Sa_n \cdot Sb_n^*) \cdot \exp\left(\frac{2\pi}{N} \cdot j \cdot n \cdot m\right), \end{aligned} \quad (2)$$

$m = 0, 1, \dots, N-1,$

$n = 0, 1, \dots, N-1,$

де c_m — циклічна ДКФ масивів даних a та b ;

FFT, IFFT — символи прямого та зворотного швидких перетворень Фур'є;

* — символ комплексно-узгодженого числа;

j, π — константи;

Sa, Sb — комплексні спектри вхідних масивів a та b відповідно:

$$Sa_m = \text{FFT}(a) = \sum_{k=0}^{N-1} a_k \exp\left(-\frac{2\pi}{N} \cdot j \cdot k \cdot m\right);$$

$$Sb_m = \text{FFT}(b) = \sum_{k=0}^{N-1} b_k \exp\left(-\frac{2\pi}{N} \cdot j \cdot k \cdot m\right).$$

Далі робиться пошук максимального значення ДКФ (2) та його індексу. При цьому треба вказати різницю між ДКФ (1) та (2): перший випадок — пряме обчислення, другий — обчислення циклічної ДКФ. Тобто при застосуванні ШПФ вхідні масиви розглядаються як фрагменти великої періодичної структури даних з періодом N , а ДКФ (2) є циклічною та дозволяє оцінити схожість сигналів фотоприймачів при їх зсувах в обох напрямках.

Час обчислення дискретної кореляційної функції мікроконтролером

Спробуємо оцінити час визначення максимального значення дискретної кореляційної функції, його положення та необхідний обсяг оперативної пам'яті при застосуванні двох найрозповсюдженіших універсальних та недорогих МК — ATmega 1284P та STM32F103C8T6 (табл. 1).

Спочатку зробимо порівняння двох методів. Як видно з табл. 2, пряме обчислення потребує виконання більшої кількості операцій, але меншого обсягу оперативної пам'яті. Застосування ШПФ — навпаки: потребує виконання формально меншої кількості операцій, але значно більшого обсягу оперативної пам'яті.

У фасетного елемента є обмеження за часом розрахунку — від 0,001 до 0,01 с, а МК має обмежений обсяг пам'яті. Тому виникає завдання знаходження оптимального методу розрахунку ДКФ, який би задовольняв вимогам як за часом обчислення, так і за обсягом оперативної пам'яті МК.

З метою знаходження такого методу виконаємо аналіз фрагментів підпрограм розрахунку ДКФ, представлених у додатках до статті, які записані на мові асемблер для МК ATmega 1284P та STM32F103C8T6 [22, 23]. Слід зазначити, що сучасні мікроконтролери можуть мати пристрої для швидкої цифрової обробки сигналів (DSP) та пристрої векторних обчислень, але це суттєво збільшує їх вартість. Недорогі

Таблиця 1

Технічні характеристики економічних універсальних мікроконтролерів [20, 21]

Характеристика	Мікроконтролер	
	ATmega 1284P	STM32F103C8T6
Компанія виробник	Microchip www.microchip.com	ST Microelectronics www.st.com
Архітектура	AVR, 8-біт	ARM, 32-біт
Максимальна робоча частота, МГц	20	72
Обсяг постійної пам'яті, Кбайт	128	64
Обсяг оперативної пам'яті, Кбайт	16	20
Розрядність АЦП, біт	10	12
Орієнтовна вартість, долл. США	5 — 7	

Таблиця 2

Порівняння методів обчислення ДКФ

Пряме обчислення	Обчислення з використанням ШПФ
<ul style="list-style-type: none"> не потребує великого обсягу оперативної пам'яті для зберігання результату (для зберігання значення та індексу максимуму кореляційної функції достатньо декілька байтів, усі значення кореляційної функції зберігати необов'язково); розмір масивів вхідних даних може приймати будь-які значення більші ніж 2; використовуються цілі числа без знаку; підпрограма знаходження максимального значення ДКФ є простою; кількість обчислень є великою, особливо при великих розмірах масивів, оскільки вона пропорційна добутку $N \cdot M$ 	<ul style="list-style-type: none"> потребує великого обсягу оперативної пам'яті (для зберігання проміжних даних — комплексних спектрів — та результату масиву значень ДКФ); необхідність зберігання масиву з дискретними значеннями функцій \sin та \cos; розмір масивів вхідних даних повинен приймати певні значення — $N = 2^P$, де P — ціле число більше одиниці; використання операцій з цілими числами зі знаком є обов'язковим; програма для МК є достатньо складною й містить підпрограми ШПФ; кількість обчислень мала, що особливо відчутно при великих розмірах масивів, оскільки вона пропорційна добутку $N \cdot \log_2 N$

МК ATmega 1284P та STM32F103C8T6 таких пристроїв не мають [20, 21]. Тому наведені підпрограми розрахунку ДКФ використовують алгоритм прямого обчислення за формулою (1) та відомий алгоритм ШПФ зі збереженням дискретних значень функцій \sin та \cos , перемножених на певну константу, у вигляді масиву цілих чисел. У **табл. 3** наведено інформацію щодо формул для розрахунку часу обчислення ДКФ та обсягів оперативної пам'яті для цього.

Наведемо фактори, які були враховані в процесі розроблення підпрограм.

1. Для визначення напрямку та абсолютного значення кутової швидкості треба обчислити дві її ортогональні складові. Якщо фасетний елемент має 4 фотоприймачі, з яких зчитуються сигнали та перетворюються у 4 масиви вхідних значень, то при прямому обчисленні (формула (1)) ДКФ треба обчислювати 4 рази: $r_m(a, b)$ та $r_m(b, a)$ для кожного з двох ортогональних напрямків. При застосуванні ШПФ (формула (2)) ДКФ треба обчислювати лише 2 рази — по одному разу для кожного з двох ортогональних напрямків.

2. У 8-розрядному МК ATmega 1284P з 10-бітним АЦП вхідні масиви краще представити у вигляді масиву байтів, а у 32-розрядному МК STM32F103C8T6 з 12-бітним АЦП — як масиви 2-байтових цілих чисел. Відповідно, значення ДКФ треба буде представляти у вигляді 4-байтового числа у МК ATmega та 4- або 8-байтового числа у МК STM32F103C8T6. При розрахунку 4-байтових значень ДКФ є важливе обмеження: якщо використовуються 11 старших розрядів АЦП, то для уникнення переповнення 4-байтних

регістрів МК розмір масивів вхідних даних $N + M$ не повинен перевищувати $2^{10} = 1024$. Перевагою прямого обчислення ДКФ є те, що для отримання її максимального значення не треба зберігати весь масив ДКФ у оперативній пам'яті МК.

3. При обчисленні ДКФ з застосуванням ШПФ у оперативній пам'яті МК треба зберігати 4 вхідні масиви 2-байтових значень, 4 масиви 4-байтових значень для тимчасового зберігання двох комплексних спектрів сигналів та один 4-байтовий масив для зберігання ДКФ. Також для здійснення ШПФ необхідно, щоб допустимі розміри масивів вхідних даних дорівнювали ступеню числа 2, тобто 16, 32, 64 і т. д. У постійній пам'яті МК треба буде зберігати масив з дискретними значеннями функцій \sin та \cos , а сам МК має забезпечувати множення цілих чисел зі знаком. Оскільки 8-розрядний МК ATmega 1284P не містить відповідних для цього машинних команд, обчислення ДКФ з використанням ШПФ на цьому МК розглядатися не буде.

4. Знаходження максимального значення ДКФ полягає у виконанні численних порівнянь з поточним максимальним значенням i , залежно від результату порівняння, зміні цього значення. Тобто час обчислення ДКФ залежатиме від того, якою є послідовність вхідних даних: якщо значення ДКФ постійно зменшуються, тоді час знаходження її максимального значення буде мінімальним; якщо постійно збільшуються — максимальним. Тому для оцінювання часу обчислення був вибраний найгірший випадок — коли час обчислення максимального значення ДКФ буде максимальним.

Таблиця 3

Кількість операцій та обсяг оперативної пам'яті, необхідні для розрахунку ДКФ, при використанні мікроконтролерів ATmega 1284P та STM32F103C8T6

Параметр*	Пряме обчислення ДКФ ($N_{CORR} = 4, N_D = 4$)			Обчислення ДКФ із застосуванням ШПФ ($N_{CORR} = 2, N_D = 4$)
	ATmega 1284P	STM32F103C8T6 8-байтові значення ДКФ	STM32F103C8T6 4-байтові значення ДКФ	STM32F103C8T6 4-байтові значення ДКФ
N_C	$N_{CORR}(27+27M+11NM)$	$N_{CORR}(8+12M+5NM)$	$N_{CORR}(7+7M+5NM)$	$N_{CORR}(34+21 \cdot \log_2 N + (31+81 \cdot \log_2 N) \cdot N)$
t_{CORR}	$N_{CORR}(97+66M+34NM)/f_T$	$N_{CORR}(11+12M+5NM)/f_T$	$N_{CORR}(10+7M+5NM)/f_T$	$N_{CORR}(45+21 \cdot \log_2 N + (31+81 \cdot \log_2 N) \cdot N)/f_T$
V_D , байт	$N_D(N+M)$	$N_D \cdot 2(N+M)$	$N_D \cdot 2(N+M)$	$(18+2N_D) \cdot N$
$\max(N+M)$	4096	2560	2560	512

* N_{CORR} — кількість обчислень ДКФ; N_D — кількість масивів даних; N_C — кількість машинних команд, які необхідно виконати; t_{CORR} — час обчислень за тактової частоти f_T ; V_D — обсяг пам'яті для зберігання даних; $\max(N+M)$ — максимальний розмір масивів вхідних даних.

5. Будемо розглядати МК, які не мають можливості підключення оперативної зовнішньої пам'яті, оскільки така опція ускладнює конструкцію фасетного елемента та збільшує його вартість.

6. Очевидно, що 32-розрядний мікроконтролер STM32F103C8T6 з архітектурою ARM має набагато більшу обчислювальну потужність ніж 8-розрядний МК ATmega 1284P. Своєю чергою, застосування МК ATmega 1284P з архітектурою AVR має свої переваги. По-перше, це простота підключення через меншу кількість виводів корпусу мікросхеми та широкий діапазон напруги живлення — від 1,8 до 5,5 В. По-друге — простота розроблення програм за допомогою інтегрованого середовища AVR Studio у порівнянні з програмами для мікроконтролерів з архітектурою ARM, яка вимагає знання інтерфейсу CMSIS та бібліотек функцій МК серії ST32F103 [22, 23]. Тому вибір МК ATmega 1284P для розроблення та до-

слідження макетів фасетних елементів можна вважати обґрунтованим.

7. Крім обчислення ДКФ МК має ще зчитувати дані з АЦП, задавати параметри програмованого підсилувача, щоб реалізувати автоматичне регулювання підсилення сигналів фотоприймачів, пересилати результати розрахунків у центральний комп'ютер АТЗ. При цьому зауважимо, що ці операції будуть займати набагато менше часу роботи процесора МК, ніж обчислення ДКФ.

У табл. 4 та на рис. 2 наведено інформацію щодо часу обчислення максимального значення ДКФ залежно від розміру масиву вхідних даних. Аналіз отриманих результатів показує наступне:

— недорогі універсальні МК забезпечують час прямого розрахунку максимального значення ДКФ 0,01 с для масивів вхідних даних розміром 512 елементів та 0,001 с для масивів зі 128 елементів. Це

Таблиця 4

Час обчислення максимального значення ДКФ та його положення в масиві ДКФ залежно від розміру масиву вхідних даних $N + M$ при використанні МК ATmega 1284P та STM32F103C8T6

$N + M$	Час прямого обчислення ДКФ, мс ($N_{CORR} = 4, N = M$)			Час обчислення ДКФ із застосуванням ШПФ, мс ($N_{CORR} = 2, N = M$)
	ATmega 1284P	STM32F103C8T6 8-байтові значення ДКФ	STM32F103C8T6 4-байтові значення ДКФ	STM32F103C8T6 4-байтові значення ДКФ
16	0,59	0,02	0,02	0,18
32	2,08	0,08	0,07	0,44
64	7,81	0,31	0,30	1,06
128	30,32	1,18	1,16	2,43
192	67,50	2,63	2,60	—
256	119,40	4,63	4,60	5,52
320	186,00	7,22	7,18	—
384	267,30	10,37	10,31	—
448	363,29	14,09	14,03	—
512	473,99	18,38	18,30	12,35
768	1063,78	41,22	41,11	—
1024	1888,77	73,16	73,01	27,34
1280	2948,96	114,20	114,03	—
1536	4244,35	164,35	164,14	—
1792	5774,93	223,60	223,36	—
2048	7540,73	291,96	291,67	59,97
2560	11777,92	455,97	455,61	—
3072	16955,93	656,39	655,95	—
3584	23074,73	893,21	892,72	—
4096	30134,34	1166,45	1165,88	130,51

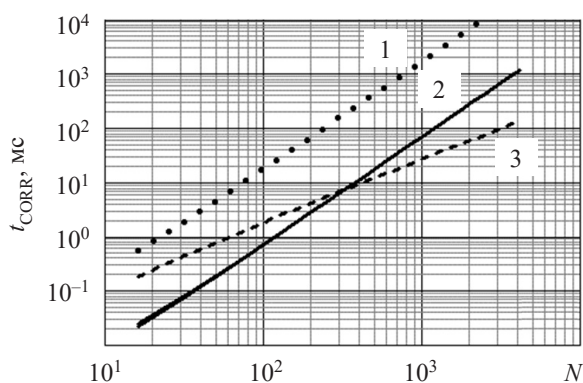


Рис. 2. Залежність часу обчислення ДКФ від розміру масиву даних у разі прямого розрахунку на МК ATmega 1284P (1) та на МК STM32F103C8T6 (2), а також для розрахунку зі застосуванням ШПФ на МК STM32F103C8T6 (3)

означає, що фасетний елемент з універсальним МК задовольняє вимогам АТЗ, у тому числі БПЛА. Слід зазначити, що $N + M = 128$ гарантує динамічний діапазон вимірювача кутової швидкості 64 — 100, що є достатнім для розв’язання задач навігації та орієнтації. Якщо масив має розмір 512 значень, динамічний діапазон може досягати 250 — 400, що робить фасетний елемент точним вимірювачем кутової швидкості;

— МК STM32F103C8T6 забезпечує необхідну швидкість обчислення ДКФ при достатньо низькій ціні. Якщо розмір масиву даних менший за 512 значень, пряме обчислення ДКФ виконується швидше, але у разі 512 значень та більше слід застосовувати алгоритми з ШПФ. Це зумовлено такими факторами, як висока тактова частота МК, 32-розрядна архітектура, виконання усіх команд за один машинний такт, ефективна система команд, особливо — наявність команди множення з додаванням та команд множення чисел зі знаком та без знаку;

— МК ATmega 1284P слід використовувати тільки для макетування фасетних елементів, оскільки він має низьку обчислювальну потужність для забезпечення обчислень ДКФ у реальному часі. Крім того, розробка ФСТЗ може зацікавити не тільки досвідчених інженерів та науковців, а й школярів та студентів, які вже опанували МК з архітектурою AVR та мають бажання створювати оптичні сенсори.

Запропонований фасетний елемент суттєво відрізняється від аналогів [12, 24, 25]. Так, у аналогічних компактних фасетних елементах, які містять МК, ДКФ не обчислюється [12, 24]. Замість цього здійснюється фільтрація низьких частот, порогова обробка та обчислення часу за допомогою таймера між імпульсами — результатами порогової обробки [8—12, 24]. Такий метод вимірювання кутової швидкості не потребує великої кількості обчислень, але його не можна застосовувати, коли співвідношення сигнал/шум є малим і порогова обробка не дозволяє достовірно розділяти корисний сигнал та шумову складову. У [25] приведено цікаву систему для знаходження відстані до перешкод за допомогою оптичних сенсорів у вигляді фасетних елементів з 8 фотодіодами, прикріплених до гвинтів гвинтокрилу. Для знаходження відстані обчислюється нормована ДКФ, але ці розрахунки виконуються за допомогою зовнішнього потужного комп’ютера. Цей розрахунок ДКФ ускладнює необхідність зміни частоти обертів під час польоту, що потребує введення допоміжних часових затримок. Треба зазначити, що запропонований фасетний елемент може забезпечувати обчислення ДКФ у цій системі без використання зовнішнього потужного комп’ютера.

Розроблені авторами варіанти фасетних елементів з МК ATmega 1284P та STM32F103C8T6 представлені на **рис. 3**.

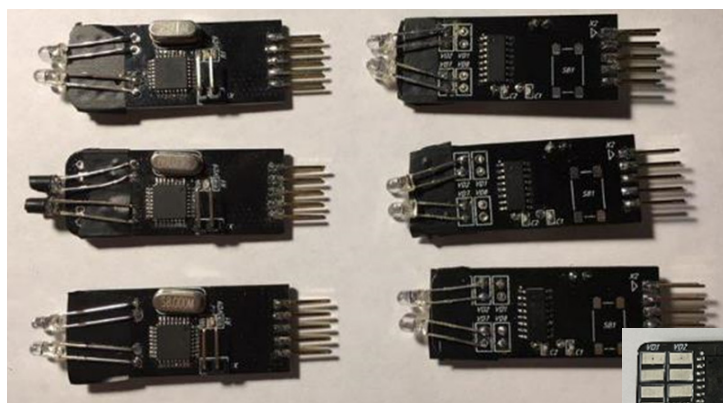
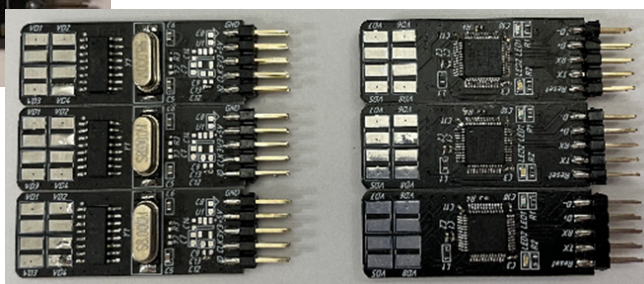


Рис. 3. Фото електронного блоку фасетного елемента з МК ATmega 1284P (ліворуч) та з МК STM32F103C8T6 (праворуч)



Висновки

Отримані результати підтверджують можливість створення недорогих фасетних елементів з використанням універсальних МК з архітектурою ARM, які забезпечують визначення напрямку та значення кутової швидкості об'єктів, що знаходяться у полі зору АТЗ, шляхом обчислення ДКФ сигналів з фотоприймачів за час від 1 до 10 мс. Який метод обчислення ДКФ слід обирати, залежить від розміру масиву даних: якщо менше 512, то швидшим буде пряме обчислення; якщо 512 та більше — суттєво менший час забезпечить обчислення ДКФ з застосуванням ШПФ, але слід пам'ятати, що його можна використовувати тільки у разі виконанні умови $N = 2^p$. При цьому необхідно зазначити, що у більшості випадків можна використовувати пряме обчислення ДКФ, оскільки розміри масиву даних в основному не перевищують 200 — 400 елементів

Усі компоненти пропонованого фасетного елемента є доступними на вітчизняному ринку напівпровідникових компонентів, а це робить можливим їх ма-

сове виробництво. Орієнтована вартість такого фасетного елемента становитиме 400 — 500 грн, а вартість ФСТЗ з 20 — 30 фасетними елементами не перевищуватиме 8 000 — 15 000 гривень.

Дослідження показали, що фасетні елементи на недорогих універсальних мікроконтролерах дозволяють виконати вимірювання шляхом обчислення максимального значення ДКФ сигналів з 4 фотоприймачів за 10,3 мс при розмірі масиву вхідних даних 384 елементи та за 1,2 мс при розмірі до 128 елементів. Тобто запропоновані фасетні системи технічного зору здатні забезпечувати вимірювання розподілу кутових швидкостей рухомих та нерухомих об'єктів, що знаходяться у полі зору автономного транспортного засобу, майже 1000 разів за секунду, що є недосяжним показником для більшості цифрових камер для АТЗ. Це робить такі фасетні системи перспективними сенсорами для навігації, орієнтації та уникнення зіткнень з рухомими та нерухомими об'єктами у майбутніх АТЗ, включно з безпілотними літальними апаратами.

ДОДАТОК А

```
// -----
//          Calculation of discrete correlation function (ARM assembler)
//          64 bits correlation function values, (C) V. Borovytsky, V. Antonenko, 2022
// -----
// Name specifications using                               // Correlation calculation
// assembler directives:                                  M2      ldrh UA, [A1], #2
// A1, A2, B1, NUM_B,                                     ldrh UB, [B1], #2
// CORR_MAX_1, CORR_MAX_0
// CORR_MAX_POS, POS_B
// CORR_1, CORR_0, UA, UB                               umlal CORR_0, CORR_1, UA, UB
// -----                                               cmp A1, A2
// Data addresses initialization                           bne M2
//          ldr A1, DATA_1_Address                       // Calculation of maximum value
//          ldr A2, DATA_1_Address + 2 * N               cmp CORR_MAX_1, CORR_1
//          ldr B1, DATA_2_Address                       bhi M4
//
//          ldr POS_B, #0                                  bls M3
//          ldr NUM_B, M                                   cmp CORR_MAX_0, CORR_0
//
//          ldr CORR_MAX_1, #0                             bhi M4
//          ldr CORR_MAX_0, #0
//          ldr CORR_MAX_POS, POS_B
//
// Data initialization
M1      add B1, POS_B lsl 2
M2      add POS_B, #1
M3      mov CORR_MAX_1, CORR_1
M4      mov CORR_MAX_0, CORR_0
M5      mov CORR_MAX_POS, POS_B
M6      add POS_B, #1
M7      cmp POS_B, NUM_B
M8      bne M1
```

ДОДАТОК А (продовження)

Кількість масивів даних	$N_D = 4$
Обсяг пам'яті для зберігання даних	$V_D = N_D \cdot 2 \cdot (N + M)$
Кількість обчислень ДКФ	$N_{CORR} = 4$
Кількість машинних команд, які потрібно виконати:	$N_C = N_{CORR} \cdot (8 + M \cdot (12 + 5 \cdot N))$
Кількість тактів з урахуванням псевдокоманд завантаження	$N_T = N_{CORR} \cdot (11 + M \cdot (12 + 5 \cdot N))$
Час виконання обчислень з урахуванням тактової частоти МК f_T	$t_{CORR} = N_T / f_T$

ДОДАТОК Б

```
// -----
//      Calculation of discrete correlation function (ARM assembler)
//      32 bits correlation function values, (C) V. Borovytsky, V. Antonenko, 2022
// -----
// Name specifications using
// assembler directives:
// A1, A2, B1, NUM_B,
// CORR_MAX, CORR_MAX_POS, POS_B
// CORR, UA, UB
// -----
// Data addresses initialization
    ldr A1, DATA_1_Address
    ldr A2, DATA_1_Address + 2 * N
    ldr B1, DATA_2_Address

    ldr POS_B, #0
    ldr NUM_B, M

    ldr CORR_MAX, #0
    ldr CORR_MAX_POS, POS_B

// Data initialization
M1    add B1, POS_B lsl 2

// Correlation calculation
M2    ldrh UA, [A1], #2
        ldrh UB, [B1], #2
        mla CORR, UA, UB
        cmp A1, A2
        bne M2

// Calculation of maximum value
        cmp CORR_MAX, CORR

// Assigning the new maximum value
        movls CORR_MAX, CORR
        movls CORR_MAX_POS, POS_B

        add POS_B, #1
        cmp POS_B, NUM_B
        bne M1
```

Кількість масивів даних	$N_D = 4$
Обсяг пам'яті для зберігання даних	$V_D = N_D \cdot 2 \cdot (N + M)$
Кількість обчислень ДКФ	$N_{CORR} = 4$
Кількість машинних команд, які потрібно виконати:	$N_C = N_{CORR} \cdot (7 + M \cdot (7 + 5 \cdot N))$
Кількість тактів з урахуванням псевдокоманд завантаження	$N_T = N_{CORR} \cdot (10 + M \cdot (7 + 5 \cdot N))$
Час виконання обчислень з урахуванням тактової частоти МК f_T	$t_{CORR} = N_T / f_T$

ДОДАТОК В

```
// -----
//      Calculation of discrete correlation function (AVR assembler)
//      32 bits correlation function values, (C) V. Borovytsky, V. Antonenko, 2022
// -----
// Name specifications using                               // Correlation calculation
// assembler directives:                                  M2:  ldr UA, X+
// A1_H (XH), A1_L (XL),                                  ldr UB, Z+
// A2_H (YH), A2_L (YL),                                  mul UA, UB
// B2_H (ZH), B2_L (ZL),                                  add CORR_0, UB
// POS_B_H, POS_B_L                                       adc CORR_1, UA
// NUM_B_H, NUM_B_L                                       adc CORR_2, R_ZERO
// CORR_MAX_3, CORR_MAX_2                                  adc CORR_3, R_ZERO
// CORR_MAX_1, CORR_MAX_0                                  cmp A1_L, A2_L
// CORR_MAX_POS_1,                                         brne M2
// CORR_MAX_POS_0                                         cmp A1_H, A2_H
// CORR_3, CORR_2, CORR_, CORR_0                          brne M2
// UA, UB, R_ZERO
// -----
// Data addresses initialization                            // Calculation of maximum value
ldi A1_H, High( DATA_1_Address )                        cmp CORR_MAX_3, CORR_3
ldi A1_L, Low( DATA_1_Address )                        brgt M4
ldi A1_H, High(DATA_1_Address + N)                       brlt M3
ldi A1_L, Low( DATA_1_Address + N)
ldi B1_H, High( DATA_2_Address )
ldi B1_L, Low( DATA_1_Address )
ldi NUM_B_H, High(DATA_1_size)
ldi NUM_B_L, Low( DATA_1_size )

clr POS_B_H
clr POS_B_L
clr R_ZERO

clr CORR_MAX_3
clr CORR_MAX_2
clr CORR_MAX_1
clr CORR_MAX_0

clr CORR_MAX_POS_1
clr CORR_MAX_POS_0

// Data initialization
M1:  ldi B1_H, High( DATA_B )
     ldi B1_L, Low( DATA_B )

     add B1_L, POS_B_L
     adc B1_H, POS_B_H

M2:  ldr UA, X+
     ldr UB, Z+
     mul UA, UB
     add CORR_0, UB
     adc CORR_1, UA
     adc CORR_2, R_ZERO
     adc CORR_3, R_ZERO
     cmp A1_L, A2_L
     brne M2
     cmp A1_H, A2_H
     brne M2

// Calculation of maximum value
cmp CORR_MAX_3, CORR_3
brgt M4
brlt M3

cmp CORR_MAX_2, CORR_2
brgt M4
brlt M3

cmp CORR_MAX_1, CORR_1
brgt M4
brlt M3

cmp CORR_MAX_0, CORR_0
brgt M4

// Assigning the new maximum value
M3:  mov CORR_MAX_3, CORR_3
     mov CORR_MAX_2, CORR_2
     mov CORR_MAX_1, CORR_1
     mov CORR_MAX_0, CORR_0
     mov CORR_MAX_POS_1, B_POS_1
     mov CORR_MAX_POS_0, B_POS_0

M4:  inc POS_B_L
     adc POS_B_H, R_ZERO

     cmp POS_B_L, NUM_B_L
     brne M1
     cmp POS_B_H, NUM_B_H

     brne M1

Кількість масивів даних                               ND = 4
Обсяг пам'яті для зберігання даних                     VD = ND · ( N + M )
Кількість обчислень ДКФ                                 NCORR = 4
Кількість машинних команд, які потрібно виконати:     NC = NCORR · ( 27 + M · ( 27 + 11 · N ) )
Кількість тактів з урахуванням псевдокоманд завантаження NT = NCORR · 2 · ( 47 + M · ( 33 + 17 · N ) )
Час виконання обчислень з урахуванням тактової частоти МК fT:   tCORR = NT / fT
```


ДОДАТОК Г (продовження)

```

ldr X1_Re, [A1], #4
ldr X1_Im, [A1]
ldr Y1_Re, [B1], #4
ldr Y1_Im, [B1]

// -----
// "Butterfly" calculation
// X2 = X1 + Y1
// Y2 = ( X1 - Y1 ) * W(k,N)
// W(k,N)=exp(- 2 * Pi * j *k / N )
// -----

add U, X1_Re, Y1_Re
str U, [A1, #-4]

add U, X1_Im, Y1_Im
str U, [A1]

sub X1_Re, Y1_Re
sub X1_Im, Y1_Im

ldr A1, Cos_Sin_Table_Address
mla A1, bnum_max lsl 2, bpos, A1

ldr U, [A1], #4 // load cos-value

smull Y1_Re, U, X1_Re, U
str U, [B1, #-4]

ldr U, [A1] // load sin-value
smull Y1_Im, U, X1_Im, U
str U, [B1]

add bpos, #1
cmp bpos, bstep
bne M3

add bnum, #1
ldr U, NUM_MAX
cmp bnum, U
bne M2

mov bnum_max, bnum_max lsr 1
mov bstep, bstep lsl 1

add rep_num, #1
ldr U, LOG2N
cmp rep_num, U
bne M1
ENDP
    
```

Кількість масивів даних $N_D = 4$
 Обсяг пам'яті для зберігання даних $V_D = (4 \cdot N_D + 4 \cdot 4 + 4 \cdot 1) \cdot N$
 Кількість обчислень ДКФ $N_{CORR} = 2$
 Кількість машинних команд, як треба виконати:

- 1) підготовка двох масивів комплексних даних:
 $N_{C1} = N_{CORR} \cdot (4 + 5 \cdot N)$
- 2) два прямих швидких перетворення Фур'є:
 $N_{C2} = N_{CORR} \cdot (3 + \log_2(N) \cdot (8 + 28 \cdot N)) = N_{CORR} \cdot (6 + 8 \cdot \log_2(N) + 28 \cdot \log_2(N) \cdot N)$
- 3) перемноження двох комплексних спектрів:
 $N_{C3} = N_{CORR} \cdot (3 + 14 \cdot N)$
- 4) одне зворотне швидке перетворення Фур'є:
 $N_{C4} = N_{CORR} \cdot (3 + \log_2(N) \cdot (8 + 28 \cdot N)) = N_{CORR} \cdot (6 + 8 \cdot \log_2(N) + 28 \cdot \log_2(N) \cdot N)$
- 5) розрахунок максимального значення ДКФ та його індексу:
 $N_{C5} = N_{CORR} \cdot (5 + 7 \cdot N)$

Загальна кількість машинних команд, як треба виконати:
 $N_C = 2 \cdot N_{C1} + 2 \cdot N_{C2} + N_{C3} + N_{C4} + N_{C5} =$
 $= N_{CORR} \cdot (25 + 24 \cdot \log_2(N) + (31 + 84 \cdot \log_2(N)) \cdot N)$

Кількість тактів з урахуванням псевдокоманд завантаження:

- 6) підготовка двох масивів комплексних даних:
 $N_{T1} = N_{CORR} \cdot (7 + 5 \cdot N)$
- 7) два прямих швидких перетворення Фур'є:
 $N_{T2} = N_{CORR} \cdot (4 + \log_2(N) \cdot (9 + 31 \cdot N)) = N_{CORR} \cdot (4 + 9 \cdot \log_2(N) + 31 \cdot \log_2(N) \cdot N)$
- 8) перемноження двох комплексних спектрів:
 $N_{T3} = N_{CORR} \cdot (6 + 14 \cdot N)$
- 9) одне зворотне швидке перетворення Фур'є:
 $N_{T4} = N_{CORR} \cdot (4 + \log_2(N) \cdot (9 + 31 \cdot N)) = N_{CORR} \cdot (4 + 9 \cdot \log_2(N) + 31 \cdot \log_2(N) \cdot N)$

ДОДАТОК Г (продовження)

10) розрахунок максимального значення ДКФ та його індексу:

$$N_{T5} = N_{CORR} \cdot (7 + 7 \cdot N)$$

Загальна кількість машинних тактів, які треба виконати для обчислення ДКФ:

$$N_T = 2 \cdot N_{C1} + 2 \cdot N_{C2} + N_{C3} + N_{C4} + N_{C5} = \\ = N_{CORR} \cdot (39 + 27 \cdot \log_2(N)) + (31 + 93 \cdot \log_2(N)) \cdot N$$

Час виконання обчислень t_{CORR} з урахуванням тактової частоти МК f_T : $t_{CORR} = N_T / f_T$

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

- Custers B. *The Future of Drone Use*. Hague: TMC Asser Press, 2016. <https://doi.org/10.1007/978-94-6265-132-6>
- D'Andrea R. Can drones deliver? *IEEE Trans. on Automation Science and Engineering*, 2014, no. 11(3), pp. 647–648. <https://doi.org/10.1109/TASE.2014.2326952>
- Gallego G., Delbruck T., Orchard G. et al. Event-based vision: A survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2019, vol. 44, iss. 1, pp. 154–180. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2020.3008413>
- Barrios-Avilés J., Iakymchuk T., Samaniego J. et al. Movement detection with event-based cameras: Comparison with frame-based cameras in robot object tracking using powerlink communication. *Electronics*, 2018, no. 7(11), 304, pp. 1–19. <https://doi.org/10.3390/electronics7110304>
- Döge J., Hoppe C., Reichel P. et al. A 1 megapixel HDR image sensor soc with highly parallel mixed-signal processing. *Proc. of 2015 IISW*, 2015, Vaals, Netherlands. <https://bit.ly/3xLbDHI>
- Franceschini N. Small brains, smart machines: from fly vision to robot vision and back again. *Proc. of IEEE*, 2014, no. 102, pp. 1–31. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2014.2312916>
- Leitel R., Brückner A., Buss W. et al. Curved artificial compound-eyes for autonomous navigation. *Proc. of SPIE*, 2014, vol. 9130, pp. 91300H. <https://doi.org/10.1117/12.2052710>
- Colonnier F., Ramirez-Martinez S., Viollet S. et al. A bio-inspired sighted robot chases like a hoverfly. *Bioinspiration&Biomimetics*, 2019, vol. 14, no. 3, 036002. <https://doi.org/10.1088/1748-3190/aaffa4>
- Juston R., Viollet S. A miniature bio-inspired position sensing device for the control of micro-aerial robots. *Proc. of IEEE/RSJ*, 2012, Vilamoura, pp. 1118–1124. <http://dx.doi.org/10.1109/IROS.2012.6385937>
- Colonnier F., Manecy A., Juston R. et al. A small-scale hyperacute compound eye featuring active eye tremor: Application to visual stabilization, target tracking, and short-range odometry. *Bioinspiration&biomimetics*, 2015, no. 10(2), 026002. <https://doi.org/10.1088/1748-3190/10/2/026002>
- Zhao J., Hu C., Zhang C. et al. A bio-inspired collision detector for small quadcopter. *Proc. of IJCNN 2018*, 2018, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2018.8489298>
- Ruffier F., Viollet S., Amic S. et al. Bio-inspired optical flow circuits for the visual guidance of micro air vehicles. *Proc. of ISCAS 2003*, 2003, pp. III-III. <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2003.1205152>
- Aubépart F., Serres J., Dilly A. et al. Field programmable gate array (FPGA) for bio-inspired visio-motor control systems applied to micro-air vehicles. *Aerial Vehicles*. Delph, InTech, 2009. <https://doi.org/10.5772/6466>
- Mockel R. *Bio-Inspired Optical Flow Vision Sensors for Visual Guidance of Autonomous Robots*. Dissertation ... Doctor of Sciences – DISS. ETH no. 20736, 1981, 270 p. <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/153958>
- Баклицкий В.К. *Корреляционно-экстремальные методы навигации и наведения*, Тверь, Книжный клуб, 2009, 360 с.
- Боровицький В., Антоненко В. *Датчик швидкості для безпілотного літального апарата*. Патент України № 143 242, 27.07.2020, бюл. № 14.
- Borovytsky V., Antonenko V. Biologically inspired compound eye. *Proc. SPIE*, 2020, vol. 11369, pp. 113691T. <https://doi.org/10.1117/12.2553678>
- Valavanis K.P., Vachtsevanos G. J. *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*. Heidelberg, Springer Publishing Company Inc., 2014, 3022 p. <https://doi.org/10.5555/2692452>
- Нуссбаумер Г. *Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления свёрток*. Москва: Радио и связь, 1985, 248 с.
- Microchip Technology Inc. 8-bits MCUs. AVR® MCUs, <https://www.microchip.com/en-us/products/microcontrollers-and-microprocessors/8-bit-mcus/avr-mcus>
- STMicroelectronics. STM32F103, <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f103.html>
- Ревич Ю. В. *Практическое программирование микроконтроллеров Atmel AVR на языке ассемблера*. Санкт-Петербург, БХВ-Петербург, 2011, 352 с.
- Козаченко В. Ф. *Практический курс микропроцессорной техники на базе процессорных ядер ARM-Cortex-M3/M4/M4F*, Москва, МЭИ, 2019, 543 с.
- Roubieu F. L., Expert F., Boyron M. et al. A novel 1-gram insect based device measuring visual motion along 5 optical directions. *Sensors*, 2011 IEEE Proc., 2011, Limerick, Ireland. pp. 687–692. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2011.6127157>
- Viel C., Viollet S. Fast normalized cross-correlation for measuring distance to objects using optic flow, applied for helicopter obstacle detection. *Measurement*, 2020, vol. 172, no. 5, pp. 108911–108921. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108911>

Дата надходження рукопису до редакції 20.01 2022 р.

Опис статті для цитування:

Боровицький В. М., Антоненко В. А. Розрахунок дискретної кореляційної функції у фасетних системах технічного зору. Технологія і конструювання в електронній апаратурі, 2022, № 1–3, с. 8–21. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2022.1-3.08>

Cite the article as:

Borovytsky V. N., Antonenko V. A. Calculation of discrete correlation function in facet systems of technical vision. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature*, 2022, no. 1–3, pp. 8–21. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2022.1-3.08>

CALCULATION OF DISCRETE CORRELATION FUNCTION IN FACET SYSTEMS OF TECHICAL VISION

The paper proposes a facet vision system composed from identical facet elements. Each facet element contains an optical system, several photodetectors, a preamplifier, and a universal microcontroller. In such a system, all facet elements operate independently of each other. Each facet element performs fast measurements of the angular velocity of objects in its field of view by calculating the discrete correlation functions of the signals from the photodetectors. The paper considers the possibility of using economical microcontrollers in facet elements for fast calculation of the discrete correlation functions. The authors perform a comparative analysis of the techniques based on the direct calculation and the calculation with fast Fourier transform. The investigation of the corresponding program code for microcontrollers in assembly language is done with calculations of the number of machine instructions and their execution time. The study confirms that economical universal microcontrollers are able to perform fast measurements by finding the maximum values of discrete correlation functions. In the case of receiving signals from 4 photodetectors, the calculation time is less than 10 milliseconds for input data arrays of 384 elements and less than 1.2 milliseconds for input data arrays of 128 elements. These results make the proposed facet vision systems applicable in navigation, orientation, and collision avoidance with moving and stationary objects in automatic vehicles, including unmanned aerial vehicles.

Keywords: vision systems, digital signal processing, angular velocity measurement, discrete correlation function, digital cameras, unmanned aerial vehicles.

REFERENCES

1. Custers B. *The Future of Drone Use*. Hague: TMC Asser Press, 2016. <https://doi.org/10.1007/978-94-6265-132-6>
2. D'Andrea R. Can drones deliver? *IEEE Trans. on Automation Science and Engineering*, 2014, no. 11(3), pp. 647–648. <https://doi.org/10.1109/TASE.2014.2326952>
3. Gallego G., Delbruck T., Orchard G. et al. Event-based vision: A survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2019, vol. 44, iss. 1, pp. 154–180. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2020.3008413>
4. Barrios-Avilés J., Iakymchuk T., Samaniego J. et al. Movement detection with event-based cameras: Comparison with frame-based cameras in robot object tracking using powerlink communication. *Electronics*, 2018, no. 7(11), 304, pp. 1–19. <https://doi.org/10.3390/electronics7110304>
5. Döge J., Hoppe C., Reichel P. et al. A 1 megapixel HDR image sensor soc with highly parallel mixed-signal processing. *Proc. of 2015 IISW*, 2015, Vaals, Netherlands. <https://bit.ly/3xLbDhI>
6. Franceschini N. Small brains, smart machines: from fly vision to robot vision and back again. *Proc. of IEEE*, 2014, no. 102, pp. 1–31. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2014.2312916>
7. Leitel R., Brückner A., Buss W. et al. Curved artificial compound-eyes for autonomous navigation. *Proc. of SPIE*, 2014, vol. 9130, pp. 91300H. <https://doi.org/10.1117/12.2052710>
8. Colonnier F., Ramirez-Martinez S., Viollet S. et al. A bio-inspired sighted robot chases like a hoverfly. *Bioinspiration&Biomimetics*, 2019, vol. 14, no. 3, 036002. <https://doi.org/10.1088/1748-3190/aaffa4>
9. Juston R., Viollet S. A miniature bio-inspired position sensing device for the control of micro-aerial robots. *Proc. of IEEE/RSJ*, 2012, Vilamoura, pp. 1118–1124. <http://dx.doi.org/10.1109/IROS.2012.6385937>
10. Colonnier F., Manecy A., Juston R. et al. A small-scale hyperacute compound eye featuring active eye tremor: Application to visual stabilization, target tracking, and short-range odometry. *Bioinspiration&Biomimetics*, 2015, no. 10(2), 026002. <https://doi.org/10.1088/1748-3190/10/2/026002>
11. Zhao J., Hu C., Zhang C. et al. A bio-inspired collision detector for small quadcopter. *Proc. of IJCNN 2018*, 2018, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2018.8489298>
12. Ruffier F., Viollet S., Amic S. et al. Bio-inspired optical flow circuits for the visual guidance of micro air vehicles. *Proc. of ISCAS 2003*, 2003, pp. III-III. <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2003.1205152>
13. Aubépart F., Serres J., Dilly A. et al. Field programmable gate array (FPGA) for bio-inspired visio-motor control systems applied to micro-air vehicles. *Aerial Vehicles*. Delph, InTech, 2009. <https://doi.org/10.5772/6466>
14. Mockel R. *Bio-Inspired Optical Flow Vision Sensors for Visual Guidance of Autonomous Robots*. Dissertation... Doctor of Sciences – DISS. ETH no. 20736, 1981, 270 p. <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/153958>
15. Baklitskiy V.K. *Korrelyatsionno-ekstremal'nyye metody navigatsii i navedeniya* [Correlation-extreme methods of navigation and guidance]. Russia, Tver, Publisher book club, 2009, 360 p. (Rus)
16. Borovytsky V., Antonenko V. [Speed sensor for unmanned aerial vehicle] Pat.UA no. 142 242, 2020, bul. 14 (Ukr)
17. Borovytsky V., Antonenko V. Biologically inspired compound eye. *Proc. SPIE*, 2020, vol. 11369, pp. 113691T. <https://doi.org/10.1117/12.2553678>
18. Valavanis K.P., Vachtsevanos G. J. *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*. Heidelberg, Springer Publishing Company Inc., 2014, 3022 p. <https://doi.org/10.5555/2692452>
19. Nussbaumer G. *Bystroye preobrazovaniye Fur'ye i algoritmy vychisleniya sv'ortok* [Fast Fourier Transform and Convolution Algorithms]. Russia, Moscow, Radio and communications, 1985, 248 p. (Rus)
20. Microchip Technology Inc. 8-bits MCUs. AVR® MCUs, <https://www.microchip.com/en-us/products/microcontrollers-and-microprocessors/8-bit-mcus/avr-mcus>
21. *STMicroelectronics*. STM32F103, <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f103.html>
22. Revich Yu. V. *Prakticheskoye programmirovaniye mikrokontrolerov Atmel AVR na yazyke assemblera* [Practical programming of Atmel AVR microcontrollers in assembly language]. Russia, Saint-Petersburg, BHV-Petersburg, 2011, 352 p. (Rus)
23. Kozachenko V. F. *Prakticheskij kurs mikroprotsessornoy tekhniki na baze protsessornykh yader ARM-Cortex-M3/M4/M4F* [Practical course of microprocessor technology based on ARM-Cortex-M3/M4/M4F processor cores]. Russia, Moscow: MEI, 2019, 543 p. (Rus)
24. Roubieuf F. L., Expert F., Boyron M. et al. A novel 1-gram insect based device measuring visual motion along 5 optical directions. *Sensors, 2011 IEEE Proc.*, 2011, Limerick, Ireland. pp. 687–692. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2011.6127157>
25. Viel C., Viollet S. Fast normalized cross-correlation for measuring distance to objects using optic flow, applied for helicopter obstacle detection. *Measurement*, 2020, vol. 172, no. 5, pp. 108911–108921. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108911>

Д. ф.-м. н. С. В. ПЛАКСІН, М. Я. ЖИТНИК, Р. Ю. ЛЕВЧЕНКО, С. Я. ОСТАПОВСЬКА

Україна, м. Дніпро, Інститут транспортних систем та технологій НАН України

E-mail: levchenko.ruslana@westa-inter.com

ІМПУЛЬСНИЙ МЕТОД ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ ЗАРЯДНИМ ПРОЦЕСОМ НАКОПИЧУВАЧА ЕНЕРГІЇ

Обґрунтовано та експериментально підтверджено багатофункціональність розробленого авторами одноімпульсного гальваностатичного методу, який дозволяє поєднувати функції контролю поточного стану та оперативного управління процесом зарядки накопичувача при його роботі в динамічному режимі. Критерієм контролю та управління обрано узагальнений енергетичний показник — коефіцієнт використання активних матеріалів, інформаційним еквівалентом якого є величина площі під кривою деполяризації на сигналі відгуку накопичувача після зняття зарядного імпульсу.

Ключові слова: накопичувач енергії, імпульсний гальваностатичний метод, сигнал відгуку, коефіцієнт використання матеріалів, узагальнений енергетичний показник.

Останніми роками активно проводяться дослідження щодо застосування накопичувачів енергії у різних галузях електроенергетики [1, 2]. Накопичувачі енергії є найважливішим невіддільним елементом автономних енергосистем, особливо енергосистем на базі відновлюваних джерел енергії, а також на транспортних засобах різного призначення, де вони є основним джерелом енергії. Оскільки їх роль у цих енергосистемах є ключовою, питання управління режимами роботи накопичувачів має важливе значення, а вибір методів управління є актуальною задачею.

Накопичувач енергії — це багатофункціональний електротехнічний комплекс, до складу якого входять електрохімічна система накопичення й зберігання енергії та система управління, яка визначає функціонал накопичувача залежно від розв'язуваних завдань. Основними режимами роботи накопичувача енергії, якими необхідно керувати, є робочий, коли витрачається запасена енергія, та режим заряджання з метою поповнення витраченої енергії. Методи управління електротехнічними комплексами, до яких належать і накопичувачі енергії, розробляються за такими основними напрямками [1]:

— датчикові методи управління, засновані на прямому вимірі значень керованих параметрів;

— бездатчикові методи управління, засновані на створенні моделей управління та визначенні величини керованих параметрів у рамках відповідних моделей;

— адаптивні методи управління, засновані на пошуку оптимального результату за спеціально розробленим алгоритмом шляхом підстроювання потоку даних, що надходять від засобів виміру, під набір відповідних аналізованих параметрів.

Нашою метою було розроблення методу оперативного контролю та управління зарядним процесом електрохімічного накопичувача енергії в динамічних режимах його роботи.

Існуючі методи управління процесами велелектрохімічних накопичувачах енергії та їх класифікація

Методи управління електрохімічними накопичувачами в автономних системах достатньо різноманітні та досить повно відображені у численних роботах, наприклад [3—9]. Традиційними є методи управління зарядним процесом з використанням постійного струму та постійної напруги, а також їх комбінацій [3, 4]. У роботі [5] автори наводять оглядові відомості про імпульсні методи управління процесом зарядки та вплив імпульсної зарядки на параметри літій-іонних акумуляторів. Низка робіт, наприклад [6], присвячені дослідженням методів прогностичного управління, які дозволяють передбачати працездатність накопичувача залежно від умов його експлуатації в мікромережах на основі відновлюваних джерел енергії. Подальший розвиток отримують адаптивні методи управління [7], в основі яких лежить пошук оптимального результату шляхом підстроювання під потік даних, що надходять від засобів виміру (адаптивний алгоритм).

За результатами аналізу літературних джерел інформації виконано систематизацію та класифікацію методів управління режимом зарядки електрохімічних накопичувачів енергії та відзначено особливості їх застосування. Виходячи з інформації на **рис. 1**, можна зробити висновки, що низка методів знаходиться на стадії досліджень і розроблення або використовуються в лабораторних умовах і з різних при-

СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ТА ОБРОБКИ СИГНАЛІВ

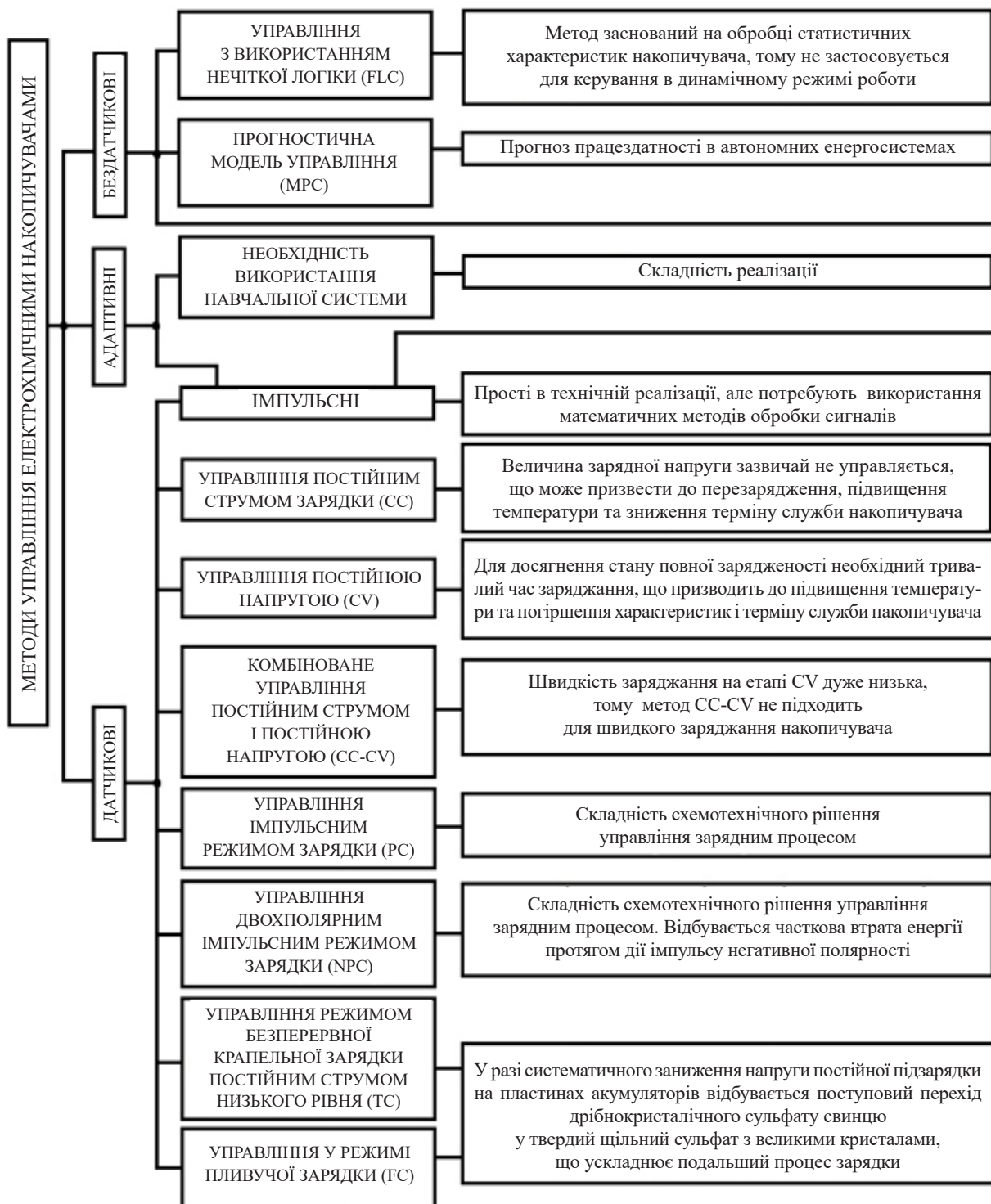


Рис. 1. Методи управління режимом зарядки електрохімічних накопичувачів енергії

чин не отримали практичного застосування. Поряд із цим зазначимо, що на сьогодні практичне застосування знаходять переважно методи управління зарядним процесом постійним струмом і постійною напругою та їх комбінації, або постійнострумові методи, та імпульсні методи управління. У постійнострумових методах контрольованими та керованими параметра-

ми є зарядний струм та зарядна напруга, а критерієм закінчення зарядного процесу є мінімальне значення зарядного струму, постійне значення напруги накопичувача та постійне значення щільності електроліту в наливних акумуляторах.

Можливості застосування методів управління процесом зарядки накопичувачів у системах автономно-

го електропостачання необхідно розглядати з урахуванням специфіки їх функціонування у цих системах. У загальному випадку раціональним способом ефективної експлуатації електрохімічного накопичувача енергії у системі автономного електропостачання є його робота у номінальних режимах. Проте дотримання номінальних режимів роботи накопичувача не завжди дозволяє повною мірою реалізувати робочі режими власне системи електропостачання. Наприклад, у випадку експлуатації акумуляторних батарей з невідомим рівнем заряду на транспортному засобі (ТЗ) існує небезпека зниження запасу енергії в системі електропостачання нижче мінімально допустимого рівня у момент, коли потрібна передача додаткової енергії тяговому приводу в форсованому режимі його роботи. Така ситуація означає, що ТЗ не здатен реалізувати задані динамічні характеристики. Протиріччя може бути вирішено шляхом виконання раціональних умов експлуатації накопичувача, за яких відбуватиметься збереження його енергії в допустимих межах. Це може бути досягнуто використанням відповідного методу контролю поточного енергетичного стану накопичувача й адекватного цьому стану методу оперативного управління режимами його роботи. Існують різні режими експлуатації накопичувачів хімічних джерел струму, що входять до складу систем енергозабезпечення залежно від їх призначення. Основні з них представлені на **рис. 2** [1, с. 10].

Найбільш інтенсивний режим експлуатації — чергування циклів «заряд-розряд» — характерний для тягових акумуляторних батарей. Під час функціонування накопичувача у системі електропостачання транспортного засобу переважають інтенсивні цикли, коли протягом денної експлуатації тягова акумуляторна батарея піддається декільком повним циклам «заряд-розряд» (рис. 2, *з*). У зв'язку з тим, що чергування періодичності циклів є випадковим процесом, тобто робота ТЗ нерегламентована та непередбачувана, накопичувач може знаходитись у робочому стані невизначений час без заряджання. В результаті систематичних недозаряджень виникає непоправна втрата ємності, викликана утворенням

цільної сульфатної плівки на поверхні активних мас електродів. Перетворення цієї плівки в активну масу ускладнює процес подальшої зарядки накопичувача, оскільки потребує для цього додаткової витрати як енергії, так і часу.

Поряд із проблемою недозарядження стоїть проблема перезарядження — якщо досягнуто стан повної зарядженості, заряджання накопичувача слід припинити. Однак в реальних умовах експлуатації накопичувача в динамічних режимах воно триває через відсутність об'єктивних критеріїв зарядженості. Систематичне перезаряджання сприяє розпушенню та зсуву активної маси з пластин електродів, що також призводить до непоправної втрати ємності накопичувача. Звідси випливає, що при експлуатації накопичувача в динамічних режимах він завжди перебуває або у режимі недозарядження, або перезарядження, внаслідок чого порушується його енергетичний баланс.

До глибокого розрядження та надмірного перезарядження, перевищення критичних рівнів струмів і температури дуже чутливі літій-іонні акумулятори. Такі явища можуть призвести до незворотних процесів у структурі самої батареї, до її пошкодження і, як наслідок, до зниження продуктивності накопичувача енергії на їх основі. Отже, для ефективної роботи накопичувача в динамічному режимі та подовження терміну служби необхідно підтримувати його енергетичний баланс. Крім того, в реальному хімічному джерелі струму крім струмоутворюючих реакцій завжди мають місце небажані побічні процеси (зазвичай незворотні) електрохімічної та хімічної природи, на які витрачається певна кількість енергії. В результаті розрядна ємність кожного циклу виявляється меншою за кількість енергії, витраченої на попередній стадії зарядки, тобто фактична ємність накопичувача знижується від циклу до циклу. У зв'язку з цим у будь-якому варіанті експлуатації накопичувача необхідно раціонально використовувати його енергію шляхом контролю поточного енергетичного стану та оперативного управління режимами роботи відповідно до фактичної залишкової ємності. Крім того, функціонування накопичувача в динамічних режимах з короткочасними періодами «розряд-заряд» су-

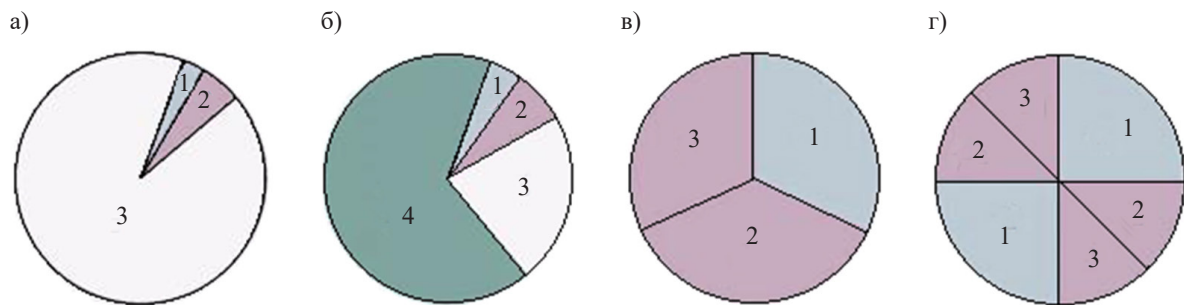


Рис. 2. Режими експлуатації стаціонарних (*а*), стартерних (*б*), тягових (*в* — в нормальному режимі, *г* — в інтенсивному) акумуляторних батарей:

1 — розряд; 2 — повний заряд; 3 — частковий заряд; 4 — неробочий режим

проводжується швидкоплинними перехідними процесами в електрохімічній системі накопичувача. Використовувати в цих режимах такі контрольовані параметри, як величини напруги та струму, недоцільно через непостійність їх величини. З цієї ж причини ці параметри не можна використовувати як критерій закінчення зарядного процесу, оскільки це може призвести до перезарядження або до систематичного недозарядження накопичувача.

Порівняно новим застосуванням зарядних технологій, що швидко розвивається, є парк електромобілів, в них динамічний режим роботи накопичувачів — основного джерела електроенергії — найбільш виражений. Зазвичай ключовим завданням виробників електромобілів є збільшення дальності пробігу, що висуває нові вимоги як до накопичувачів, так і до методів управління режимами їх роботи. Одним зі шляхів розв'язання такої задачі на цьому етапі є розроблення та впровадження технологій швидкої зарядки накопичувачів постійним струмом з використанням потужних силових зарядних пристроїв. При цьому системою захисту обладнано лише зарядні пристрої для запобігання виходу їх з ладу у разі перевищення допустимих значень зарядних струмів і напруги, в той час як безпека накопичувача в режимі прискореної зарядки забезпечується лише надійною ізоляцією по ланцюгах живлення [8]. При цьому основним критерієм визначення закінчення зарядного процесу є розрахований для конкретного типу накопичувача час заряджання, тривалість якого залежить від режиму експлуатації електромобіля і може становити, як зазначають автори [8], від 24 годин до 15 хвилин. Але слід зазначити, що без урахування залишкової ємності такий критерій не дозволяє об'єктивно оцінити поточний енергетичний стан накопичувача, що може негативно позначитися на терміні його експлуатації та призвести до передчасного виходу з ладу.

Аналіз існуючих методів управління процесом заряджання накопичувачів та урахування зазначеної специфіки їх функціонування в системах автономного електропостачання вказує на те, що для оперативного управління динамічними режимами роботи накопичувача з метою раціонального використання його енергоресурсу необхідно удосконалити існуючі та розробляти нові методи.

Імпульсний гальваностатичний метод управління зарядним процесом електрохімічних накопичувачів енергії

Для ефективної експлуатації електрохімічного накопичувача енергії потрібен метод оперативного управління режимами його роботи, який передбачає вибір параметрів контролю й управління та діапазон їх відхилення від заданих значень, у межах якого забезпечується збалансований енергетичний режим функціонування накопичувача. Як зазначалося вище, в постійнострумових методах управління

контрольованими та керованими параметрами зарядного процесу є зарядний струм і зарядна напруга, значення яких не завжди відповідають поточному енергетичному стану накопичувача. Як видно з рис. 1, найбільш універсальними методами управління процесом зарядки накопичувачів енергії є імпульсні методи різної модифікації, які можуть бути реалізовані у вигляді датчикових, бездатчикових або адаптивних методів. В імпульсних методах керованими є параметри зарядних імпульсів — частота, тривалість, амплітуда та пауза між імпульсами, що дозволяють здійснювати багатопараметричне управління процесом зарядки. Критеріями закінчення зарядного процесу в імпульсних методах управління, як і в постійнострумових, є мінімальне значення зарядного струму, значення постійної напруги накопичувача та постійне значення щільності електроліту в наливних акумуляторах, які з зазначених вище причин не можуть бути об'єктивними критеріями в динамічних режимах роботи накопичувача. Водночас відомо, що основним параметром накопичувача енергії, величина якого визначає його енергетичний стан та працездатність, є ємність. З цього погляду перспективною представляється розробка методу оперативного управління динамічними режимами роботи накопичувача, заснованого на використанні енергетичного параметра як основного критерію працездатності. Очевидно, що контролювати та змінювати значення фактичної ємності накопичувача в процесі його роботи традиційними методами та приладовими засобами є важкоздійсненним завданням, тому для його розв'язання необхідні нові підходи та методи. Одним з варіантів вибору критерію, за допомогою якого можна охарактеризувати поточний енергетичний стан накопичувача, є коефіцієнт використання активних матеріалів хімічного джерела струму, який відповідно до закону Фарадея виражається відомим в електрохімії рівнянням

$$\theta = \frac{C_p}{C_0} \cdot 100\% = \frac{C_p}{km} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де C_p — ємність хімічного джерела струму в процесі розряджання;

C_0 — теоретична ємність, розрахована за електрохімічними еквівалентами;

k — електрохімічний еквівалент розрядних процесів;

m — активна маса, що бере участь у процесі струмоутворення.

З виразу (1) випливає, що фактична ємність накопичувача є пропорційною активній масі електродів, яка бере участь у процесі струмоутворення в поточний момент часу. Своєю чергою активна маса пропорційна площі поверхні, що бере участь в електрохімічному процесі в поточний момент часу. Таким чином, задача визначення поточного енерге-

тичного стану накопичувача зводиться до визначення площі реагуючої поверхні активної маси ϵ і є тісно пов'язаною з особливостями протікання електрохімічного процесу в об'ємі порового простору активних мас електродів в поточний момент.

Інформативним методом контролю протікання електрохімічного процесу є імпульсний гальваностатичний метод, який широко використовується в електрохімії. Суть методу полягає у подачі на електрохімічну систему зарядного імпульсу струму заданої величини з подальшою реєстрацією сигналу відгуку, що відображає стадії процесу у формі функціональної залежності напруги системи від часу. Можливість застосування імпульсного гальваностатичного методу для контролю енергетичного стану хімічного джерела струму обґрунтована та експериментально підтверджена у роботі [9].

Наведена на **рис. 3** типова форма сигналу відгуку накопичувача на зарядний імпульс відображає закономірну послідовність протікання стадій електрохімічного процесу в об'ємі пористого простору активних мас електродів і містить необхідну інформацію про поточні значення параметрів процесу, в тому числі про величину площі S фігури під кривою деполіаризації $U_{сп}$ після зняття зарядного імпульсу. На основі попередніх результатів досліджень з вивчення зв'язку параметрів сигналу відгуку, що відображають параметри процесу, з параметрами хімічного джерела струму зроблено висновок, що площа S пропорційна величині запасеної в накопичувачі енергії та може бути використана як інформаційний параметр, еквівалентний енергетичному параметру.

З метою обґрунтування пропорційності залежності величини запасеної в накопичувачі енергії від площі S під кривою деполіаризації $U_{сп}$ коротко розглянемо стадії протікання електрохімічного процесу в умовах впливу на накопичувач зарядного імпульсу струму, використовуючи рис. 3.

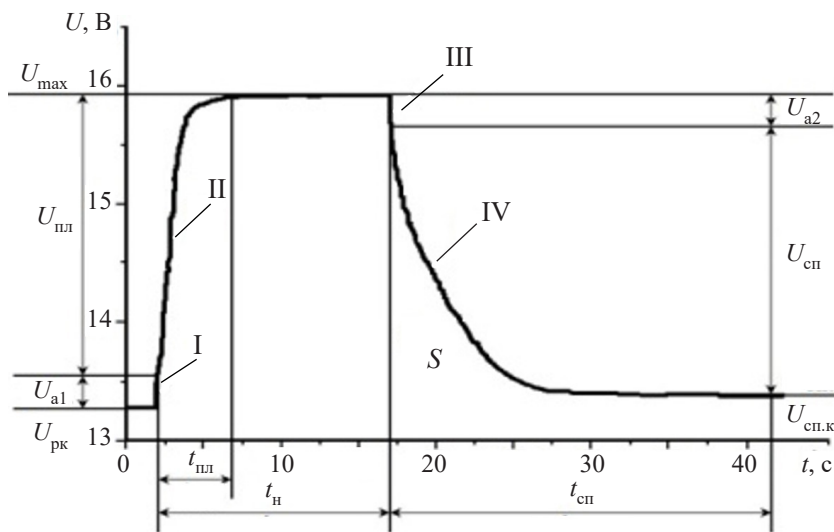


Рис. 3. Форма сигналу відгуку електрохімічного накопичувача енергії

До подачі на накопичувач зарядного імпульсу напруга на ньому дорівнює величині напруги розімкненого кола $U_{рк}$. У момент подачі на накопичувач зарядного імпульсу відбувається стрибок напруги, який супроводжується зарядженням подвійного електричного шару на межі розділу активних мас та електроліту в об'ємі порового простору електродів та падінням напруги $U_{а1}$ на їхньому активному опорі, що відповідає ділянці I на сигналі відгуку. Далі протікає стадія поляризації $U_{пл}$ (ділянка II) до виходу на плато при досягненні величини напруги насичення U_{max} . У момент зняття імпульсу відбувається падіння напруги на активному опорі $U_{а2}$ (ділянка III) з переходом у стадію деполіаризації $U_{сп}$ (ділянка IV). Як впливає з рис. 3, ділянки II та IV сигналу відгуку, що відображають, відповідно, стадії поляризації та деполіаризації при подачі на накопичувач імпульсу струму та при його знятті, є експоненційними кривими, що викликані нерівномірним розподілом концентрації електроліту та зарядів в об'ємі порового простору активних мас. При цьому процес розподілу описується відомим в електрохімії рівнянням макрокінетики в пористих середовищах

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \rho S C_{эф} \frac{\partial U}{\partial t}, \quad (2)$$

- де U — поточна напруга поляризації (деполяризації);
 ρ — ефективний питомий опір електроліту в порах;
 S — площа поверхні одиниці об'єму реагуючої частини активної маси пористого простору;
 $C_{эф}$ — ефективна ємність реагуючої частини активної маси на одиницю об'єму.

У нашому випадку інтерес представляє аналіз процесу деполіаризації, параметри якого безпосередньо визначаються величиною площі S . Автори роботи [10] описують протікання цього процесу при імпульсному впливі на свинцево-кислотну комірку таким чином. Коли зарядний струм переривається після зняття імпульсу, тобто при нульовому значенні зовнішнього струму, подвійний електричний шар залишається зарядженим. Внаслідок цього відбувається розряд подвійного електричного шару на електрохімічну реакцію з протіканням локального струму обміну i_0 в порах електродів. Інерційний процес розряду подвійного шару відповідає стадії деполіаризації і супроводжується перерозподілом зарядів в об'ємі пористого простору до моменту досягнення рівноважного стану системи. Швидкість перерозподілу зарядів в об'ємі пористого простору активних мас визначається постійною часу системи τ_c , величину якої можна оцінити, при-

пущеною, тобто при нульовому значенні зовнішнього струму, подвійний електричний шар залишається зарядженим. Внаслідок цього відбувається розряд подвійного електричного шару на електрохімічну реакцію з протіканням локального струму обміну i_0 в порах електродів. Інерційний процес розряду подвійного шару відповідає стадії деполіаризації і супроводжується перерозподілом зарядів в об'ємі пористого простору до моменту досягнення рівноважного стану системи. Швидкість перерозподілу зарядів в об'ємі пористого простору активних мас визначається постійною часу системи τ_c , величину якої можна оцінити, при-

рівнявши зарядний струм подвійного електричного шару до струму фарадеївської реакції. Користуючись лінійною кінетикою, постійну часу системи можна привести до вигляду

$$\tau_c = \frac{RTC}{Fi_0}, \quad (3)$$

де R — універсальна газова постійна;

T — температура, К;

C — питома ємність подвійного електричного шару;

F — постійна Фарадея;

i_0 — струм обміну (для кінетики реакції діоксиду свинцю $i_0 \approx 10^{-7}$ А/см² [10]).

З рівняння (3) випливає, що постійна часу процесу змінюється прямо пропорційно питомій ємності подвійного електричного шару C і обернено пропорційно щільності струму обміну i_0 . Враховуючи, що ємність подвійного шару прямо пропорційна величині його заряду та площі поверхні тієї частини активної маси, що бере участь у електрохімічній реакції в процесі розрядження подвійного шару, можна зробити висновок, що тривалість стадії деполяризації дорівнює тривалості процесу розрядження подвійного шару та прямо пропорційна площі поверхні реагуючої частини активної маси. Як зазначалося вище, величина площі поверхні активної маси, що бере участь у електрохімічному процесі в поточний час, пропорційна величині тієї частини активної маси, яка і визначає коефіцієнт її використання відповідно до виразу (1).

Для зручності визначення та більшої наочності зв'язку енергетичного стану накопичувача з параметрами сигналу відгуку представимо постійну часу перехідного процесу τ виразом з використанням параметрів перехідного процесу, взятих з рівняння (2):

$$\tau = R_{\Pi} C_{\Pi}, \quad (4)$$

де R_{Π} — поляризаційний опір, $R_{\Pi} = U_{\Pi} / i_0$;

C_{Π} — ємність активної маси, що припадає на одиницю об'єму.

Для випадку розрядження об'ємно-пористого конденсатора вираз для постійної часу набуває вигляду

$$\tau = C_{\text{еф}} \rho_{\text{еф}} S, \quad (5)$$

де $\rho_{\text{еф}}$ — ефективний питомий опір електроліту в порах, $\rho_{\text{еф}} = R_{\Pi} / S$;

$C_{\text{еф}}$ — ефективна ємність реагуючої активної маси на одиницю об'єму.

Вважається, що перехідний процес закінчується за час $t \approx (4 \dots 5)\tau$, коли практично досягається стан рівноваги, який для накопичувача відповідає величині напруги розімкненого кола. З урахуванням цього можна вважати, що постійна часу τ визначає тривалість перехідного процесу, тобто тривалість стадії деполяризації, та є прямо пропорційною площі S під кривою деполяризації на сигналі відгуку. Своєю чер-

гою тривалість стадії деполяризації дорівнює тривалості процесу розрядження подвійного шару і є прямо пропорційною площі реагуючої поверхні активної маси. Отже, площа реагуючої поверхні активної маси, яка визначає коефіцієнт її використання, прямо пропорційна площі S під кривою деполяризації на сигналі відгуку.

Таким чином, ґрунтуючись на закономірностях протікання електрохімічного процесу в об'ємі пористого простору активних мас та на аналізі взаємозв'язку параметрів перехідного процесу на стадії деполяризації з параметрами сигналу відгуку, встановлено прямо пропорційний зв'язок величини фактичної ємності накопичувача з величиною площі S під кривою деполяризації на сигналі відгуку. Така залежність підтверджує можливість застосування поточного значення площі S як еквівалента енергетичного параметра накопичувача — коефіцієнта використання активних матеріалів. Тобто, інформаційний параметр S , спільний для контролю та управління, дозволяє одночасно здійснювати об'єктивний контроль поточного стану накопичувача енергії та ефективно управляти його енергетичним станом для забезпечення працездатності у динамічних режимах роботи.

Методика та результати досліджень

Пропонований метод контролю та управління був апробований на серії накопичувачів енергії на основі акумуляторних батарей 6СТ-60А3 на експериментальному стенді, описаному авторами у роботі [9]. Методика визначення величини площі S під експонентною кривою спаду напруги $U_{\text{сп}}(t)$ заснована на її чисельному інтегруванні за правилом трапеції за допомогою програми обробки математичних та статистичних функцій Origin. Програма здійснює інтегрування кривих за таким алгоритмом:

— розраховується певний інтеграл апроксимованої функції;

— крива спаду напруги деполяризації розподіляється на відрізки (рис. 4);

— для формування трапеції використовуються пари сусідніх значень, після чого площі трапецій підсумовуються, а інтеграл розраховується за формулою

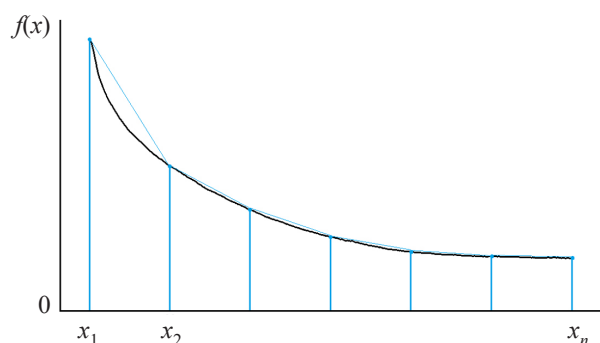


Рис. 4. Приклад розподілення кривої деполяризації сигналу відгуку електрохімічного накопичувача енергії на відрізки для визначення площі під кривою

$$\int_{x_1}^{x_n} f(x) dx \approx \sum_{i=1}^{n-1} 0,5[x_{i+1} - x_i][f(x_{i+1}) + f(x_i)], \quad (6)$$

де x — напруга деполяризації, що відповідає кожному значенню часу;

i — крок зміни часу.

Критерієм закінчення процесу заряджання, тобто досягнення 100% заряду накопичувача, є сталість величини площі S . Інтегрування проводилося на відрізок часу спадання напруги деполяризації $U_{сп}$, максимальна тривалість якого дорівнює тривалості паузи й становить 15 с. Дискретність вибірки визначалася відношенням часу спаду $U_{сп}$ до часу вибірки, що дорівнює 0,00035к с, і встановлювалася зміною коефіцієнта k . У наших експериментах дискретність вибірки становила 0,017 с, що дозволило визначати величину площі із досить високою точністю. В результаті інтегрування функцій $U(t)$ були отримані графіки зміни площі S (в умовних одиницях), де номінальний фактичний ємності накопичувача відповідає значення 10,0.

Для оцінки ефективності використання пропонуваного інформаційного параметра були проведені експериментальні дослідження процесу зарядки двох різних накопичувачів: № 1 знаходився у новому стані, № 2 до випробувань перебував в експлуатації.

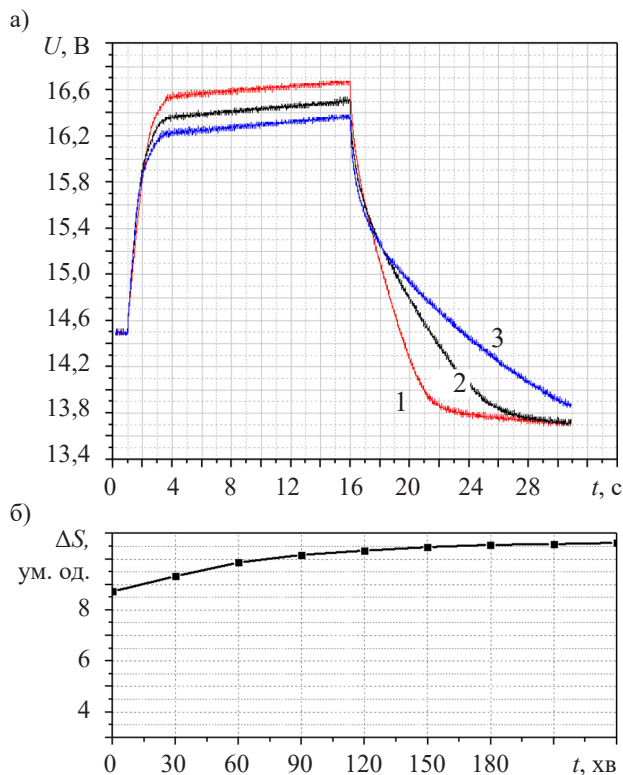


Рис. 5. Результати дослідження процесу заряджання накопичувача № 1:

a — сигнал відгуку на початку зарядного процесу (1), на проміжній стадії (2) та наприкінці (3); b — графік зміни площі S під кривою деполяризації

На рис. 5, a наведено динаміку сигналу відгуку накопичувача № 1 на початку зарядного процесу, на проміжній стадії та наприкінці, а на рис. 5, b — відповідний цій динаміці графік зміни площі S . Фактична ємність C_{ϕ} накопичувача на початку процесу зарядки становила приблизно 80% від номінальної: $C_{\phi} \approx 0,8C_n \approx 48$ А·ч, а наприкінці досягла номінального значення: $C_{\phi} = C_n = 60$ А·ч, тобто 100% (на графіку цим значенням відповідають 8,0 та 10,0). Зарядний процес протікав плавно в міру збільшення ємності накопичувача до досягнення її кінцевого постійного значення, якому відповідало постійне значення величини площі $S = 10$, після чого зарядний процес припинявся. Величина площі реєструвалася з інтервалами 30 хв, час зарядки становив 4 год.

Початкова фактична ємність накопичувача № 2 була приблизно такою ж, як і накопичувача № 1. Враховуючи його стан (попередню експлуатацію), заряджання проводили у двох режимах з метою порівняння. На рис. 6 наведено графіки зміни площі S у процесі зарядки накопичувача № 2 постійним струмом у рекомендованому заводом-виробником стандартному режимі та у прискореному. Час заряджання в стандартному режимі становить близько 8 год, у прискореному — близько 4 год, при цьому перегріву накопичувача не спостерігалось. Фактична ємність накопичувача склала приблизно $0,9C_n \approx 54$ А·ч.

Як видно з результатів експерименту, для контролю поточного стану та управління режимами роботи накопичувача доцільно використовувати запропонований інформаційний параметр.

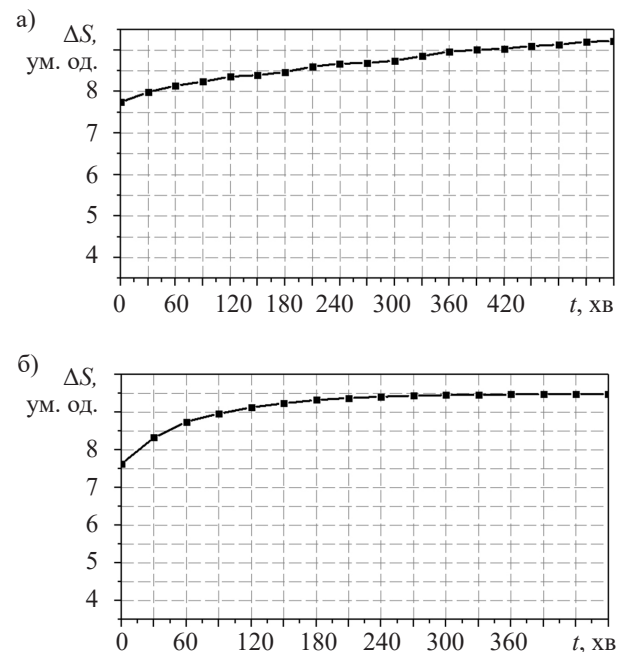


Рис. 6. Графіки зміни площі S під кривою деполяризації сигналу відгуку в стандартному (а) та прискореному (б) режимах заряджання накопичувача № 2

Висновки

Таким чином, для підвищення ефективності використання електрохімічних накопичувачів енергії в динамічних режимах роботи необхідно враховувати коефіцієнт використання активних матеріалів. Проведені дослідження показали, що інформаційним еквівалентом цього коефіцієнта є площа під кривою депляризації на сигналі відгуку накопичувача на зарядний імпульс. Запропонований імпульсний адаптивний бездатчиковий метод із використанням узагальненого енергетичного параметра, що поєднує функції контролю та управління зарядним процесом електрохімічних накопичувачів енергії, є надійним і підтверджує багатофункціональність імпульсних методів контролю та управління режимами роботи електрохімічних накопичувачів енергії.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Смоленцев Н. И. *Разработка устройств накопления электрической энергии с применением эффекта сверхпроводимости, способов управления и методов оптимизации энергетических потоков в системах электроснабжения*. Дисс. ... докт. техн. наук. Челябинск, 2019, 358 с.
2. Оспанбеков Б. К. *Оптимизация ресурсопределяющих эксплуатационных режимов тяговых аккумуляторных батарей электромобилей*. Дисс. ... канд. техн. наук. Москва, 2017, 160 с.
3. Banguero E., Correcher A., Perez-Navarro A. et al. A review on battery charging and discharging control strategies: Application to renewable energy systems. *Energies*, 2018, vol. 11, iss. 4, 1021. <https://doi.org/10.3390/en11041021>
4. Huang X., Li Y., Acharya A. B. et al. A review of pulsed current technique for lithium-ion batteries. *Energies*, 2020, vol. 13, iss. 10, 2458. <https://doi.org/10.3390/en13102458>
5. Bayati M., Abedi M., Farahmandrad M. et al. Important technical considerations in design of battery chargers of electric vehicles. *Energies*, 2021, vol. 14, iss. 18, 5878. <https://doi.org/10.3390/en14185878>
6. Chen G.-J., Liu Y.-H., Cheng Y.-S., Pai H.-Y. A novel optimal charging algorithm for lithium-ion batteries based on model predictive control. *Energies*, 2021, vol. 14, iss. 8, 2238. <https://doi.org/10.3390/en14082238>
7. Velho R., Beirao M., Calado M. D. R. et al. Management system for large Li-ion battery packs with a new adaptive multistage charging method. *Energies*, 2017, vol. 10, iss. 5, 605. <https://doi.org/10.3390/en10050605>
8. Chatterjee P., Hermwille M. Electric vehicle fast charging challenges. *Power Electronics Europe*, 2019, iss. 1, p. 30 – 32.
9. Dzenzerskiy V. A., Plaksin S. V., Zhitnik N. E., Shirman O. I. Control of the energy state of chemical current source by impulse method. *Electrotechnic and computer systems*, 2014, no 14(90), p. 131 – 139. (Rus)
10. Srinivasan V., Wang G. Q., Wang C. Y. Mathematical modeling of current-interrupt and pulse operation of valve-regulated lead acid cells. *Journal of The Electrochemical Society*, 2003, vol. 150, no. 3, A316–A325. <https://doi.org/10.1149/1.1541005>

Дата надходження рукопису
до редакції 4.02 2022 р.

PULSE TECHNIQUE OF IN-OPERATION CONTROL AND MANAGEMENT OF ENERGY STORAGE CHARGING PROCESS

Energy storages are the most important integral elements of both autonomous energy system based on renewable energy sources and vehicles of various purposes, where they are the main power source. Therefore, the issue of controlling their operation modes is an important one, and choosing the control methods is a relevant problem.

The main operation modes of energy storages which require controlling are the work mode when the stored energy is consumed and the charging mode when the used energy is replenished. The example of on-vehicle energy storage is used to analyze basic operation modes and their particular aspects. Dynamic modes with unpredictable energy consumption caused by uncontrollable undercharging and overcharging are typical.

The analysis allowed drawing the conclusion that, when controlling operation modes, it is necessary to consider the energy modes of accumulators, which reflect its efficiency most fully and objectively. The analysis of existing control methods showed that their common disadvantage is that they use such parameters as voltage and operating current to control and manage the storage modes. The fact is that due to the transient nature of electrochemical processes during the operation of the storage in dynamic modes, the values of these parameters do not correspond to the current energy state of the storage.

This study aims to increase the performance of electrochemical energy storages by efficiently choosing a method for controlling their operation modes. The authors prove and experimentally confirm that when working with electrochemical energy storage devices in dynamic modes, it is necessary to choose the methods based on the application of the active material utilization ratio, information equivalent of which is the value of the area under the depolarization curve on the storage's response signal to the charging impulse. The use of the proposed mode allows combining the functions of controlling and managing the storage.

Keywords: energy storage, pulsed galvanostatic method, response signal, material utilization ratio, generalized energy index.

REFERENCES

- Smolentsev N. I. *Razrabotka ustroystv nakopleniya elektricheskoy energii s primeneniye effekta sverkhprovodimosti...* [Development of accumulation methods, research of energy using the effect of superconductivity, expert management and search for analytical flows in power supply banks]. Dr. tech. sci. diss. Chelyabinsk, 2019, 358 p. (Rus)
- Ospanbekov B. K. *Optimizatsiya resursoopredelyayushchikh ekspluatatsionnykh rezhimov...* [Optimization of resource-determining operating modes of traction batteries of electric vehicles]. PhD tech. sci. diss. Moscow, 2017, 160 p. (Rus)
- Banguero E., Correcher A., Perez-Navarro A. et al. A review on battery charging and discharging control strategies: Application to renewable energy systems. *Energies*, 2018, vol. 11, iss. 4, 1021. <https://doi.org/10.3390/en11041021>
- Huang X., Li Y., Acharya A. B. et al. A review of pulsed current technique for lithium-ion batteries. *Energies*, 2020, vol. 13, iss. 10, 2458. <https://doi.org/10.3390/en13102458>
- Bayati M., Abedi M., Farahmandrad M. et al. Important technical considerations in design of battery chargers of electric vehicles. *Energies*, 2021, vol. 14, iss. 18, 5878. <https://doi.org/10.3390/en14185878>
- Chen G.-J., Liu Y.-H., Cheng Y.-S., Pai H.-Y. A novel optimal charging algorithm for lithium-ion batteries based on model predictive control. *Energies*, 2021, vol. 14, iss. 8, 2238. <https://doi.org/10.3390/en14082238>
- Velho R., Beirao M., Calado M. D. R. et al. Management system for large Li-ion battery packs with a new adaptive multistage charging method. *Energies*, 2017, vol. 10, iss. 5, 605. <https://doi.org/10.3390/en10050605>
- Chatterjee P., Hermwille M. Electric vehicle fast charging challenges. *Power Electronics Europe*, 2019, iss. 1, pp. 30 – 32.
- Dzenzerskiy V. A., Plaksin S. V., Zhitnik N. E., Shirman O. I. Control of the energy state of chemical current source by impulse method. *Electrotechnic and computer systems*, 2014, no 14(90), pp. 131 – 139. (Rus)
- Srinivasan V., Wang G. Q., Wang C. Y. Mathematical modeling of current-interrupt and pulse operation of valve-regulated lead acid cells. *Journal of The Electrochemical Society*, 2003, vol. 150, no. 3, A316–A325. <https://doi.org/10.1149/1.1541005>

Опис статті для цитування:

Плаксін С. В., Житник М. Я., Левченко Р. Ю., Остаповська С. Я. Імпульсний метод оперативного контролю та управління зарядним процесом накопичувача енергії. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2022, № 1–3, с. 22–30. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2022.1-3.22>

Cite the article as:

Plaksin S. V., Zhytnyk M. Ya., Levchenko R. Yu., Ostapovska S. Ya. Pulse technique of in-operation control and management of energy storage charging process. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2022, no. 1–3, pp. 22–30. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2022.1-3.22>

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

Україна, ¹ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України,
²Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

E-mail: kondrik@kipt.kharkov.ua

ВПЛИВ ДОМІШОК І ДЕФЕКТІВ СТРУКТУРИ НА ВЛАСТИВОСТІ ДЕТЕКТОРІВ НА ОСНОВІ CdTe та CdZnTe

Методом комп'ютерного моделювання досліджено вплив легувальних та фонових домішок на прикладі Cl, Fe, Pb, Cr, Co, Ti, V, Ni, Ge, Sn на електрофізичні та детекторні властивості CdTe та Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te. З'ясовано вплив вакансій кадмію, донорних домішок, скупчень домішок на деградацію питомого опору та ефективності збору зарядів детекторів іонізуючих випромінювань на основі досліджених матеріалів. Встановлено вплив рівня Фермі та рівнів енергії дефектів на зміну та деградацію властивостей досліджуваних матеріалів.

Ключові слова: телурид кадмію, CdZnTe, детекторні властивості, моделювання, глибокі рівні.

Телурид кадмію та потрійна сполука CdZnTe на сьогодні є одними з напівпровідникових матеріалів, що широко досліджуються та використовуються в неохолоджуваних детекторах для реєстрації рентгенівського та гамма-випромінювання [1–3]. Широке застосування ці матеріали отримали у неруйнівному аналізі, ядерній медицині [4, 5], атомній енергетиці та ядерній дозиметрії [6, 7]. Тонкоплівковий CdTe також розглядається як перспективний матеріал для сонячної енергетики [8]. Ці матеріали дозволяють отримувати датчики з активною областю великого розміру (50–100 мм³), високим питомим опором ρ (10^9 – 10^{11} Ом·см) при низьких струмах витоку, високою електронною рухливістю μ_n (1100–1200 см²/(В·с)), прийнятним часом життя нерівноважних електронів τ_n і дірок τ_p ($\approx 10^{-6}$ с).

У процесі отримання CdTe та CdZnTe детекторної якості до їхньої матриці потрапляють забруднювальні домішки, а в кристалічній структурі виникають дефекти, енергетичні рівні яких розташовуються в забороненій зоні, вони змінюють ступінь компенсації, зменшуючи ρ , та виступають як пастки нерівноважних носіїв. Щоб компенсувати електрично активні рівні пасток та збільшити ρ кристала, CdTe часто легують хлором, іноді йодом, а CdZnTe — алюмінієм, індієм або ітрієм. Al, In, Y виступають у ролі домішок заміщення на місці дома кадмію, а Cl — на місці телуру. Такі донорні компенсувальні домішки додаються до матеріалів CdTe та CdZnTe в кількості 1–2 ppm, або $\approx 10^{16}$ см⁻³ [9, 10].

При використанні детекторів випромінювань на основі CdTe та CdZnTe в агресивному радіаційному середовищі вони піддаються опроміненню різної природи, що викликає радіаційні пошкодження в кристалі з появою радіаційних дефектів, які призводять

до деградації амплітудних спектрів, а також найважливішої характеристики детекторів — ефективності збору зарядів η . Радіаційна стійкість детекторів може залежати не тільки від радіаційних дефектів, а й від вихідного стану матриці: ступеня чистоти та структурної досконалості.

Технологічні прийоми, що дозволяють певною мірою керувати кількістю електрично активних домішок і власних дефектів, вже відомі [11], але для того щоб підібрати режими технологічних процесів глибокого рафінування Cd, Zn, Te і визначити оптимальні умови вирощування детекторного матеріалу, необхідно встановити вплив домішок, що містяться у вихідних компонентах, та дефектів структури, що виникають у процесі отримання кристалів та їх використання в детекторах, на електрофізичні та детекторні властивості CdTe та CdZnTe.

Матеріали CdTe та CdZnTe мають високий питомий опір, що ускладнює дослідження на мікрорівні механізмів зміни та деградації їхніх електрофізичних і детекторних властивостей під впливом дефектів, які виникають у процесі одержання та експлуатації, ґрунтуючись тільки на експериментальних методиках.

Метою представленої роботи було визначення методом комп'ютерного моделювання характеру впливу фонових домішок та структурних дефектів на електрофізичні та детекторні властивості CdTe та CdZnTe у зразках різного домішкового та дефектного складу.

Використані моделі та матеріали

Експериментальні вимірювання швидкості міжзонної рекомбінації в широкозонних напівпровідниках [12] доводять, що захоплення та рекомбінація нерівноважних електронів і дірок на глибоких рівнях домішок і дефектів мають вирішальний вплив на їхній час життя в CdTe та CdZnTe і, отже, на ефективність збору зарядів η детекторів на основі цих мате-

ріалів. Тому для оцінки часу життя нерівноважних носіїв заряду використовувалася модель рекомбінації Шоклі — Ріда [13]. Основними параметрами i -тих глибоких рівнів дефектів, що визначають детекторні властивості досліджуваних матеріалів, є концентрація N_i , переріз захоплення σ_i та положення у забороненій зоні (енергія активації) E_i [14—16]. Вимірювання струмів носіїв заряду, емітованих з рівнів у широкому інтервалі температур, дозволяють отримати спектри з явно вираженими піками за деяких температур, що відповідають певним положенням рівнів енергії E_i . Висота та ширина піків визначаються, відповідно, концентрацією рівнів N_i та поперечним перерізом захоплення σ_i нерівноважних носіїв заряду. Перекриття цих піків у поєднанні з високим питомим опором ρ може помітно спотворити справжні величини N_i , E_i та σ_i . Проте в [14—17], а також у деяких інших роботах спостерігається прийнятна відтворюваність вимірюваних величин E_i , заснована на добре відпрацьованій технології виготовлення детекторів, що дозволяє застосовувати такі результати для правильної ідентифікації рівнів дефектів. Для отримання значень σ_i можна використовувати результати роботи [18], де одночасно враховувався внесок всіх рівнів у струми, що емітуються у відповідні зони.

Застосовані моделі та їх апробація докладно описані у [19]. Рівняння електронейтральності складалися з урахуванням всіх домішок і дефектів, експериментально зареєстрованих в [15, 17]. Ці рівняння чисельно розв'язувалися відносно рівня Фермі E_F , потім концентрації вільних електронів (n) та дірок (p) визначалися у наближенні параболічних зон. Рухливість електронів μ_n розраховувалася в наближенні часу релаксації імпульсу (тау-наближення) з урахуванням механізмів розсіювання на іонізованих та нейтраль-

них центрах, акустичних та п'єзоелектричних фононах, оптичних фононах, а також розсіювання на скупченнях точкових дефектів. Рухливість дірок μ_p вважалась незмінною й прирівнювалась до $70 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Питому провідність розраховували за формулою $e \cdot n \cdot \mu_n + e \cdot p \cdot \mu_p$, а питомий опір — як обернену до неї величину.

З огляду на експериментально виміряні коефіцієнти міжзонної рекомбінації [12] встановлено, що темп міжзонної рекомбінації за кімнатної температури в досліджуваних матеріалах приблизно на десять порядків величини менший, ніж темп рекомбінації на глибоких рівнях домішок і дефектів, що описується статистикою Шоклі — Ріда — Холла, яка й була взята за основу в розрахунках часу життя нерівноважних носіїв заряду τ_n , τ_p . Ефективність збору зарядів детектора визначалася рівнянням Хехта [20, с. 489]. Припускалось, що відстань між електродами дорівнює 5 мм, напруженість електричного поля — 1000 В/см.

Спектральні характеристики CdTe:Cl були взяті з [17] для вихідного, неопроміненого матеріалу, склад якого представлено у **табл. 1** з позначеннями, прийнятими в цій роботі. Склад $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te}$ та характеристики рівнів були визначені експериментально в [15], вони відображені у **табл. 2**. В обох таблицях зазначено також зарядовий стан дефектів: «+» для донорів, енергія яких відраховується від дна зони провідності E_C , «-» для акцепторів, рівні яких відраховуються від стелі валентної зони E_V .

У CdTe також присутня домішка хлору, яка вводить у матрицю у вигляді сполуки CdCl_2 . Вона діє як домішка заміщення на місці телуру Cl_{Te} , виступаючи в ролі донора, призначеного для компенсації акцепторів (A_X , A_0 , A , A_1 , X) і досягнення високоомно-

Таблиця 1

Рівні дефектів у CdTe:Cl з питомим опором $\rho = 2 \cdot 10^9 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ [17]

Дефект	A_X^-	A_0^-	A^-	A_1^-	X^-	$\frac{DX}{(V_{Cd}^2)}$	Z^+	Y^-	W^-	H^-	$\frac{H1}{(Te_{Cd}^+)}$	$\frac{I}{(V_{Te}^+)}$
E_i , eV	0,11	0,12	0,14	0,16	0,29	0,41	0,47	0,67	0,70	0,77	0,82	1,0
σ_i , см^2	10^{-19}	10^{-19}	10^{-19}	$2 \cdot 10^{-19}$	10^{-18}	10^{-17}	10^{-16}	10^{-18}	10^{-18}	10^{-18}	10^{-18}	10^{-16}
N_i , см^{-3}	$2 \cdot 10^{15}$	$5 \cdot 10^{15}$	$5 \cdot 10^{15}$	$5 \cdot 10^{14}$	$5 \cdot 10^{14}$	$5 \cdot 10^{15}$	$1 \cdot 10^{15}$	$3 \cdot 10^{15}$	$3 \cdot 10^{15}$	$5 \cdot 10^{15}$	$7 \cdot 10^{15}$	$1 \cdot 10^{16}$

Таблиця 2

Рівні дефектів у $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te:Al}$ з питомим опором $\rho = 7,5 \cdot 10^9 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ [15]

Дефект	Al_{Cd}^+	E_1^+ (Ag,Au)	$E_2^- (V_{Cd})$	$E_3^- (A)$	$E_4^+ (Cd_{Te})$	$E_5 (C)$	$E_6^- (Cu)$	$E_7^{2+} (Te_{Cd})$	$E_8^{2-} (V_{Cd})$	$E_9^- (V_{Zn})$	E_{DD}^+
E_i , eV	0,014	0,047	0,094	0,127	0,185	0,236	0,291	0,371	0,507	0,620	0,778
σ_i , см^2	$1 \cdot 10^{-21}$	$1 \cdot 10^{-14}$	$3,6 \cdot 10^{-19}$	$1,1 \cdot 10^{-18}$	$4,1 \cdot 10^{-18}$	$2,2 \cdot 10^{-18}$	$1,7 \cdot 10^{-18}$	$6,66 \cdot 10^{-18}$	$2,8 \cdot 10^{-18}$	$6,8 \cdot 10^{-17}$	$6,0 \cdot 10^{-18}$
N_i , см^{-3}	$1,7 \cdot 10^{16}$	$3 \cdot 10^{14}$	$3,6 \cdot 10^{14}$	$1,5 \cdot 10^{14}$	$8,1 \cdot 10^{13}$	$4,2 \cdot 10^{13}$	$4,1 \cdot 10^{14}$	$4,6 \cdot 10^{14}$	$7,2 \cdot 10^{14}$	$1,1 \cdot 10^{14}$	$2,5 \cdot 10^{15}$

го стану. Дефекти AX , $A0$, A , $A1$, X , на думку авторів [14, 21—23], а також більшості інших дослідників, є комплексами вакансій кадмію з різними фоновими домішками. Двократно заряджені вакансії кадмію відповідають дефекту DX . У [17] Te_{Cd} та V_{Te} позначені, відповідно, як дефекти $H1$ та I . Дефект Z , імовірно телур міжвузловий, з'являється тільки в момент повної деградації реєструвальних властивостей детектора після його тривалої роботи в агресивному радіаційному середовищі. Енергія активації Cl_{Te} відносно краю зони провідності E_C становить 0,014 eV за низьких, близько 10 К, температур. За кімнатної (робочої) температури детектора рівень енергії Cl_{Te} переходить у зону провідності.

Крім [17] подібний склад CdTe описаний також, наприклад, у [10, 14, 15, 24]. Концентрації дефектів у CdTe:Cl відповідають складу, описаному в [24], і підібрані такими, щоб при концентрації хлору $1,1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ досягався питомий опір телуриду кадмію, виміряний у [17] — $2 \cdot 10^9 \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

Обчислені електрофізичні властивості неопромієних CdTe та CdZnTe відповідали відомим експериментальним значенням: $\mu_n \approx 1200 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, час життя нерівноважних електронів τ_n та дірок τ_p був близьким до 10^{-6} с для обох матеріалів.

Результати та обговорення

У [17] величина виміряного питомого опору вихідного CdTe:Cl, склад якого представлено у табл. 1, дорівнювала $2 \cdot 10^9 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Для високочистого $Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te$, склад якого представлено у табл. 2, автори [15] виміряли дещо більшу величину — $\rho = 7,5 \cdot 10^9 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Такі високоомні стани забезпечували низькі струми витоку та прийнятну детекторну якість цих матеріалів. Як відомо, у процесі вирощування телуриду кадмію в його кристалічній структурі виникають акцепторні точкові дефекти — дворазово заряджені вакансії кадмію V_{Cd}^{2-} [12]. Вони були зареєстровані в [17], а в табл. 1 позначені як дефект DX , що сприяє рекомбінації нерівноважних носіїв заряду [25]. Це може значно знизити збір заряду в детекторі. До об'єму CdTe та CdZnTe в процесі їх отримання можуть вноситися фонові та технологічні домішки, зокрема елементи IV групи та перехідні метали [24], які здатні суттєво вплинути на величини ρ , τ_n , τ_p , η . Імовірно, також існує взаємозв'язок між чистотою та структурною досконалістю вихідних матеріалів і радіаційною стійкістю детекторів на їх основі. Представляє інтерес дослідження впливу дефектів структури та технологічних домішок на зміну та деградацію електрофізичних та детекторних властивостей CdTe та CdZnTe.

Детектори на основі CdTe:Cl

Як вже зазначалося, вакансії кадмію можуть негативно впливати на спектроскопічні характеристики детекторів на основі телуриду кадмію. Графіки на **рис. 1** демонструють поведінку питомого опору CdTe:Cl

та рівня Фермі в широкому діапазоні вмісту легувального хлору для різних значень концентрації вакансій кадмію $N(V_{Cd})$. Збільшення вмісту вакансій кадмію до величини 10^{15} см^{-3} призводить до помітного зниження ρ (рис. 1, а), що, відповідно, збільшує струми витоку в матеріалі, а разом з ними й шуми у спектрах детектора. Рівень Фермі E_F при збільшенні $N(V_{Cd})$ по-

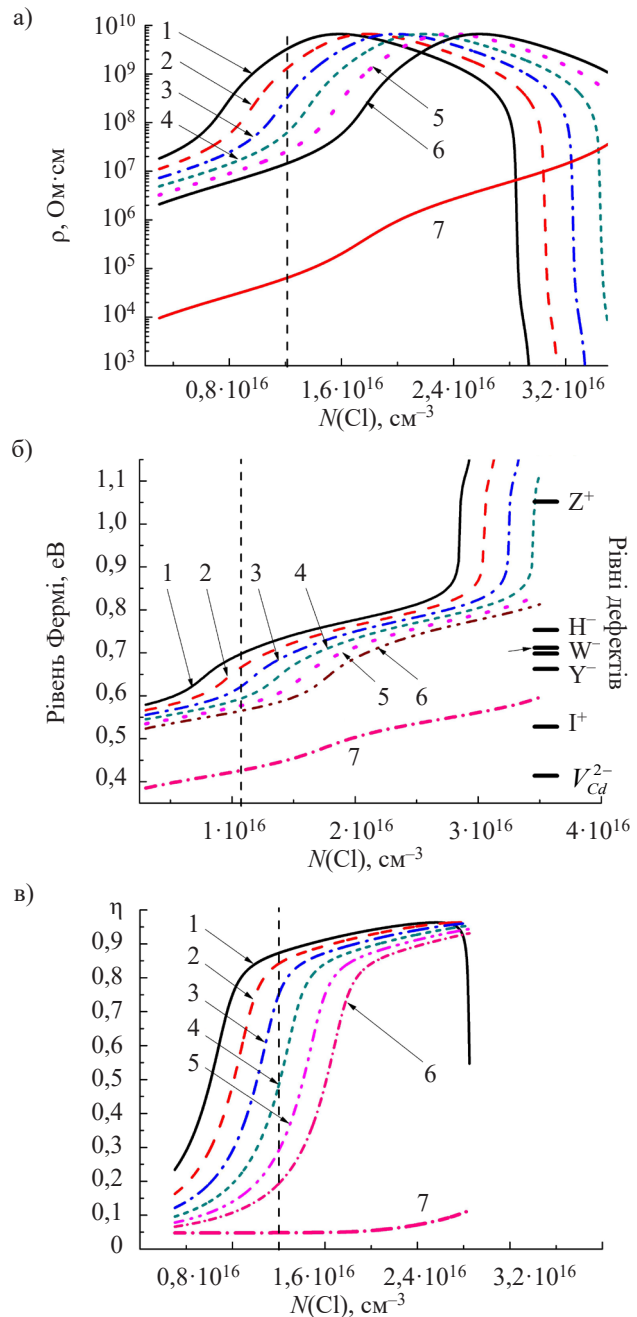


Рис. 1. Залежності питомого опору CdTe:Cl (а), рівня Фермі (б) та ефективності збору зарядів (в) від вмісту легувального хлору для різних значень концентрації вакансій кадмію (у см^{-3}):

1 — $5 \cdot 10^{15}$; 2 — $6 \cdot 10^{15}$; 3 — $7 \cdot 10^{15}$; 4 — $8 \cdot 10^{15}$; 5 — $9 \cdot 10^{15}$; 6 — $1 \cdot 10^{16}$; 7 — $2 \cdot 10^{16}$

(вертикальні пунктирні лінії відповідають досліджуваному зразку [17])

ступово переміщується в напрямку валентної зони (див. рис. 1, б, де також показані положення рівнів дефектів, представлених у табл. 1). Поступове переміщення рівня E_F при зростанні концентрації $N(V_{Cd})$ до $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ змінюється стрибком до рівня V_{Cd}^{2-} при $N(V_{Cd}) = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Такий стрибок відбувається тоді, коли концентрація іонізованих мілких акцепторів разом з концентрацією іонізованих вакансій кадмію з рівнем V_{Cd}^{2-} перевищує сумарну концентрацію іонізованих донорів. З рис. 1, б видно, що при концентрації вакансії кадмію $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ рівень Фермі E_F досліджуваного зразка знаходиться на краю рівня вакансії кадмію, а це своєю чергою має значно збільшувати темп захоплення та рекомбінації нерівноважних носіїв заряду на рівні V_{Cd}^{2-} з різким зменшенням збору зарядів.

На рис. 1, в зображено залежності ефективності збору зарядів η від вмісту легувального хлору для різних концентрацій V_{Cd} . Тут видно, що вже при $N(V_{Cd}) \approx (7-8) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, тобто на початку переміщення E_F у напрямку до валентної зони та рівня V_{Cd}^{2-} (див. рис. 1, б), збір зарядів помітно зменшується, а при $N(V_{Cd}) \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$ відбувається практично повна деградація детекторних властивостей і, отже, спектрів детектора. Крім того, з порівняння рис. 1, в з рис. 1, а видно, що чим більше ρ , тим більше η , і навпаки. Тобто, завдяки кореляції між поведінкою цих характеристик можна якісно оцінювати збір зарядів детектора, контролюючи особливості зміни ρ із врахуванням складу матеріалу.

У процесі отримання монокристалів CdTe та $Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te$ в їхній об'єм разом із вихідними компонентами можуть потрапляти фонові домішки, наприклад домішки проникнення чи перехідні метали, які проявляють себе як глибокі донори [24]. При досягненні певної їх концентрації настає межа розчинності та стає можливим утворення скупчень домішок і дефектів, здатних істотно вплинути на електронну рухливість детекторних матеріалів [19, 26], це підтверджується графіками, представленими у [26, рис. 4, 5]. Як випливає з [26, рис. 4], у разі рівномірного розподілення домішок або дефектів по об'єму електронна рухливість μ_n змінюється незначно ($\approx 1,5\%$). Якщо ж в об'ємі присутні скупчення домішок та/або дефектів, величина μ_n може зменшуватися в рази ([26], рис. 5). Аналогічна картина спостерігається і для CdZnTe.

Щодо граничної розчинності в широкозонних напівпровідниках взагалі, то автори [27] показали, що розчинність домішок може залежати від рівня легування та ширини забороненої зони, й отримали вираз для рівноважної концентрації N_D електрично активної донорної домішки для невідродженого стану, коли $E_C - E_D \ll E_C - E_F$:

$$\ln N_D \approx \frac{3}{4} \frac{m_h}{m_e} + \ln(N_i N_c) - \frac{E_G}{2k_B T_0} \quad (1)$$

де m_e, m_h — ефективна маса електронів і дірок відповідно;
 N_i — концентрація домішок в розплаві;
 N_c — ефективна густина станів у зоні провідності;
 T_0 — температура “заморожування” домішок, за якої дифузія домішок фактично припиняється;
 E_G — ширина забороненої зони;
 k_B — постійна Больцмана.

В результаті розрахунків граничної розчинності домішок CdTe для концентрації $N_i = 4 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ та $T_0 = 1000 \text{ K}$ було отримано $N_D \approx 4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ за кімнатної температури (300 K). Тобто якщо вміст точкових дефектів і домішок в телуриді кадмію не перевищує $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, то можна добитися рівномірного їх розподілу в об'ємі кристала без утворення скупчень, через які деградують електрофізичні та детекторні властивості. Тому при модельному дослідженні впливу точкових дефектів на властивості детекторів цілком достатньо обмежитися діапазоном зміни їх концентрації до 10^{17} см^{-3} .

Вплив домішок деяких перехідних металів і елементів IV групи, що неавмисно вносяться до матриці телуриду кадмію, на ефективність збору зарядів детектора демонструє **рис. 2**.

З рис. 2 бачимо, що для спектроскопічних характеристик детектора найбільш шкідливими домішками є олово, нікель, германій, ванадій, які вже в кількості $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ помітно знижують збір зарядів. Стосовно питомого опору, моделювання показало, що Fe, Ti, V, Ge, Sn аж до концентрацій $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ помітно не впливають на його величину, а домішки Cr та Ni при їх вмісті $(2-3) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ зменшують ρ детекторного матеріалу приблизно на два порядки через зміщення рівня Фермі E_F в околицю рівня Ni^+ ($E_V + 0,92 \text{ eV}$) та Cr^+ ($E_V + 1,34 \text{ eV}$). Іншими словами, підвищений вміст донорних домішок Ni та Cr з рів-

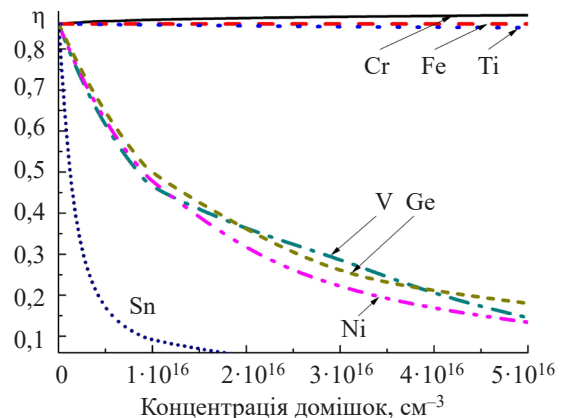


Рис. 2. Залежність ефективності збору зарядів детектора на основі CdTe:Cl від вмісту технологічних домішок Cr, Fe, Ti, V, Ge, Ni, Sn

нями енергії у верхній половині забороненої зони не лише зменшують збір зарядів, а й збільшують струми витоку та шуми у спектрах детектора. Деградувальна дія домішок Sn, Ge, V, Ni щодо величини η полягає у захопленні нерівноважних носіїв заряду на іонізовані рівні енергії цих домішок. Особливо шкідливою домішкою є Sn, рівень енергії якої $E_V + 0,77$ eВ знаходиться близько до середини забороненої зони. Що ж до Fe ($E_V + 0,35$ eВ) та Ti ($E_V + 0,50$ eВ), то донорні рівні цих домішок розташовуються дуже глибоко у забороненій зоні, тобто у розглянутих умовах високоомного стану виявляються нижче рівня Фермі, тому є нейтральними й практично не впливають на електрофізичні та детекторні властивості телуриду кадмію. Рівень енергії $E_V + 1,34$ eВ домішки Cr не впливає на η , тому що не захоплює нерівноважні носії заряду, оскільки в цих умовах він є повністю іонізованим і знаходиться занадто далеко від рівня Фермі. Справді, в цьому випадку E_F змінюється від $E_V + 0,70$ eВ при $N(\text{Cr}) = 1 \cdot 10^{12}$ см⁻³ до $E_V + 0,72$ eВ при $N(\text{Cr}) = 5 \cdot 10^{16}$ см⁻³.

Детектори на основі високоочищеного Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te:Al

Детекторний матеріал Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te, який також досліджувався у [17], має невеликі відмінності за складом від розглянутого CdTe:Cl, тому електрофізичні та детекторні властивості цих двох матеріалів теж якісно не відрізняються, у останнього більша лише величина питомого опору через дещо більшу (на кілька сотих eВ) ширину забороненої зони E_G . З цієї причини було вирішено навести тут результати дослідження високоочищеного Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te:Al, описаного у [15]. Склад такого детекторного матеріалу представлено у табл. 2.

З порівняння даних, наведених у табл. 1 і 2, видно, що концентрація фонових дефектів у Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te:Al приблизно на порядок нижча ніж у CdTe:Cl. Графіки

на рис. 3 демонструють зміни ефективності збору зарядів у детекторі на основі Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te:Al залежно від вмісту різних домішок деяких перехідних металів, описаних у [24].

З порівняння рис. 2 і 3 видно, що крім впливу шкідливих домішок V, Ge, Ni, Sn, присутніх у CdTe:Cl, у високоочищеному Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te:Al проявляється деградуючий вплив титану з донорним рівнем енергії $E = E_V + 0,50$ eВ, причому це відбувається вже за концентрації $N(\text{Ti}) = 1 \cdot 10^{15}$ см⁻³. Цей вплив можна пояснити тим, що з підвищенням чистоти та зменшенням вмісту фонових домішок знижується їх стабілізуючий вплив на рівень Фермі. У цьому випадку для зміни положення E_F в забороненій зоні високоочищеного матеріалу потрібна і менша концентрація фонові або легувальної домішки. Наприклад, менша сумарна концентрація фонових домішок потребує меншої кількості легувальної домішки для досягнення високоомного стану з розташуванням E_F поблизу середини E_G . Так, концентрація легувального алюмінію в Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te:Al, необхідна для досягнення питомого опору $\rho = 7,5 \cdot 10^9$ Ом·см [15], дорівнювала $5,5 \cdot 10^{14}$ см⁻³, тоді як вміст легувального хлору в CdTe:Cl для досягнення $\rho = 2 \cdot 10^9$ Ом·см становив $1,1 \cdot 10^{16}$ см⁻³. Крім того, донорний рівень Ti розташовується нижче E_F приблизно на 0,2 eВ в телуриді кадмію і виявляється здебільшого нейтральним, отже зміна його концентрації слабо впливає на рівень Фермі та властивості детекторного матеріалу. З цієї причини зміна вмісту Ti в діапазоні концентрацій до 10^{16} см⁻³ у CdTe:Cl не призводить до зміни η . З іншого боку, в Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te:Al рівень E_F розміщується ближче до рівня Ti ніж в CdTe:Cl, тому на детекторні властивості високоочищеного CdZnTe титан впливає сильніше, ніж на властивості телуриду кадмію.

Серед домішок у CdTe:Cl, вплив яких не розглядався, залишилися донорні Co ($E_V + 1,25$ eВ) та

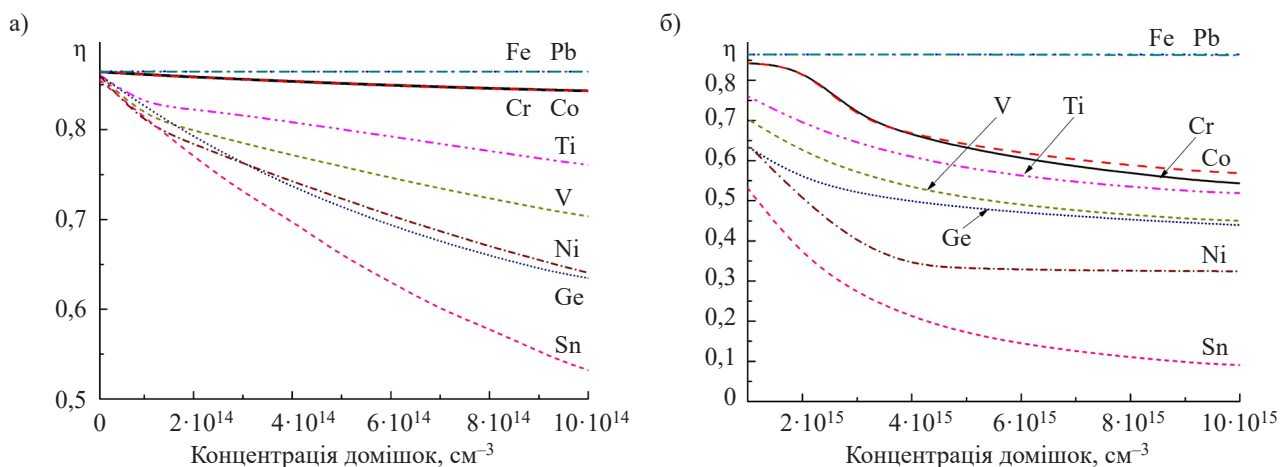


Рис. 3. Залежність ефективності збору зарядів детектора на основі Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te:Al від концентрації технологічних домішок деяких перехідних металів та елементів IV групи (на а та б — в різних інтервалах концентрації)

Pb ($E_V + 0,32$ eВ). Кобальт проявляє себе аналогічно хрому, тобто його рівень повністю іонізований і розташовується в забороненій зоні дуже далеко від рівня E_F , тому впливає тільки на компенсацію та питомий опір, але не на збір зарядів у детекторі на основі $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te:Al}$. Що стосується свинцю, то він поводить себе аналогічно залізу і не впливає на збір зарядів детекторного матеріалу, оскільки в умовах, що розглядаються, його донорний рівень завжди нейтральний, оскільки розташовується помітно нижче E_F .

Вище описувався негативний вплив на електрофізичні та детекторні властивості телуриду кадмію з боку акцепторних вакансій кадмію та донорних домішок із рівнями енергії, розташованими у верхній половині забороненої зони. Приблизно таким же чином ці дефекти впливають і на властивості $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te:Al}$. Це демонструє **рис. 4** на прикладі залежності питомого опору від вмісту нікелю і вакансій кадмію — тут видно, що підвищений вміст Ni та V_{Cd} помітно знижує ρ .

Моделювання показало, що подібна поведінка спостерігається і для ефективності збору зарядів, яка для досліджуваного матеріалу корелює з питомим опором: чим вище ρ , тим більше η , і навпаки. Крім того, виявилось, що вакансії цинку впливають на властивості $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te}$ приблизно так само, як і вакансії кадмію.

Все сказане вказує на те, що на основі структурно досконалих монокристалів $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te:Al}$, в матриці яких вакансії кадмію та цинку присутні у відносно малій кількості, можна отримати датчики високої детекторної якості. Збільшення вмісту точкових домішок і дефектів вище величини порядку 10^{16} см^{-3} здатне призвести до утворення їх скупчень, на яких розсіюються електрони провідності зі зменшенням їх рухливості і, отже, з деградацією

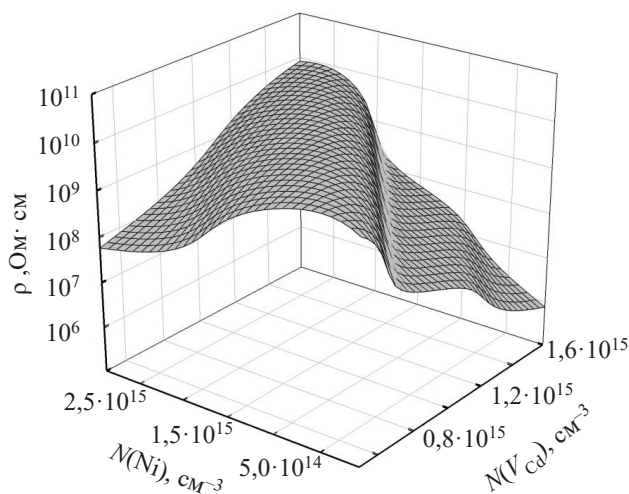


Рис. 4. Залежність питомого опору $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te:Al}$, дослідженого в [15], від концентрації вакансій кадмію ($E_V + 0,5$ eВ) та домішки нікелю ($E_V + 0,92$ eВ)

збору зарядів у детекторах. Забруднення домішками Sn, Ge, Ni, V, Ti у кількості 10^{15} — 10^{16} см^{-3} може помітно погіршити детекторні властивості телуриду кадмію та $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te}$ із зменшенням збору зарядів. Домішки Cr, Ni, Co у зазначених концентраціях можуть істотно зменшити питомий опір цих матеріалів, що супроводжується збільшенням шумів у детекторних спектрах.

Висновки

Дослідження показали, що утворення скупчень домішок і дефектів, які значно знижують електронну рухливість та детекторні характеристики CdTe та $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te}$, в принципі, можна уникнути, якщо забезпечити концентрацію домішок і дефектів не вище ніж $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ за умови рівномірного їх розподілу по об'єму детектора.

Вакансії кадмію здатні значно зменшити збір зарядів та питомий опір детекторів на основі CdTe та $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te}$, якщо вміст V_{Cd} перевищує середню концентрацію фонових домішок у детекторних матеріалах. Донорні забруднювальні домішки, рівні яких розташовуються в нижній частині забороненої зони (Fe, Pb) не можуть значно погіршити детекторні властивості телуриду кадмію та його потрійної сполуки з цинком, тому що у високоомному стані ці донорні домішки залишаються електрично нейтральними. Зі збільшенням вмісту — у процесі експлуатації або у вихідному стані — забруднювальні домішки донорного типу можуть утворювати негативно заряджені комплекси з вакансіями кадмію (А-центри), зміщуючи E_F до валентної зони, що призводить до зменшення ρ та, відповідно, збільшення шумів у спектрах.

Домішки перехідних металів Ti, V, Ni та елементів IV групи Ge, Sn у вихідних CdTe:Cl та $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te}$ з низьким рівнем інших фонових домішок можуть помітно погіршити ефективність збору зарядів у детекторах на основі цих напівпровідників. Домішки перехідних металів із зарядженими донорними рівнями, розташованими у верхній половині забороненої зони E_G , наприклад Ni, Cr, Co, можуть помітно зменшити питомий опір детекторних матеріалів, що супроводжується деградацією детекторних властивостей.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. *Radiation Detection Systems. Sensor Materials, Systems Technology and Characterization Measurements. 2nd edition.* Edited by: Iwanczyk J. S., Iniewski K. CRC Press Taylor & Francis Group, 2021, 323 p.
2. Caroli E., Moita M., Rui M. Curado da Silva et al. Hard X-ray and soft gamma ray polarimetry with CdTe/CZT spectro-imager. *Review. Galaxies*, 2018, vol. 6, iss. 3, pp. 69–85. <https://doi.org/10.3390/galaxies6030069>
3. Gazizov I. M., Smirnov A. A. Spectral analysis of the photoconductivity for characterization of CdTe and CdZnTe detectors. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021, vol. 2127, id. 012041, 12 p. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2127/1/012041>
4. Chan Rok Park, Seong-Hyeon Kang, Youngjin Lee. Similarity analysis of pixelated CdTe semiconductor gamma camera image using a quadrant bar phantom for nuclear medicine: Monte Carlo simulation

study. *Nucl. Eng. and Tech.*, 2021, vol. 53, iss. 6, pp. 1947–1954. <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.12.010>

5. 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>

6. Dubos S., Lemaire H., Schanne S. et al. ORIGAMIX, a CdTe-based spectro-imager development for nuclear applications. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 2015, vol. 787, pp. 302–307. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2014.12.111>

7. Johns P. M., Nino J. C. Room temperature semiconductor detectors for nuclear security. *J. Appl. Phys.* 2019, vol. 126, iss. 4, pp. 040902-1—040902-20. <https://doi.org/doi:10.1063/1.5091805>

8. Okamoto T., Igari T., Fukui T. et al. Gamma-ray irradiation effects on CdTe solar cell dosimeter. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2021, vol. 60, pp. SBBF02-1–SBBF02-5. <https://doi.org/10.35848/1347-4065/abd6d8>

9. McCoy J. J., Kakkireni S., Gilvey Z. H. et al. Overcoming Mobility Lifetime Product Limitations in Vertical Bridgman Production of Cadmium Zinc Telluride Detectors. *J. Electron. Mater.* 2019, vol. 48, iss. 7, pp. 4226–4234. <https://doi.org/10.1007/s11664-019-07196-5>

10. Nan R., Wang T., Xu G. et al. Compensation processes in high-resistivity CdZnTe crystals doped with In/Al. *J. Cryst. Growth*, 2016, vol. 451, pp. 150–154. <https://doi.org/doi:10.1016/j.jcrysgro.2016.07.032>

11. Колобов Г.А., Карпенко А.В. Рафинирование легких редких, редкоземельных и радиоактивных металлов. *Вопросы атомной науки и техники*, 2016, т. 101, № 1, с. 3–9.

12. Novikov G. F., Radychev N. A. Experimental determination of the dependence of the free electron-hole recombination rate constant on the band gap in semiconductors of the $A_{II}B_{VI}$ and $A_{I}B_{VII}$ types. *Russ. Chem. Bull.*, 2007, vol. 56, pp. 890–894. <https://doi.org/10.1007/s11172-007-0134-9>

13. Shockley W., Read W. T. Statistics of the recombinations of holes and electrons. *Phys. Rev.*, 1952, vol. 87, iss. 5, pp. 835–842. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.87.835>

14. Fraboni B., Pasquini L., Castaldini A. et al. X-ray irradiation effects on the trapping pro-perties of $Cd_{1-x}Zn_xTe$ detectors. *J. Appl. Phys.*, 2009, vol. 106, iss. 9, pp. 093713-1 – 093713-6. <https://doi.org/10.1063/1.3253748>

15. Nan R., Jie W., Zha G. et al. Irradiation-Induced Defects in $Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te:Al$. *J. Electron. Mater.* 2012, vol. 41, iss. 11, pp. 2044–2049. <https://doi.org/doi:10.1007/s11664-012-2204-5>

16. Xu L., Jie W., Zha G. et al. Radiation damage on CdZnTe:In crystals under high dose ^{60}Co γ -rays. *CrystEngComm*, 2013, vol. 15, iss. 47, pp. 10304–10310. <https://doi.org/10.1039/c3ce41734d>

17. Cavallini A., Fraboni B. Defective states induced in CdTe and CdZnTe detectors by high and low energy neutron irradiation. *J. Appl. Phys.* 2003, vol. 94, iss. 5, pp. 3135–3142. <https://dx.doi.org/10.1063/1.1600529>

18. Nan R., Jie W., Zha G. et al. Determination of trap levels in CZT:In by thermally stimulated current spectroscopy. *T. Nonferr. Metal. Soc.*, 2012, vol. 22, pp. s148 – s152. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(12\)61700-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(12)61700-2)

19. Кондрик А. И., Ковтун Г. П. Влияние примесей и структурных дефектов на электрофизические и детекторные свойства CdTe и CdZnTe. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2019, № 5–6, с. 43–50. <https://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2019.5-6.43>

20. Glenn F. Knoll. *Radiation Detection and Measurement*, 4th edition. John Wiley & Sons, Inc., 2010, 829 p.

21. Cavallini A., Fraboni B., Auricchio N. et al. Irradiation-induced defects in CdTe and CdZnTe detectors. *Nucl. Instrum. Meth. A*. 2001, vol. 458, iss. 1–2, pp. 392–399. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(00\)00931-1](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(00)00931-1)

22. Cavallini A., Fraboni B., Dusi W. et al. Radiation effects on II–VI compound-based detectors, *Nucl. Instrum. Meth. A*. 2002, vol. 476, iss. 3, pp. 770–778. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(01\)01674-6](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(01)01674-6)

23. Cavallini A., Fraboni B., Dusi W. et al. Deep levels and compensation in γ -irradiated CdZnTe. *Appl. Phys. Lett.* 2000, vol. 77, iss. 20, p. 3212–3216. <https://doi.org/10.1063/1.1324980>

24. Hofmann D. M., Stadler W., Christmann P., Meyer B. K. Defects in CdTe and $Cd_{1-x}Zn_xTe$. *Nucl., Instrum. Meth. A*, 1996, vol. 380, iss. 1–2, pp. 117–120. [https://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002\(96\)00287-2](https://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002(96)00287-2)

25. Kavanagh S. R., Walsh A., Scanlon D. O. Rapid Recombination by Cadmium Vacancies in CdTe. *ACS Energy Lett.*, 2021, vol. 6, pp. 1392–1398. <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acsenerylett.1c00380>

26. Кондрик А. И., Ковтун Г. П. Влияние радиационных дефектов на электрофизические и детекторные свойства CdTe:Cl, облученного нейтронами. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2020, № 1–2, с. 22–29. <https://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2020.1-2.22> [Rus]

27. Neumark G. F. Achievement of well conducting wide band-gap semiconductors: Role of solubility and of nonequilibrium impurity incorporation. *Phys. Rev. Lett.* 1989, vol. 62, iss. 15, pp. 1800–1803. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.62.1800>

Дата надходження рукопису
до редакції 11.02 2022 р.

DOI: 10.15222/ТКЕА2022.1-3.31
UDC 621.315.592.3

A. I. KONDRIK¹, G. P. KOVTUN^{1, 2}

Ukraine, Kharkiv, ¹NSC «Kharkiv Institute of Physics and Technology»,

²V. N. Karazin Kharkiv National University

E-mail: kondrik@kipt.kharkov.ua

INFLUENCE OF IMPURITIES AND STRUCTURAL DEFECTS ON THE PROPERTIES OF CdTe- AND CdZnTe-BASED DETECTORS

The most researched materials for uncooled semiconductor detectors of ionizing radiation are CdTe:Cl and $Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te$, which allow to obtain detectors with high values of resistivity ρ and electron mobility. In the process of producing detector materials, the background impurities and defects can be introduced into their matrix, and as a result the deep levels appear in the bandgap, acting as centers of capture and recombination of nonequilibrium charge carriers and reducing the registration ability of detectors. The aim of this study was to determine by computer simulation method the nature of the effect of background impurities and structural defects on the electrophysical and detector properties of CdTe and CdZnTe. Quantitative studies were conducted using reliability-tested models.

The authors used the examples of Cl, Fe, Pb, Cr, Co, Ti, V, Ni, Ge, Sn to study the effect of doping and background impurities on the resistivity ρ , lifetime of nonequilibrium electrons and holes, the charge collection efficiency η of detectors based on CdTe and $Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te$. The influence of cadmium vacancies on the degradation of the ρ and η of the detectors based on the materials under study was clarified. Impurities were found that reduce ρ and η in detectors based on CdTe:Cl and $Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te$:Al. The ultimate concentration of donor impurities and defects with their uniform distribution over the crystal volume without the formation of clusters was determined. The effect of the Fermi level and defect levels on the change and degradation of the properties of the materials under study was found. The ratios of the concentrations of background impurities and defects were established, making it possible to obtain semiconductors CdTe:Cl and $Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te$ of an acceptable detector quality.

Keywords: cadmium telluride, CdZnTe, detector properties, simulation, deep levels.

REFERENCES

1. *Radiation Detection Systems. Sensor Materials, Systems Technology and Characterization Measurements. 2nd edition.* Edited by: Iwanczyk J. S., Iniewski K. CRC Press Taylor & Francis Group, 2021, 323 p.
2. Caroli E., Moita M., Rui M. Curado da Silva et al. Hard X-ray and soft gamma ray polarimetry with CdTe/CZT spectro-imager. Review. *Galaxies*, 2018, vol. 6, iss. 3, pp. 69–85. <https://doi.org/10.3390/galaxies6030069>
3. Gazizov I. M., Smirnov A. A. Spectral analysis of the photoconductivity for characterization of CdTe и CdZnTe detectors. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021, vol. 2127, id. 012041, 12 p. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2127/1/012041>
4. Chan Rok Park, Seong-Hyeon Kang, Youngjin Lee. Similarity analysis of pixelated CdTe semiconductor gamma camera image using a quadrant bar phantom for nuclear medicine: Monte Carlo simulation study. *Nucl. Eng. and Tech.*, 2021, vol. 53, iss. 6, pp. 1947–1954. <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.12.010>
5. 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>
6. Dubos S., Lemaire H., Schanne S. et al. ORIGAMIX, a CdTe-based spectro-imager development for nuclear applications. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 2015, vol. 787, pp. 302–307. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2014.12.111>
7. Johns P. M., Nino J. C. Room temperature semiconductor detectors for nuclear security. *J. Appl. Phys.* 2019, vol. 126, iss. 4, pp. 040902-1—040902-20. <https://doi.org/doi:10.1063/1.5091805>
8. Okamoto T., Igari T., Fukui T. et al. Gamma-ray irradiation effects on CdTe solar cell dosimeter. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2021, vol. 60, pp. SBBF02-1–SBBF02-5. <https://doi.org/10.35848/1347-4065/abd6d8>
9. McCoy J. J., Kakkireni S., Gilvey Z. H. et al. Overcoming Mobility Lifetime Product Limitations in Vertical Bridgman Production of Cadmium Zinc Telluride Detectors. *J. Electron. Mater.* 2019, vol. 48, iss. 7, pp. 4226–4234. <https://doi.org/10.1007/s11664-019-07196-5>
10. Nan R., Wang T., Xu G. et al. Compensation processes in high-resistivity CdZnTe crystals doped with In/Al. *J. Cryst. Growth*, 2016, vol. 451, pp. 150–154. <https://doi.org/doi:10.1016/j.jcrysgro.2016.07.032>
11. Колобов Г.А., Карпенко А.В. Рафинирование легких редких, редкоземельных и радиоактивных металлов. *Вопросы атомной науки и техники*, 2016, т. 101, № 1, с. 3–9.
12. Novikov G. F., Radychev N. A. Experimental determination of the dependence of the free electron-hole recombination rate constant on the band gap in semiconductors of the $A_{II}B_{VI}$ and $A_{I}B_{VII}$ types. *Russ. Chem. Bull.*, 2007, vol. 56, pp. 890–894. <https://doi.org/10.1007/s11172-007-0134-9>
13. Shockley W., Read W. T. Statistics of the recombinations of holes and electrons. *Phys. Rev.*, 1952, vol. 87, iss. 5, pp. 835–842. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.87.835>
14. Fraboni B., Pasquini L., Castaldini A. et al. X-ray irradiation effects on the trapping properties of $Cd_{1-x}Zn_xTe$ detectors. *J. Appl. Phys.*, 2009, vol. 106, iss. 9, pp. 093713-1 – 093713-6. <https://doi.org/10.1063/1.3253748>
15. Nan R., Jie W., Zha G. et al. Irradiation-Induced Defects in $Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te$:Al. *J. Electron. Mater.* 2012, vol. 41, iss. 11, pp. 2044–2049. <https://doi.org/doi:10.1007/s11664-012-2204-5>
16. Xu L., Jie W., Zha G. et al. Radiation damage on CdZnTe:In crystals under high dose ^{60}Co γ -rays. *CrystEngComm*, 2013, vol. 15, iss. 47, pp. 10304–10310. <https://doi.org/10.1039/c3ce41734d>
17. Cavallini A., Fraboni B. Defective states induced in CdTe and CdZnTe detectors by high and low energy neutron irradiation. *J. Appl. Phys.* 2003, vol. 94, iss. 5, pp. 3135–3142. <https://dx.doi.org/10.1063/1.1600529>
18. Nan R., Jie W., Zha G. et al. Determination of trap levels in CZT:In by thermally stimulated current spectroscopy. *T. Nonferr. Metal. Soc.*, 2012, vol. 22, pp. s148 – s152. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(12\)61700-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(12)61700-2)
19. Kondrik A. I., Kovtun G. P. Influence of impurities and structural defects on electrophysical and detector properties of CdTe and CdZnTe. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*. 2019, no. 5–6, pp. 43–50. <https://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.5-6.43> [Rus]
20. Glenn F. Knoll. *Radiation Detection and Measurement, 4th edition.* John Wiley & Sons, Inc., 2010, 829 p.
21. Cavallini A., Fraboni B., Auricchio N. et al. Irradiation-induced defects in CdTe and CdZnTe detectors. *Nucl. Instrum. Meth. A* 2001, vol. 458, iss. 1–2, pp. 392–399. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(00\)00931-1](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(00)00931-1)
22. Cavallini A., Fraboni B., Dusi W. et al. Radiation effects on II–VI compound-based detectors. *Nucl. Instrum. Meth. A* 2002, vol. 476, iss. 3, pp. 770–778. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(01\)01674-6](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(01)01674-6)
23. Cavallini A., Fraboni B., Dusi W. et al. Deep levels and compensation in γ -irradiated CdZnTe. *Appl. Phys. Lett.* 2000, vol. 77, iss. 20, p. 3212–3216. <https://doi.org/10.1063/1.1324980>
24. Hofmann D. M., Stadler W., Christmann P., Meyer B. K. Defects in CdTe and $Cd_{1-x}Zn_xTe$. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 1996, vol. 380, iss. 1–2, pp. 117–120. [https://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002\(96\)00287-2](https://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002(96)00287-2)
25. Kavanagh S. R., Walsh A., Scanlon D. O. Rapid Recombination by Cadmium Vacancies in CdTe. *ACS Energy Lett.*, 2021, vol. 6, pp. 1392–1398. <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acsenerylett.1c00380>
26. Kondrik A. I., Kovtun G. P. Influence of radiation defects on the electrophysical and detector properties of CdTe:Cl irradiated by neutrons. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*. 2020, no. 1–2, pp. 22–29. <https://dx.doi.org/10.15222/TKEA2020.1-2.22> [Rus]
27. Neumark G. F. Achievement of well conducting wide band-gap semiconductors: Role of solubility and of nonequilibrium impurity incorporation. *Phys. Rev. Lett.* 1989, vol. 62, iss. 15, pp. 1800–1803. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.62.1800>

Опис статті для цитування:

Кондрік О. І., Ковтун Г. П. Вплив домішок і дефектів структури на властивості детекторів на основі CdTe та CdZnTe. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2022, № 1–3, с. 31–38. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2022.1-3.31>

Cite the article as:

Kondrik A. I., Kovtun G. P. Influence of impurities and structural defects on the properties of CdTe- and CdZnTe-based detectors. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2022, no. 1–3, pp. 31–38. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2022.1-3.31>

К. ф.-м. н. В. Р. КОЛБУНОВ, д. ф.-м. н. О. С. ТОНКОШКУР, к. т. н. О. В. ВАШЕРУК

Україна, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

E-mail: kolbunov_vadim@i.ua

ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ ТЕРМОЧУТЛИВОЇ СКЛОКЕРАМІКИ НА ОСНОВІ НАНОРОЗМІРНОГО ДІОКСИДУ ВАНАДІЮ

Наведено результати дослідження електропровідності та мікроструктури термочутливої склокераміки, яку було синтезовано на основі дрібнокристалічного діоксиду ванадію (VO_2) з розмірами кристалів 5–10 мкм та на основі нанокристалічного VO_2 з кристалами 70–100 нм. Температурні залежності питомого опору для обох типів склокераміки мають різкий стрибок питомого опору на півтори-дві декади в районі температури 70°C, що характерно для фазового переходу «метал — напівпровідник» у діоксиді ванадію. Для обох типів склокераміки було проведено порівняльне дослідження питомого опору в процесі термоцикування в температурному діапазоні, який містить температуру фазового переходу в VO_2 . Склокерамічні зразки, синтезовані на основі нанокристалічного VO_2 , показали значно стабільнішу поведінку. Це вказує на можливість створення стійкого склокерамічного матеріалу для терморезисторів з критичною температурою біля 70°C.

Ключові слова: склокераміка, діоксид ванадію, електропровідність, мікроструктура.

Як відомо, фазовий перехід «метал — напівпровідник» (ФПМН) у діоксиді ванадію супроводжується стрибкоподібною зміною низки фізичних параметрів цієї сполуки, зокрема питомого електричного опору [1]. Явище ФПМН привертає увагу дослідників з позицій загальнотеоретичного опису та практичного застосування. Найбільш вивченими є плівкові та композитні матеріали на основі VO_2 [2–5]. Загалом потенційних областей застосування пристроїв на основі діоксиду ванадію достатньо багато, зокрема, це перемикачі, пам'ять, фотодетектори, приводи, розумні вікна, камуфляжі, пасивні випромінювачі, резонатори, датчики [6–8]. У [9] запропоновано перспективне використання шарів з таких матеріалів для електротеплового захисту фотоелектричних елементів сонячних батарей.

Значний інтерес для досліджень становлять склокерамічні матеріали, синтезовані на основі діоксиду ванадію та ванадієво-фосфатного скла (ВФС) системи $V_2O_5 - P_2O_5$. Електронні пристрої на основі таких матеріалів можуть працювати при великих електричних струмах. Це дозволяє створювати елементи, відомі як порогові перемикачі та критичні терморезистори. Критичні терморезистори, що поєднують властивості термічного реле та терморезистора з від'ємним температурним коефіцієнтом опору, можуть, зокрема, використовуватися для ефективного захисту мікропроцесорів від перегрівів [10].

Істотним недоліком об'ємних кристалічних, полікристалічних та керамічних матеріалів на основі VO_2 є невисока стабільність електричних параметрів в процесі термоцикування в температурному

діапазоні, що містить температуру ФПМН T_f , яка дорівнює приблизно 70°C [11]. Дослідження показали, що зменшення розмірів кристалітів VO_2 у керамічних матеріалах на основі діоксиду ванадію та введення домішок міді, закису міді Cu_2O та діоксиду олова до склокераміки системи $VO_2 - V_2O_5 - P_2O_5$ значно покращує стабільність електричних параметрів при термоцикуванні включно з температурою T_f [12]. Ці результати вказують на те, що проблему стабілізації електричних параметрів склокерамічних матеріалів на основі VO_2 можна розв'язати. Це вимагає як пошуку нових стабільних складів склокераміки, так і з'ясування фізичних причин, що забезпечують стабілізацію її властивостей, пов'язаних із фазовим переходом «метал — напівпровідник» у діоксиді ванадію.

У представленій роботі досліджуються можливості підвищення стабільності електричних параметрів термочутливої склокераміки системи $VO_2 - V_2O_5 - P_2O_5 - SnO_2 - Cu_2O$ завдяки використанню у її складі нанокристалічного VO_2 .

Зразки та методика дослідження

Базовими компонентами для синтезу склокераміки були дрібнокристалічний діоксид ванадію з розмірами кристалітів в межах 5–10 мкм (далі — VO_2), нанокристалічний діоксид ванадію з кристалітами 70–100 нм (далі — $nanoVO_2$) та ванадієво-фосфатне скло складу (мол. %) $80V_2O_5 - 20P_2O_5$. Дрібнокристалічний діоксид ванадію отримували шляхом відновлення V_2O_5 вуглецем у нейтральній газовій атмосфері. Для отримання $nanoVO_2$ використовували метод золь-гель [13]. На основі діоксиду

ванадію обох типів за методикою, описаною в [12], було синтезовано склокераміку складу (ваг. %) $40\text{VO}_2 - 37\text{SnO}_2 - 15\text{ВФС} - 8\text{Cu}_2\text{O}$. Зразки для дослідження електропровідності мали форму циліндра з висотою 1—2 мм та діаметром основи 10 мм. На основи наносили електроди діаметром 5 мм з In–Ga-евтектики.

Дані про мікроструктуру поверхні зразків склокераміки отримували на растрових електронних мікроскопах JСХА-733 (JEOL, Японія) та REM-1061 (SELM, Україна).

Температурну залежність опору досліджуваних зразків реєстрували в процесі нагрівання зі швидкістю не більш ніж $1^\circ\text{C}/\text{хв}$. Опір вимірювали із відносною похибкою $\pm 0,1\%$. Абсолютна помилка реєстрації температури не перевищувала $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

Термоцикування здійснювали шляхом розігріву зразків склокераміки електричним струмом. Для цього на зразок подавали напругу, величина якої була достатня для його розігріву до температури ФПМН VO_2 ($T_f = 68^\circ\text{C}$). Зразок перемикався у стан із низьким опором, після чого протягом 30 с через нього протікав електричний струм 0,5 А, а його середня температура становила близько 85°C . Потім знімали напругу, і зразок охолоджувався протягом 90 с. Цей

процес повторювався циклічно. Після заданої кількості циклів вимірювали опір зразка R_S за температури 25°C , яка відповідає напівпровідниковому стану VO_2 , і опір R_M за температури 100°C , яка відповідає металевому стану VO_2 .

Експериментальні результати та їх обговорення

На рис. 1 представлені зображення мікроструктури поверхні зразків склокераміки, виготовлених з VO_2 та nanoVO_2 . В цілому вони є типовими для цих матеріалів і містять у своєму складі кристаліти діоксиду ванадію, включення ванадієво-фосфатного скла та інших компонентів склокераміки. Також у мікроструктурі зразків присутні пори. Слід зазначити, що середній розмір кристалітів діоксиду ванадію в склокераміці помітно вищий, ніж у порошках, з яких вони виготовлені. Це пов'язано з тим, що ВФС під час спікання зразків знаходиться в рідкій фазі та є чудовим середовищем для зростання кристалітів діоксиду ванадію [14].

Температурні залежності питомого електричного опору ρ для зразків склокераміки, синтезованої на основі дрібнокристалічного та нанокристалічного діоксиду ванадію, представлені на рис. 2. Характерною особливістю цих залежностей є різка,

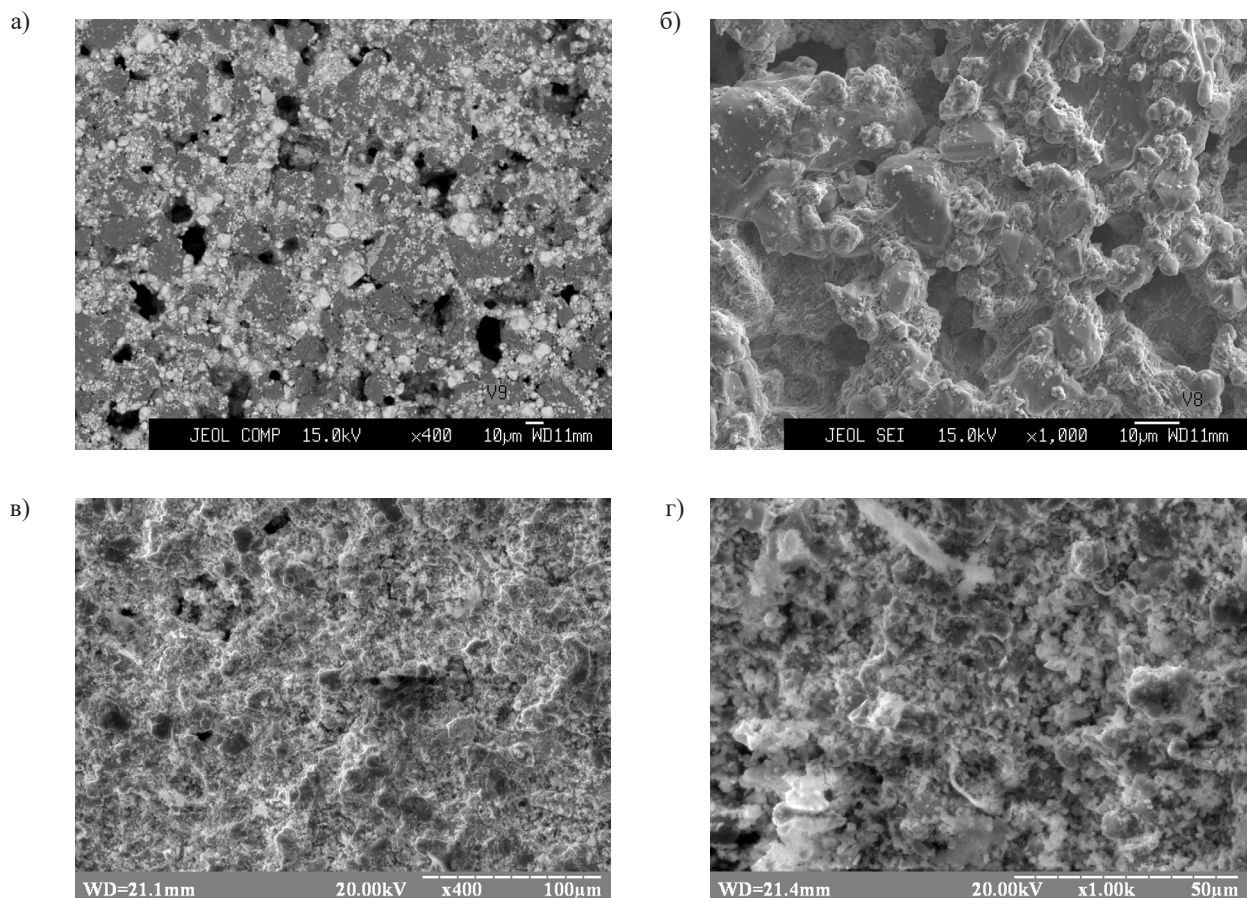


Рис. 1. Мікрофотографії поверхні зразків склокераміки на основі VO_2 (а, б) та nanoVO_2 (в, г) при різному збільшенні

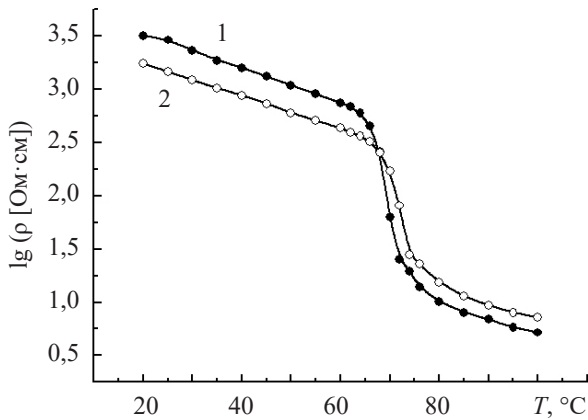


Рис. 2. Температурні залежності питомого електричного опору склокераміки $40\text{VO}_2 - 37\text{SnO}_2 - 15\text{ВФС} - 8\text{Cu}_2\text{O}$, синтезованої на основі VO_2 (1) та наноVO_2 (2)

на півтора-два порядки, зміна величини ρ в області температури 70°C . Цей стрибок опору пов'язаний з ФПМН у VO_2 .

Як показали дані рентгенофазового аналізу [15] та мікроструктурні дослідження (рис. 1), склокераміка на основі VO_2 та ВФС — це гетерогенний матеріал. Ванадієво-фосфатне скло, питомий електричний опір якого на три-чотири порядки вищий, ніж діоксиду ванадію в напівпровідниковому стані, утворює прошарки між кристалітами VO_2 , ізолюючи їх один від одного. Тому якщо через сітку кристалітів VO_2 мікроструктури склокераміки протікає електричний струм, на температурній залежності ρ спостерігатиметься стрибок, пов'язаний з ФПМН у діоксиді ванадію. Такий струм може виникнути, якщо між кристалітами VO_2 є прямі електричні контакти або такі контакти формуються диспергованими у ВФС компонентами з високою електропровідністю, яка значно перевищує електропровідність VO_2 у напівпровідниковій фазі. Дослідження фазового складу та мікроструктури показали, що такими компонентами у склокераміці на основі VO_2 є субмікронні кристаліти SnO_2 та фази Магнелі $\text{V}_n\text{O}_{2n-1}$ з низькою температурою фазового переходу «метал — діелектрик». Фази Магнелі утворюються в процесі синтезу склокераміки в результаті окисно-відновлювальних реакцій між VO_2 та Cu_2O , розчиненими в рідкій фазі [15]. Тобто наявність стрибка на отриманих температурних залежностях ρ підтверджує протікання струму через кристаліти VO_2 , завдяки чому внесок діоксиду ванадію у електропровідність склокераміки є основним.

Залежність відносної зміни опору зразків склокераміки на основі VO_2 та наноVO_2 від кількості термоциклів наведено на рис. 3. Як видно, у процесі термоцикування опір зразків склокераміки, синтезованих на основі наноVO_2 , є стабільнішим, ніж опір зразків, синтезованих на основі дрібнокристалічного VO_2 .

Незворотні зміни електричних параметрів напівпровідникової склокераміки на основі VO_2 в процесі термоцикування обумовлені тим, що фазовий перехід першого роду у VO_2 супроводжується зміною об'єму [1]. Наслідком ФПМН, що відбувається у кристалітах VO_2 , є виникнення сильної механічної напруги, що призводить до утворення мікротріщин. Мікротріщини розривають електричні зв'язки між кристалітами VO_2 , що призводить до збільшення питомого електричного опору склокераміки при зростанні кількості термоциклів (рис. 2). У разі достатньо великої кількості термоциклів сітка кристалітів VO_2 , якою протікає електричний струм, може зруйнуватися, перетворившись на окремі ізолювані кластери, і склокераміка втрапить електричні властивості, пов'язані з ФПМН в діоксиді ванадію. У [15] показано, що для збереження при термоцикуванні протікання струму через сітку кристалітів VO_2 і, отже, забезпечення стабільності електричних властивостей склокераміки, пов'язаних з ФПМН, необхідно забезпечити виконання умови

$$\frac{E\delta^2 x_v l_c}{4\alpha} \ll 1,$$

де E — модуль Юнга діоксиду ванадію;

δ — відносна деформація VO_2 при ФПМН;

x_v — об'ємна частка VO_2 у склокераміці;

l_c — середній розмір кристалітів VO_2 ;

α — коефіцієнт поверхневого натягу склокераміки.

З цієї умови, зокрема, випливає, що для її виконання необхідно зменшувати значення середнього розміру l_c кристалітів VO_2 та об'ємну частку x_v діоксиду ванадію. У склокераміці системи

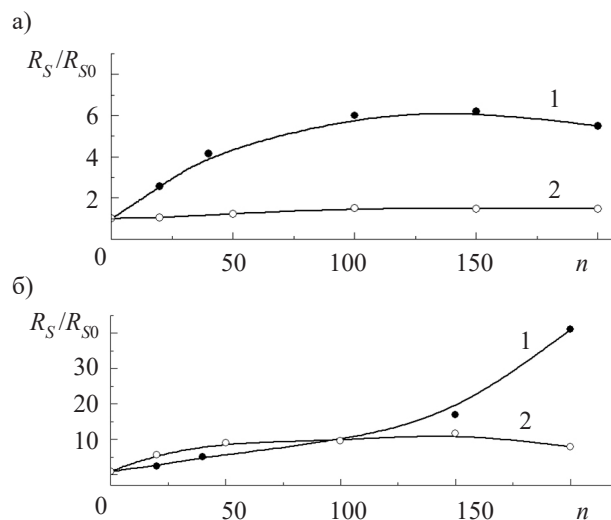


Рис. 3. Залежності відносної зміни електричного опору R_S/R_{S0} склокераміки $40\text{VO}_2 - 37\text{SnO}_2 - 15\text{ВФС} - 8\text{Cu}_2\text{O}$, синтезованої на основі VO_2 (1) та наноVO_2 (2), від кількості термоциклів n , отримані за різної температури:

a — 25°C ; b — 100°C

$\text{VO}_2 - \text{V}_2\text{O}_5 - \text{P}_2\text{O}_5 - \text{SnO}_2 - \text{Cu}_2\text{O}$ при фіксованому вмісті ВФС зменшення об'ємної частки VO_2 здійснюється через збільшення вмісту добавки SnO_2 , яка в процесі синтезу поводить нейтрально щодо VO_2 та ВФС. Крім того, дисперговані у склі дрібні кристали SnO_2 з високою електропровідністю створюють додаткові електричні зв'язки між кристалітами VO_2 , що робить їх сітку перколяційною, більш густою, а отже, більш стійкою до термоцикування. Це пояснює суттєве підвищення стабільності склокераміки системи $\text{VO}_2 - \text{V}_2\text{O}_5 - \text{P}_2\text{O}_5 - \text{SnO}_2$ у порівнянні зі склокерамікою базової системи $\text{VO}_2 - \text{V}_2\text{O}_5 - \text{P}_2\text{O}_5$.

Наведена вище умова вказує на те, що радикальним способом стабілізації електричних параметрів склокераміки на основі діоксиду ванадію є перехід до нанорозмірів її кристалічних компонентів, в першу чергу — до кристалітів VO_2 , що підтверджують дані на рис. 3.

Висновки

Використання нанокристалічного діоксиду ванадію в шихті для синтезу склокераміки на його основі забезпечує підвищення стабільності її електричних параметрів, пов'язаних із фазовим переходом «метал — напівпровідник» у VO_2 . Це вказує на те, що використання нанотехнології для синтезу склокераміки системи $\text{VO}_2 - \text{V}_2\text{O}_5 - \text{P}_2\text{O}_5 - \text{SnO}_2 - \text{Cu}_2\text{O}$ може дозволити створити стабільний матеріал, придатний для виготовлення критичних терморезисторів та порогових перемикачів з великим терміном експлуатації.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Бугаев А.А., Захарченя Б.П., Чудновский Ф.А. *Фазовый переход металл — полупроводник и его применение*. Ленинград, Наука, 1979, 116 с. (Rus)
2. Ren H., Li B., X. Zhou et al. Wafer-size VO_2 film prepared by water-vapor oxidant. *Applied Surface Science*, 2020, vol. 525, 146642. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.146642>
3. Wu C., Wang Y., Ma G. Microfabrication of VO_2 thin films via a photosensitive sol-gel method. *Coatings*, 2021, vol. 11, iss. 10, 1264. <https://doi.org/10.3390/coatings11101264>
4. Li G., Zhou Q., Ge L. et al. Influence of micro-structure on modulation properties in VO_2 composite terahertz memory

metamaterials. *Optics Express*, 2020, vol. 28, iss. 21, 31436. <https://doi.org/10.1364/OE.404082>

5. Petukhova Y.V., Kudinova A.A., Bobrysheva N.P. et al. Polymer composites containing dispersed VO_2 of various polymorphs: Effects of polymer matrix on functional properties. *Materials Chemistry and Physics*, 2019, vol. 235, 121752. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.121752>

6. Ke Y., Wang S., Liu G. et al. Vanadium Dioxide: The Multistimuli Responsive Material and Its Applications. *Nano-Micro Small*, 2018, vol. 14, iss. 39, 1802025. <https://doi.org/10.1002/sml.201802025>

7. Kim H.-N., Yang S. Responsive smart windows from nanoparticle – polymer composites. *Advanced Functional Materials*, 2019, vol. 30, iss. 2, 1902597. <https://doi.org/10.1002/adfm.201902597>

8. John J., Gutierrez Y., Zhang Zh. Et al. Multipolar resonances with designer tunability using VO_2 phase-change materials. *Physical Review Applied*, 2020, vol. 13, iss. 4, 044053. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.13.044053>

9. Тонкошкур О.С., Іванченко О.В. Застосування шару на основі матеріалів з фазовим переходом «метал — напівпровідник» для електротеплового захисту сонячних елементів. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2021, № 3–4, с. 57–64. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2021.3-4.57>

10. Ивон А.И., Кузьменко Е.Н. Использование критических терморезисторов для защиты процессора от перегрева. *Системные технологии*, 2007, т. 2, № 49, с. 25–32.

11. Li D.X., Huang W.X., Song L.W., Shi Q.W. The Stability Study on Vanadium Dioxide. *Advanced Materials Research*, 2015, vol. 1120–1121, pp.158–167. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1120-1121.158>

12. Ivon A.I., Kolbunov V.R., Chernenko I.M. Conductivity stabilization by metal and oxide additives in ceramics on the basis of VO_2 and glass $\text{V}_2\text{O}_5 - \text{P}_2\text{O}_5$. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2005, vol. 351, iss. 46–48, pp. 3649–3654. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2005.08.035>

13. Черненко І.М., Івон О.І., Колбунов В.Р., Олійник О.Ю. *Спосіб отримання нанодисперсного діоксиду ванадію*. Пат. 100940 Україна, 2013, бюл. № 3.

14. Василенко В.Я., Івон А.И., Черненко И.М. Электросинтез монокристаллов VO_2 в оксидных ванадиево-фосфатных расплавах. *Кристаллография*, 1983. т. 28, № 4, 830 с.

15. Kolbunov V.R., Ivon A.I., Kunitskiy Y.A., Chernenko I.M. The influence of microstructure and phase composition of glass-ceramics in the $\text{VO}_2 - \text{V}_2\text{O}_5 - \text{P}_2\text{O}_5 - \text{Cu}_2\text{O} - \text{SnO}_2$ system on the electrical properties related to the metal-semiconductor phase transition. *Ceramics International*, 2013, vol. 39, iss. 4, p. 3613–3620. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.10.189>

Дата надходження рукопису
до редакції 17.02 2022 р.

ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF THERMOSENSITIVE GLASS-CERAMICS
BASED ON NANOSIZED VANADIUM DIOXIDE

The metal-semiconductor phase transition (MSPT) in vanadium dioxide is accompanied by an abrupt change in a number of physical parameters of this compound, in particular the resistivity. Of great interest are glass-ceramic materials, which are synthesized on the basis of vanadium dioxide and glass of the $V_2O_5 - P_2O_5$ system. Electronic devices based on such materials can operate at high electric currents. This allows you to create elements known as threshold switches and critical thermistors. This paper presents the results of the study of electrical conductivity and microstructure of thermosensitive glass-ceramics synthesized on the basis of fine crystalline VO_2 with crystal sizes of 5–10 μm and on the basis of nanocrystalline VO_2 (crystal size 70–100 nm). In general, microstructures are typical for such materials and contain crystals of vanadium dioxide, inclusions of vanadium phosphate glass and other components of glass ceramics. There are also pores in the microstructure of the samples. The temperature dependences of the resistivity for both types of glass-ceramics have a sharp change in the resistivity by 1.5–2 decades in the region of 70°C, which is characteristic of the MSPT in vanadium dioxide. For both types of glass-ceramics, a comparative study of the resistivity during cycling through the phase transition temperature in VO_2 was performed. Glass-ceramic samples synthesized on the basis of nanocrystalline VO_2 showed much more stable behavior. This allows creating a stable glass-ceramic material for thermistors with a critical temperature of about 70°C.

Keywords: glass-ceramics, vanadium dioxide, electrical conductivity, microstructure

REFERENCES

1. Bugayev A.A., Zakharchenya B.P., Chudnovskiy F.A. *Fazovyy perekhod metall — poluprovodnik i yego primeneniye* [Metal-semiconductor phase transition and its application]. Leningrad, Nauka, 1979, 116 p. (Rus)
2. Ren H., Li B., X. Zhou et al. Wafer-size VO_2 film prepared by water-vapor oxidant. *Applied Surface Science*, 2020, vol. 525, p. 146642. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.146642>
3. Wu C., Wang Y., Ma G. Microfabrication of VO_2 thin films via a photosensitive sol-gel method. *Coatings*, 2021, vol. 11, iss. 10, pp. 1264. <https://doi.org/10.3390/coatings11101264>
4. Li G., Zhou Q., Ge L. et al. Influence of micro-structure on modulation properties in VO_2 composite terahertz memory metamaterials. *Optics Express*, 2020, vol. 28, iss. 21, pp. 31436. <https://doi.org/10.1364/OE.404082>
5. Petukhova Y.V., Kudina A.A., Bobrysheva N.P. et al. Polymer composites containing dispersed VO_2 of various polymorphs: Effects of polymer matrix on functional properties. *Materials Chemistry and Physics*, 2019, vol. 235, pp. 121752. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.121752>
6. Ke Y., Wang S., Liu G. et al. Vanadium Dioxide: The Multistimuli Responsive Material and Its Applications. *Nano-Micro Small*, 2018, vol. 14, iss. 39, pp. 1802025. <https://doi.org/10.1002/smll.201802025>
7. Kim H.-N., Yang S. Responsive smart windows from nanoparticle – polymer composites. *Advanced Functional Materials*, 2019, vol. 30, iss. 2, pp. 1902597. <https://doi.org/10.1002/adfm.201902597>
8. John J., Gutierrez Y., Zhang Zh. Et al. Multipolar resonances with designer tunability using VO_2 phase-change materials. *Physical Review Applied*, 2020, vol. 13, iss. 4, pp. 044053. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.13.044053>
9. Tonkoshkur A. S., Ivanchenko A. V. Using a layer based on materials with a metal to semiconductor phase transition for electrothermal protection of solar cells. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2021, no. 3–4, pp. 57–64. (Ukr) <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.3-4.57>
10. Ivon A.I., Kuz'menko Ye.N. [Using critical thermistors to protect the processor from overheating]. *System technologies*, 2007, vol. 2, no 49, pp. 25 – 32. (Rus)
11. Li D.X., Huang W.X., Song L.W., Shi Q.W. The Stability Study on Vanadium Dioxide. *Advanced Materials Research*, 2015, vol. 1120–1121, pp.158–167. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1120-1121.158>
12. Ivon A.I., Kolbunov V.R., Chernenko I.M. Conductivity stabilization by metal and oxide additives in ceramics on the basis of VO_2 and glass $V_2O_5-P_2O_5$. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2005, vol. 351, iss. 46–48, pp. 3649–3654. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2005.08.035>
13. Chernenko I.M., Ivon O.I., Kolbunov V.R., Oliynyk O.Yu. [Method of producing nanodispersed vanadium dioxide]. Pat. UA no. 100940, 2013, bull. 3. (Ukr)
14. Vasylenko V.Ya., Yvon A.Y., Chernenko Y.M. [Electrosynthesis of single crystals of VO_2 in oxide vanadium-phosphate melts]. *Crystallografija*, 1983, vol. 28, no 4, 830 p. (Rus)
15. Kolbunov V.R., Ivon A.I., Kunitskiy Y.A., Chernenko I.M. The influence of microstructure and phase composition of glass-ceramics in the $VO_2 - V_2O_5 - P_2O_5 - Cu_2O - SnO_2$ system on the electrical properties related to the metal-semiconductor phase transition. *Ceramics International*, 2013, vol. 39, iss. 4, pp. 3613–3620. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.10.189>

Опис статті для цитування:

Колбунов В. Р., Тонкошкур О. С., Вашерук О. В. Електропровідність термочутливої склокераміки на основі нанорозмірного діоксиду ванадію. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*, 2022, № 1–3, с. 39–43. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2022.1-3.39>

Cite the article as:

Kolbunov V. R., Tonkoshkur O. S., Vasheruk O.V. Electrical conductivity of thermosensitive glass-ceramics based on nanosized vanadium dioxide. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2022, no. 1–3, pp. 39–43. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2022.1-3.39>

*PhD O. O. ПУДОВ, С. О. СОКОЛОВ, к. ф.-м. н. О. С. АБИЗОВ,
к. ф.-м. н. О. В. РИБКА, к. т. н. В. Є. КУТНІЙ*

Україна, Національний науковий центр “Харківський фізико-технічний інститут”

E-mail: pudov@kipt.kharkov.ua

ЦИФРОВА ОБРОБКА В ПЛІС ІМПУЛЬСІВ ГАЗОВОГО ДЕТЕКТОРА ГАММА-ВИПРОМІНЮВАННЯ ДЛЯ ПРИДУШЕННЯ АКУСТИЧНИХ ЗАВАД

Для ксенонових пропорційних детекторів гамма-випромінювання розроблено вимірювальний тракт на основі ПЛІС та алгоритм цифрової обробки сигналів, що дозволяє відокремлювати низькочастотний шум у вихідному сигналі детектора, який виникає внаслідок зовнішнього звукового впливу, від корисного сигналу — іонізаційних імпульсів. Такий підхід завдяки придушенню завад дає можливість проводити спектральні вимірювання гамма-випромінювання в умовах суттєвого акустичного фону, коли детектори зі звичайним спектрометричним трактом не справляються із завданням.

Ключові слова: детектори гамма-випромінювання, ксенон, пропорційні детектори, ПЛІС, цифрова обробка сигналу, придушення завад.

Пропорційні спектрометричні детектори рентгенівського та γ -випромінювання знайшли застосування у галузі ядерної фізики, астрономії, матеріалознавства тощо. Ксенон і його суміші в ролі детектувального середовища особливо привабливі через великий атомний номер, завдяки чому детектори на його основі мають високу чутливість [1]. При цьому конструкція пропорційних газових лічильників обумовлює їхню високу чутливість до акустичних хвиль і вібрації, а звичайні “аналогові” електронні вимірювальні тракти часто не здатні подолати завади, що виникають.

Останніми роками широке застосування в галузі аналізу амплітудних розподілів сигналів різних детекторів, як твердотільних, так і газонаповнених, знайшли технологія програмованих логічних інтегральних схем (ПЛІС) та відповідні мікросхеми. Про отримання амплітудних розподілів сигналу (спектрів) за допомогою ПЛІС для твердотільних детекторів раніше повідомлялося в деяких дослідженнях, наприклад у [2, 3]. Такі детектори зазвичай мало чутливі до зовнішнього акустичного впливу, і відповідні алгоритми ПЛІС можуть бути простими. Наприклад, у роботі [2], де ПЛІС використовувалася для створення компактного спектрометра випромінювання на основі сцинтилятора CsI(Tl), для отримання спектрів автори застосували “простий алгоритм перевищення порогового значення з використанням трикутного фільтра з порогом, визначеним користувачем”.

В [4] був запропонований і реалізований в ПЛІС алгоритм для придушення акустичного шуму в γ -детекторі з високим тиском ксенону (НРХе). Цей алгоритм надає точки початку та кінця кожного

імпульсу, утвореного в процесі іонізації газу гамма-випромінюванням. Ці точки визначають базову лінію сигналу. Для детекторів на основі НРХе третій проміжний екранувальний електрод (сітка Фріша) є деталлю, яка призводить до значного підвищення віброакустичної чутливості [5], однак такі детектори менш чутливі до акустичного шуму у порівнянні з пропорційними лічильниками.

У [6] апаратне забезпечення National Instruments разом з програмою LabView використовувалося при роботі з детектором на основі НРХе для фільтрації наведеного акустичного шуму за допомогою швидкого перетворення Фур’є. При цьому в алгоритмі використовувався лінійний фільтр, який відокремлював заздалегідь встановлені звукові частоти, що не є універсальним рішенням. Хоча визначення частот шуму за допомогою швидкого перетворення Фур’є та його фільтрація здається правильним підходом, він досить складний у виконанні.

У цій роботі для цифрової обробки сигналу пропорційного лічильника, наповненого сумішшю ксенону і метану, у присутності акустичного та/або вібраційного впливу пропонується використовувати алгоритм “вікон часу”. ПЛІС, що працює за цим алгоритмом, не визначає точно “істинні” початок і кінець імпульсу, що є перевагою у випадку, коли імпульси мають досить довгі фронти, що спадають, і коли шумова частина сигналу є значною.

Методика проведення досліджень

Схему розробленого пропорційного лічильника представлено на **рис. 1**. Конструкція детектора та процедура заповнення газом аналогічні описаним у [7]. У нинішній конструкції використано одну трубку

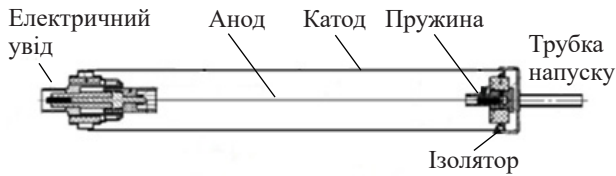


Рис. 1. Схема пропорційного лічильника

для напуску газу, що розташовується з торця детектора, замість двох, прикріплених до циліндричного корпусу детектора, у попередніх моделях. Крім того, в цій роботі анод детектора виготовлявся з CuBe-дроту діаметром 30 мкм на відміну від 60-мкм вольфрамового анода в [7] і був підпружинений з одного боку. Залишилися незмінними такі параметри, як діаметр катода (корпусу детектора) 25,5 мм та довжина детектора 250 мм. Детектор був заповнений сумішшю $\text{Xe}+2,1\%\text{CH}_4$ чистотою 99,9999% до тиску 1,25 бар.

Під час спектрометричних вимірювань детектор підключався або до “традиційного” (“аналогового”), або до “цифрового” (на основі ПЛІС) вимірювального тракту. Сигнал зчитувався з анода. “Аналоговий” тракт складався з підсилювача Ortec 142АН, підсилювача-формувавця Ortec 672, багатоканального аналізатора Amptek 8000D та персонального комп’ютера. У “цифровому” тракті замість багатоканального аналізатора використовувалася плата 14-розрядного аналого-цифрового перетворювача (АЦП) компанії Terrasic разом з налагоджувальною платою на базі ПЛІС Altera Cyclon IV. Максимальна частота оцифровування сигналу в АЦП — 200 МГц, у цій роботі оцифровування вихідного сигналу детектора проводилося на частоті 50 МГц — основній тактовій частоті ПЛІС. Мовою Verilog була написана програма “прошивки”, за допомогою якої конфігурувалася ПЛІС. В результаті в ПЛІС аналізувався оцифрований вхідний сигнал, визначалася амплітуда іонізаційних імпульсів і створювалися амплітудні розподіли. Рівень акустичного шуму вимірювався приладом Мезу М5.

Напруга зсуву подавалася на анод детектора за допомогою прецизійного джерела високої напруги Ortec 659 через RC-фільтр. Використовувалися стандартні лабораторні джерела γ -випромінювання, такі як ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{152}Eu та ^{133}Ba . Під час вимірювань γ -джерело розташовувалося по центру безпосередньо на поверхні пропорційного детектора.

Проведення досліджень та обговорення результатів

Вибір режиму роботи детектора. Після виготовлення детектора і наповнення його газовою сумішшю були проведені спектрометричні вимірювання з використанням “аналогового” вимірювального тракту та джерела ^{241}Am при варіюванні напруги анода в діапазоні від 600 до 1500 В. З отриманих амплітудних розподілів були визначені швидкість лічби іонізаційних імпульсів, коефіцієнт газового по-

силення (за методикою, описаною у [8]) та роздільна здатність енергії γ -квантів. Залежність швидкості лічби від напруги на аноді виходить на відносно плоске плато при ≈ 950 В. Коефіцієнт газового посилення зростає з підвищенням напруги, і з 1200 В починається його строго експоненційне зростання. У діапазоні напруги 1200—1400 В досягаються найкращі значення роздільної здатності: близько 6,5% для енергії 60 кеВ. Так було обрано значення анодної напруги 1200 В для подальших експериментів.

Процес цифрової обробки. На рис. 2 показано типові імпульси детектора, отримані за допомогою “цифрового” вимірювального тракту. У дослідженнях використовувалося γ -джерело ^{241}Am . Сигнал містить певну шумову пульсацію, яка значно менш присутня в “аналогових” імпульсах (в іншому вони схожі). Причиною може бути те, що у “цифровому” тракті використовувався стандартний АЦП, а не створений спеціально для спектрометрії γ -випромінювання. Наприклад, на відміну від аналізатора Amptek 8000D плати з ПЛІС та відповідним АЦП є повністю відкритими (без екранувальних корпусів).

ПЛІС, “прошита” для набору спектрів відповідно до створеного алгоритму, спочатку шукає додатні імпульси в сигналі АЦП під час безперервного збору даних. Це робиться шляхом пошуку моменту, коли сигнал змінюється зі зростаючого на спадаючий. Іонізаційними вважаються тільки імпульси з відносно крутим фронтом, амплітуда яких наростає зі швидкістю понад 3,5% на мікросекунду. Як тільки іонізаційний імпульс виявлено, для пошуку його початку та кінця ПЛІС ініціює часові вікна. Для імпульсів на рис. 2 їхній початок та кінець показано вертикальними пунктирними лініями зліва та справа від максимуму піка. Через дві отримані точки конкретного імпульсу проводиться його базова лінія (пунктирні похилі сірі лінії). Висота імпульсу визначається як максимальне пікове значення мінус відповідне значення базової лінії. Значення часу наростання та спаду імпульсу (вікна часу) вибираються шляхом попереднього аналізу імпульсів.

Важливо зазначити, що відносно велика швидкість наростання імпульсу, забезпечена великою швидкістю

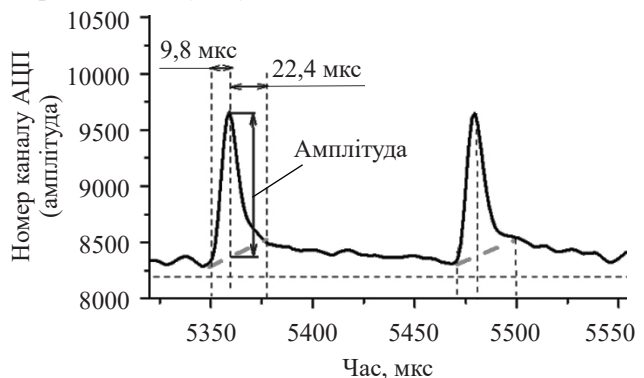


Рис. 2. Імпульси, виміряні за допомогою “цифрового” спектрометричного тракту

перенесення заряду в детекторі, дозволяє досить точно визначити час початку імпульсу, який фізично пов'язаний з моментом іонізації робочого середовища детектора γ -квантом. Час спадання імпульсу є відносно довгим і фізично визначається константою часу RC вимірювального тракту. У нашому випадку час закінчення імпульсу визначається зі значною похибкою, проте його точним значенням вважається момент повернення сигналу до базового значення, яке приймається постійним впродовж тривання імпульсу за відсутності шумів. Для вимірювань, описаних у цій статті, було експериментально вибрано час наростання 9,8 мкс та час спаду 22,4 мкс. Загалом, форма імпульсу та константи часу, необхідні для правильного оброблення імпульсів, залежать від геометрії детектора, детектувального середовища, часу інтегрування та диференціювання формувального підсилювача та напруги зміщення.

Оскільки кінець імпульсу визначається не зовсім коректно, висота імпульсу, отримувана за допомогою такої процедури обробки, буде менше фактичної. Проте це не є критичним, оскільки визначена висота імпульсу пропорційна фактичній. У цьому випадку при проведенні енергетичного калібрування амплітудного розподілу імпульсів, тобто при перетворенні номера каналу АЦП на енергію, буде враховано систематичне заниження висоти імпульсу.

На **рис. 3** показані амплітудні розподіли сигналу газового детектора для декількох стандартних джерел γ -випромінювання, виміряні з використанням "цифрового" вимірювального тракту на основі ПЛІС та описаної процедури. Було визначено положення відомих фотопіків у цих розподілах та проведено калібрування АЦП, показане на **рис. 4**. Апроксимація даних показує, що залежність є лінійною з параметром якості підгонки R -квадрат (коефіцієнт детермінації), який дорівнює 99,99995, що підтверджує наведений вище аргумент про те, що калібрування враховує заниження амплітуд імпульсів.

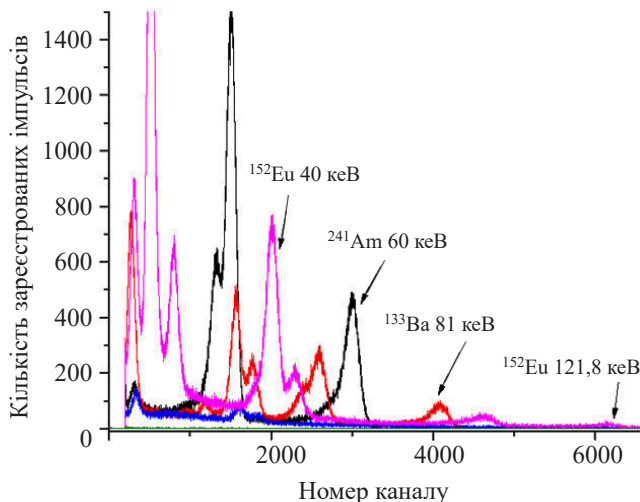


Рис. 3. Амплітудні розподіли різних γ -джерел, виміряні за допомогою ПЛІС

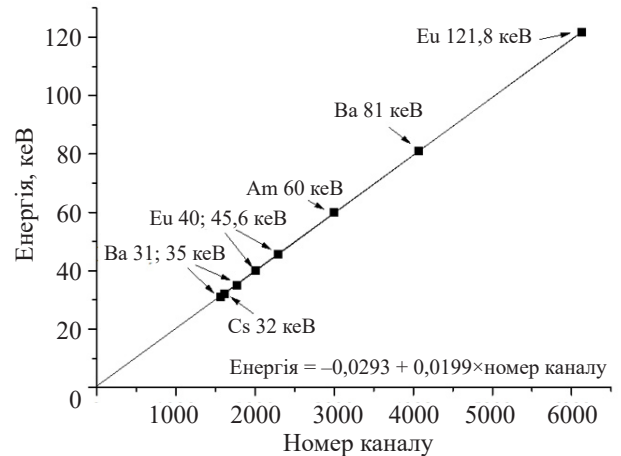


Рис. 4. Калібрування за енергією

Такий результат також вказує на те, що точний час закінчення імпульсу в цій процедурі не має великого значення, якщо початок імпульсу добре виражений та визначений. Для кожної пари вибраних значень часу (вікон часу) наростання та спаду імпульсу калібрування по енергії має бути своїм.

Описана процедура віднімання базової лінії в ПЛІС виконується за 2,5 мкс, і мертвий час детектора практично відсутній. З іншого боку, швидкість лічби імпульсів при використанні цього алгоритму в два-три рази менше, ніж в "аналоговому" вимірювальному тракту, що пов'язано з селекцією імпульсів за крутістю наростального фронту. Крім того, швидкість лічби імпульсів може стати ще меншою у тому випадку, коли детектор працює у присутності акустичних хвиль високої інтенсивності, оскільки деякі з іонізаційних імпульсів, накладених на шумові синусоїдальні хвилі, не розпізнаються.

Вимірювання за наявності акустичного шуму. Акустичні хвилі створювали генератором сигналів Tektronix AFG3102C. Синусоїдальні хвилі з різною частотою та амплітудою до 10 В передавались через акустичний динамік, який розміщувався на відстані 15 см від детектора фронтальною площиною паралельно осі детектора. Значення акустичної

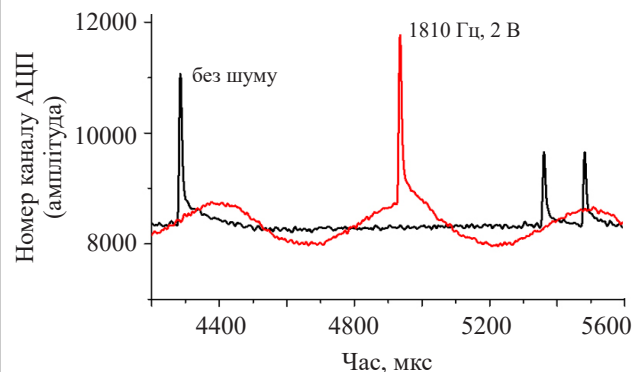


Рис. 5. Сигнал з анода, виміряний за допомогою ПЛІС без шуму та у присутності акустичної хвилі синусоїдальної форми з амплітудою 2 В частотою 1810 Гц

потужності в безпосередній близькості від детектора складало 85 дБ за амплітуди синусоїдального сигналу генератора 10 В. При вимкненому генераторі акустичний фон становив 42 дБ.

На рис. 5 показано сигнал детектора, вимірний за допомогою тракту на основі ПЛІС у присутності зовнішнього звукового впливу та без нього. З графіка видно, що частота синусоїди у сигналі детектора збігається із частотою генератора. Така завада має значно спотворювати спектри γ -випромінювання, виміряні детектором.

На рис. 6 показані амплітудні розподіли сигналу детектора від γ -джерела ^{241}Am , отримані за допомогою “аналогового” та “цифрового” вимірювальних трактів в умовах завад різної частоти та без завад. Як видно, на певних частотах у “аналогових” спектрах виникають спотворені фотопіки та низькочастотні паразитні піки.

Припускається, що основна деталь детектора, яка спотворює сигнал через зовнішній акустичний

шум, — це тонкий анодний провід разом з натяжною пружиною. Така конструкція аналогічна закріпленій на кінцях струні, в якій виникають коливання під зовнішнім впливом.

Вимірювання на основі ПЛІС дозволили отримати досить типові спектри без будь-яких артефактів. На рис. 6, б помітна лише трохи менша швидкість лічби імпульсів на частоті звуку 300 Гц (одна з частот, де “аналоговий” спектр сильно спотворювався). Крім того, у всіх “цифрових” вимірюваннях загальна кількість зареєстрованих імпульсів у два-три рази нижча у порівнянні з “аналоговими”. У загальному випадку така втрата імпульсів є цілком прийнятною, якщо вона компенсується хорошою енергетичною роздільною здатністю спектрометра.

В процесі дослідження впливу акустичного шуму більш високих частот було виявлено, що деякі з них викликають досить сильний резонанс і спотворення великої амплітуди в сигналі детектора, а обробка в ПЛІС призводить до значного спотворення спектрів.

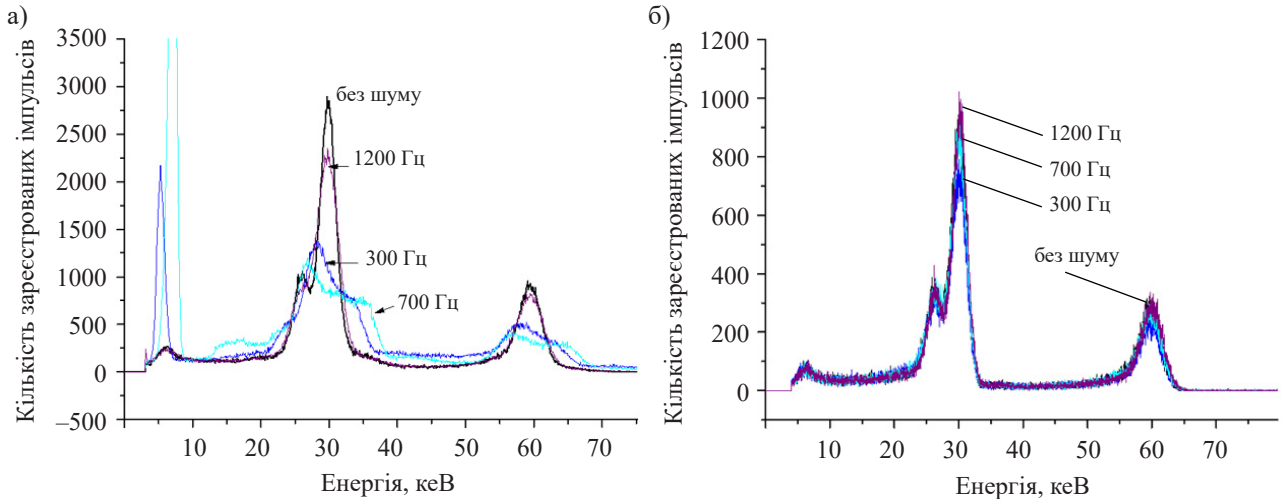


Рис. 6. Амплітудні розподіли сигналу детектора від γ -джерела ^{241}Am , виміряні за різних частот генератора “аналоговим” трактом (а) та трактом на основі ПЛІС (б) без шуму та в умовах завад амплітудою 10 В різної частоти

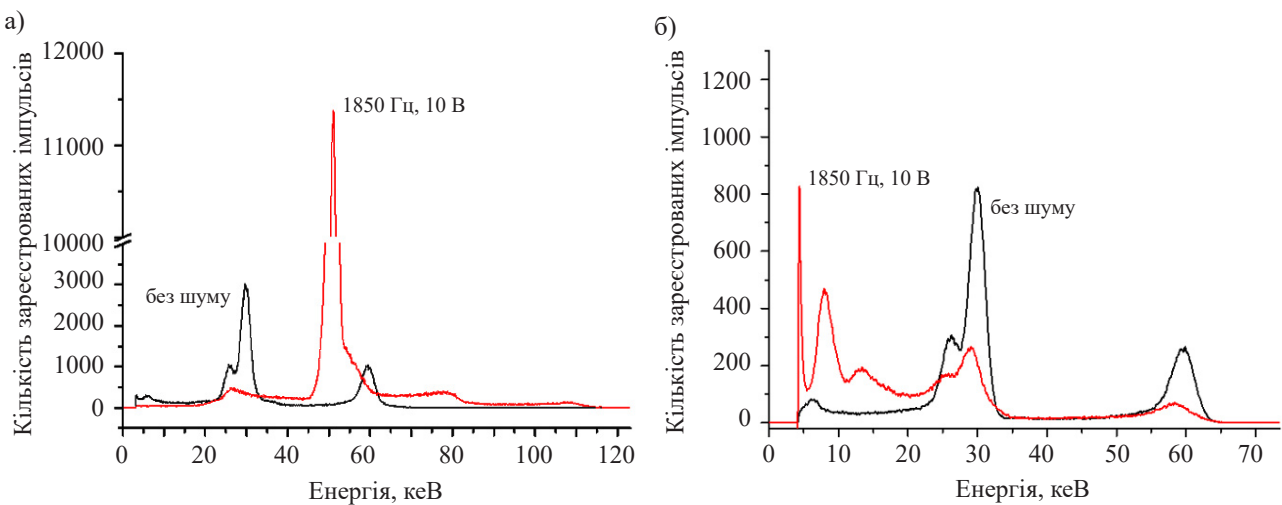


Рис. 7. Амплітудні розподіли сигналу детектора від γ -джерела ^{241}Am , виміряні за різних частот генератора “аналоговим” трактом (а) та трактом на основі ПЛІС (б) без шуму та в умовах завади частотою 1850 В амплітудою 10 В

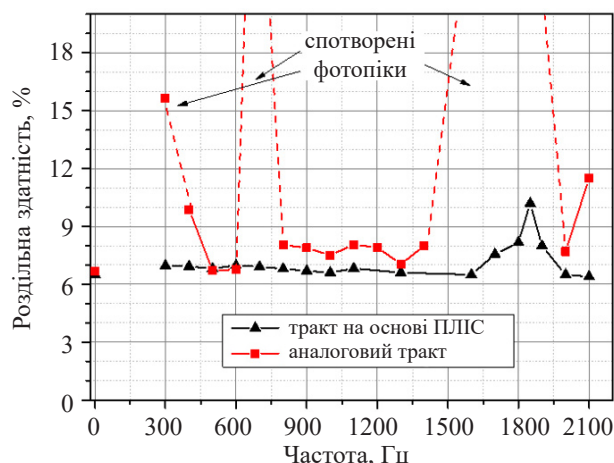


Рис. 8. Енергетична роздільна здатність по фотопіку з енергією 60 кеВ в спектрах ^{241}Am за різних частот генератора з амплітудою 10 В

На рис. 7 показано “аналогові” та “цифрові” спектри, отримані без шуму та у присутності синусоїдального звукового сигналу з амплітудою 10 В та частотою 1850 Гц, яка викликала значний резонанс у детекторі. Тут видно, що і “цифрові”, і “аналогові” спектри були спотворені, однак між ними існує помітна різниця. Спектр, виміряний “аналоговим” трактом, є абсолютно невпізнаним, а в отриманому за допомогою “цифрового” тракту лишилися присутніми як фотопік на 60 кеВ, так і піки біля 26 та 31 кеВ, хоча вони трохи зміщені й помітно розширені. Крім того, у каналах з низьким номером є кілька паразитних піків, виникнення яких також було зазначено в [5], де використовувалась смугова фільтрація шумів.

Неоптимальність роботи різних алгоритмів для низьких номерів каналів (енергій γ -квантів) пояснюється тим, що іонізаційні імпульси малої амплітуди гірше відокремлюються від високоамплітудних завад. Попри те, що “цифровий” тракт не повністю відфільтрував резонансний шум, він явно продемонстрував свої переваги для фільтрації шумів, що виникають через “мікрофонний” ефект.

На рис. 8 показано залежності енергетичної роздільної здатності газонаповненого детектора для енергії 60 кеВ від звукової частоти генератора. Як видно, на більшості частот роздільна здатність “аналогового” тракту значно гірше, ніж для тракту на основі ПЛІС, який ефективно відфільтровує завади, а його роздільна здатність залишається на рівні 6,5—7,0%, якщо частота не перевищує 1600 Гц. У діапазоні резонансних частот — від 1700 до 1900 Гц — вона погіршується (до 10% при 1850 Гц), але при підвищенні частоти вище 2000 Гц характеристики детектора знову повертаються до номінальних значень. Також було відмічено, що при зменшенні рівня звуку на резонансних частотах спектри, виміряні з ПЛІС, поліпшуються швидше, ніж “аналогові”.

Висновки

Таким чином, запропонований для детекторів іонізуючих випромінювань вимірювальний тракт на основі ПЛІС з використанням простого алгоритму “вікон часу” дозволяє отримувати γ -спектри за наявності акустичного та вібраційного шумів. Запропонована конфігурація ПЛІС досить добре усуває завади (шуми) малої та середньої амплітуди у вихідному сигналі детектора. І хоча за наявності звукових завад великої потужності з резонансними частотами такий метод обробки імпульсів придушує не всі шуми, отримані при цьому спектри залишаються придатними для ідентифікації радіонуклідів, тоді як “аналоговий” вимірювальний тракт за таких умов використовувати для спектрометричних вимірів неможливо.

Розроблений алгоритм цифрової обробки сигналу дозволяє використовувати пропорційні лічильники на транспорті (на борту поїздів, літаків, гвинтокрилів), на будівельній та іншій спеціальній техніці, а також поблизу працюючих турбін, двигунів і т. ін., що може бути корисним для застосування в ядерній енергетиці, геології, зберіганні відпрацьованого палива, контролю над нерозповсюдженням озброєння, наукових застосуваннях тощо.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Власик К.Ф., Грачев В.М., Дмитренко В.В. и др. Гамма-спектрометры на сжатом ксеноне. *Приборы и техника эксперимента*, 1999, № 5, с. 114–122.
2. Bolić M., Drndarević V. Digital gamma-ray spectroscopy based on FPGA technology. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2002, vol. 482, iss. 3, p. 761–766. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(01\)01925-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(01)01925-8)
3. Becker E.M., Farsoni A.T. Wireless, low-cost, FPGA-based miniature gamma ray spectrometer. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2014, vol. 761, p. 99–104. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2014.05.096>
4. Novikov A. S., Ulin S. E., Dmitrenko V. V. et al. New modification of xenon gamma-ray detector with high energy resolution. *Optical Engineering*, 2014, vol. 53, no. 2, 021108. <https://doi.org/10.1117/1.OE.53.2.021108>
5. Dmetrenko V.V., Chemysheva I.V., Gratchev V.M. et al. Vibration stability of high pressure xenon gamma-ray detectors. *1999 IEEE Nuclear Science Symposium. Conference Record. 1999 Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (Cat. No.99CH37019)*, 1999, vol. 2, p. 665–669. <https://doi.org/10.1109/NSSMIC.1999.845756>
6. Seifert A., Milbrath B., Pitts W. K., Smith E. Implementation of a noise mitigation strategy for a high-pressure xenon detector. *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, 2005, p. 1262–1266. <https://doi.org/10.1109/NSSMIC.2005.1596549>
7. Sokolov S., Pudov A., Rybka A. et al. Gas-filled gamma-radiation detector based on high-purity xenon. *East European Journal of Physics*, 2020, no. 4, p. 28–34. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2020-4-04>
8. Manchanda R.K., Ye Z., Sood R.K. Ultra-high-pressure proportional counter. Part I: Argon. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 1990, vol. 292, p. 373–385. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(90\)90394-L](https://doi.org/10.1016/0168-9002(90)90394-L)

Дата надходження рукопису до редакції 21.12 2021 р.

DOI: 10.15222/TKEA2022.1-3.44
UDC 539.1.074.23

A. O. PUDOV, S. A. SOKOLOV, A. S. ABYZOV,
A. V. RYBKA, V. E. KUTNY

Ukraine, Kharkov, National Science Center
"Kharkov Institute of Physics and Technology"
E-mail: pudov@kipt.kharkov.ua

DIGITAL FPGA-BASED PROCESSING OF PULSES OF GAS-FILLED GAMMA-RADIATION DETECTOR FOR ACOUSTIC NOISE SUPPRESSION

Gas-filled proportional detectors of ionizing radiation often contain such elements as thin anode wire, which make them sensitive to external acoustic or vibrational impact. This study investigates such sensitivity for the case of the proportional γ -radiation detectors filled with high-purity xenon gas.

The detector demonstrates a dependence of its signal noise on the external acoustic wave frequency, the character of which most likely depends on the design of the detector, i.e. on such parameters as diameter and tension strength of the anode wire, etc. To suppress the negative impact of acoustic noise on the characteristics of the detector, the detector digital signal is processed in a Field-Programmable Gate Array board.

The authors investigate the algorithm of «time windows», which allows separating (filtering) low-frequency noise in the output signal of a gas-filled detector, which arises due to the influence of external sound, from the useful signal, i.e. the ionization pulses. This approach allows performing spectral measurements of γ -radiation with a significant acoustic noise background, when detectors with a conventional analog spectrometric channel cannot handle the task.

Keywords: gamma-radiation detectors, xenon, proportional counters, FPGA, digital signal processing, noise suppression.

REFERENCES

1. Vlasik K. F., Grachev V. M., Dmitrenko V. V. et al. [Gamma spectrometers on compressed xenon.]. *Instruments and Experimental Techniques*, 1999, no. 5, pp. 114–122. (Rus)
2. Bolić M., Drndarević V. Digital gamma-ray spectroscopy based on FPGA technology. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2002, vol. 482, iss. 3, pp. 761–766. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(01\)01925-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(01)01925-8)
3. Becker E.M., Farsoni A.T. Wireless, low-cost, FPGA-based miniature gamma ray spectrometer. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2014, vol. 761, pp. 99–104. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2014.05.096>
4. Novikov A. S., Ulin S. E., Dmitrenko V. V. et al. New modification of xenon gamma-ray detector with high energy resolution. *Optical Engineering*, 2014, vol. 53, no. 2, 021108. <https://doi.org/10.1117/1.OE.53.2.021108>
5. Dmetrenko V.V. et al. Vibrostability of high pressure xenon gamma-ray detectors. *1999 IEEE Nuclear Science Symposium. Conference Record. 1999 Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (Cat. No.99CH37019)*, 1999, vol. 2, pp. 665–669. <https://doi.org/10.1109/NSSMIC.1999.845756>
6. Seifert A., Milbrath B., Pitts W. K., Smith E. Implementation of a noise mitigation strategy for a high-pressure xenon detector. *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, 2005, pp. 1262–1266. <https://doi.org/10.1109/NSSMIC.2005.1596549>
7. Sokolov S., Pudov A., Rybka A. et al. Gas-filled gamma-radiation detector based on high-purity xenon. *East European Journal of Physics*, 2020, no. 4, pp. 28–34. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2020-4-04>
8. Manchanda R.K., Ye Z., Sood R.K. Ultra-high-pressure proportional counter. Part I: Argon. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 1990, vol. 292, pp. 373–385. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(90\)90394-L](https://doi.org/10.1016/0168-9002(90)90394-L)

Опис статті для цитування:

Пудов О. О., Соколов С. О., Абызов О. С., Рыбка О. В., Кутній В. Є. Цифрова обробка в ПЛІС імпульсів газового детектора гамма-випромінювання для придушення акустичних завад. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2022, № 1–3, с. 44–49. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2022.1-3.44>

Cite the article as:

Pudov A. O., Sokolov S. A., Abyzov A. S., Rybka A. V., Kutny V. E. Digital FPGA-based processing of pulses of gas-filled gamma-radiation detector for acoustic noise suppression. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature*, 2022, no. 1–3, pp. 44–49. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2022.1-3.44>

Д. ф.-м. н. П. В. ГОРСЬКИЙ

Україна, м. Чернівці, Інститут термоелектрики НАН та МОН України,
Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича

E-mail: gena.grim@gmail.com

ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ГЕНЕРАТОРНИХ МОДУЛІВ ЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМИ ДАНИМИ

Обґрунтовується необхідність застосування дифузійно-немонотонного розподілу напрацювання до відмови для опрацювання результатів ресурсних випробувань термоелектричних генераторних модулів з метою визначення їхніх стандартизованих показників надійності та відносних похибок отриманих значень. Пропонується точкові оцінки параметрів закону, а саме середнє напрацювання на відмову та параметр варіації швидкості деградаційних процесів, визначати шляхом згладжування часової залежності імовірності безвідмовної роботи методом найменших квадратів. Це дозволяє досягти істотно меншої похибки визначення стандартизованих показників надійності, ніж у разі використання методу максимальної правдоподібності.

Ключові слова: надійність, термоелектричний модуль, напрацювання до відмови, дифузійно-немонотонний розподіл, метод максимальної правдоподібності, метод найменших квадратів, відносна похибка.

Надійність термоелектричних генераторів, а отже, і генераторних модулів відіграє не меншу роль, ніж їхні споживчі характеристики, оскільки термоелектричні генератори використовуються як джерела живлення у космосі, медицині, військовій справі тощо. Оскільки термоелектричні генераторні модулі не підлягають ремонту або заміні, то зрозуміло, що їхня надійність має істотно перевищувати проєктну надійність тих систем, складовими частинами яких вони є. Це означає, що і споживачам, і виробникам цих модулів необхідно мати у своєму розпорядженні максимально достовірну інформацію про їхню надійність. Водночас у фахових наукових виданнях власне проблемам надійності термоелектричних генераторних модулів приділяється явно недостатньо уваги, на відміну від надійності термоелектричних охолоджувачів [1]. Існує багато праць, присвячених дослідженням залежності інтенсивності відмов термоелектричних охолоджувачів від режимів роботи та від геометрії термоелектричних гілок, а також удосконаленню методів її експериментального визначення. Що ж стосується термоелектричних генераторних модулів, то у літературі увага в основному приділяється не показникам їх надійності, а фізиці відмов і проблемам підвищення надійності модулів. Серед цих проблем — запобігання деградації термоелектричних напівпровідникових матеріалів внаслідок втрати ними летких складових, у тому числі шляхом повного або часткового захисту поверхні термоелектричних гілок [2, 3], підвищення термічної і механічної стійкості контактних структур [4], спеціальний вибір геометрії термоелектричних гілок і способу їх розташування [5], обмежен-

ня їх можливого переміщення шляхом застосування спеціальних каркасів між гілками [6], узгодження між собою параметрів термоелектричного матеріалу, зокрема його міцності, коефіцієнта лінійного розширення, модуля Юнга, коефіцієнта Пуассона та теплопровідності [7]. Необхідність такого узгодження, зокрема, накладає певні обмеження на добротність термоелектричного матеріалу. Наприклад, мала теплопровідність, яка, безумовно, є корисною з точки зору добротності й, отже, споживчих параметрів модуля, різко збільшує градієнт температури, що призводить до зростання механічних напружень у гілках. Але у перелічених працях не йдеться або не завжди йдеться про те, якою саме мірою вказані заходи підвищують надійність, тобто знижують інтенсивність відмов термоелектричних генераторних модулів. Таким чином, доволі часто фізика відмов та їх статистика, яка якраз і є фундаментом теорії надійності у її сучасному розумінні та основою для розрахунку показників надійності, існують ніби відокремлено одна від одної. З іншого боку, розв'язання цієї проблеми для випадку термоелектричних генераторних модулів, на нашу думку, слід починати з пошуку найбільш підходящого для них закону розподілу напрацювання до відмови.

Метою представленого дослідження було знаходження або нового, або з-поміж існуючих такого закону розподілу напрацювання до відмови, який не лише був би придатним для розрахунку стандартизованих показників надійності термоелектричних генераторних модулів та їхніх відносних похибок, але й вказував, хоча б непрямим чином, на можливі шляхи поліпшення цих показників.

Обмеженість традиційних підходів до розрахунку показників надійності

Зазвичай вважається, що процес відмов одностипних інтегральних мікросхем, напівпровідникових приладів та термоелектричних модулів, як охолоджувальних, так і генераторних, певною мірою подібний до розпаду радіоактивних ізотопів, і тому імовірність безвідмовної роботи таких приладів описується експоненціальним законом

$$P(t) = \exp(-\lambda t), \tag{1}$$

де t — час; λ — інтенсивність відмов.

Певна помилковість та обмеженість такого підходу, на наш погляд, полягає ось в чому. Радіоактивні ядра одного і того самого ізотопу є тотожними квантовомеханічно і введення для них певної сталої часу процесу радіоактивного розпаду є обґрунтованим. Прилади ж, навіть одного й того самого типоміналу, не є тотожними ні за початковими значеннями критеріїв придатності, ні за швидкістю відносної деградації внаслідок неминучої нестабільності технологічних процесів їх виготовлення. Автор цього дослідження вважає, що ця неминуча нестабільність значною мірою зумовлюється другим і третім початками термодинаміки, хоча таке твердження і може видатись не беззаперечним. Таким чином, для адекватного опису надійності та розрахунку її показників і, що не менш важливо, відносних похибок їх визначення потрібні такі закони розподілу напрацювання до відмови, які б явно враховували згадану нетотожність. З іншого боку, повністю відмовлятися від концепції сталої інтенсивності відмов теж недоцільно, оскільки вона є зручним, ефективним і наочним інструментом оцінки надійності складних систем, особливо таких, які складаються з різнорідних елементів. Також вона дозволяє аналізувати, наприклад, вплив особливостей конструкції та режимів роботи приладів, зокрема термоелектричних охолоджувачів, на їхню надійність.

Природним узагальненням закону надійності (1) виступає закон Вейбула

$$P(t) = \exp[-(t/\tau)^\delta], \tag{2}$$

де τ , δ — параметри масштабу та форми відповідно.

У вищезгаданому сенсі цей закон вже кращий, оскільки на неоднаковість приладів вказує параметр форми. Справді, коли δ прямує до нескінченності, маємо $P(t) = 1$ для $t < \tau$ та $P(t) = 0$ для $t > \tau$. Таким чином, виходить, що всі прилади відмовляють через один і той самий проміжок часу τ , а до того всі вони працюють безвідмовно. А це якраз і є “ідеальний” випадок з точки зору надійності, особливо якщо згаданий проміжок часу є набагато більшим, ніж гарантований термін служби систем, складовими частинами яких є такі прилади. Таким чином, з “погляду” закону (2), технологія виготовлення складних приладів має бути направлена на досягнення якомога більших значень як τ , так і δ . З іншого боку зрозуміло, що час

τ не може бути безмежно великим, оскільки за таких умов експлуатації приладу його гранична ресурсна стійкість визначається ресурсною стійкістю найменш стійких матеріалів та елементів.

З приводу закону Вейбула слід зробити деяке зауваження. Серед фахівців з теорії надійності побутує думка, що період експлуатації сукупності одностипних приладів можна поділити на частини, аналогічні періодам зародження й вимирання певного покоління людей [8, с. 17]. Так, період відбракування приладів з явними грубими технологічними дефектами, тобто період припрацювання, відповідає “дитячій смертності”, період стабільного функціонування відповідає сталій, досить малій інтенсивності відмов, а період масових відмов — їх інтенсивності, що різко зростає. Зрозуміло, що у рамках такої концепції гарантійний термін служби приладів призначається саме на ділянці малої сталої інтенсивності відмов далеко від моменту настання масових відмов. Правда, на сьогодні ніхто не довів придатність саме такого закону розподілу напрацювання до відмови навіть для інтегральних мікросхем і напівпровідникових приладів, не кажучи вже про термоелектричні прилади. Особливо це стосується наявності ділянки сталої інтенсивності відмов. Аналітичного виразу цього закону також не існує. Єдине, що можна вважати встановленим — це те, що початкова ділянка такого розподілу напрацювання до відмови з прийнятною точністю описується законом Вейбула з малими значеннями параметрів τ та δ . Автор цієї статті не дотримується такого закону розподілу напрацювання до відмови, тому що на практиці внаслідок відсутності відповідного аналітичного виразу такий закон не використовується для розрахунку показників надійності. Тим паче що в “корисному періоді”, початок якого віддалений від кінця періоду припрацювання, а кінець — від початку періоду масових відмов, цей закон зводиться до традиційного і часто використовуваного експоненціального закону розподілу напрацювання до відмови

Можливий закон, що описує деградацію термоелектричних генераторних модулів, і основний висновок з нього

Вважається, що відносна деградація параметрів інтегральних мікросхем та напівпровідникових приладів з часом описується лінійним законом [9, с. 18], тому справедливе співвідношення

$$\Delta V/V_0 = \beta \Delta t, \tag{3}$$

де ΔV , V_0 — абсолютна зміна деякого параметра V та його початкове значення відповідно;

β — швидкість деградації, яка може бути додатною (наприклад, для струму споживання) або від’ємною (наприклад, для вихідної напруги логічної одиниці у звичайній логіці);

Δt — проміжок часу від початку експлуатації (випробувань).

При цьому вважається, що для кожного типоміналу мікросхем або напівпровідникових приладів величина β є сталою. Звідси виходить, що якби ознакою відмови вважалась відносна деградація параметра (параметрів), то всі прилади одного й того самого типоміналу відмовляли б одночасно. Тоді при достатньо малих значеннях β , а для інтегральних схем і напівпровідникових елементів здебільшого воно так і є, то був би вже згаданий ідеальний з точки зору надійності випадок. Але у стандартах та ТУ на ці прилади зазвичай ознакою відмови вказується досягнення параметрами певних абсолютних граничних значень. Це означає, що розподіл напрацювання до відмови визначається розсіюванням початкових параметрів цих приладів, і отже, як правило, внаслідок лінійного закону відносної деградації він вважається нормальним або логарифмічно нормальним. З останнім розподілом працювати простіше, оскільки при зміні напрацювання до відмови від нуля до нескінченності його логарифм пробігає усьо числову вісь, і в цьому випадку на неоднаковість приладів вказує дисперсія логарифма. Стандарт США MIL – STD – 883E. 31 December 1996 Superseding у цьому випадку рекомендує визначати час досягнення 50% відмов, який дорівнює середньому напрацюванню на відмову, і час досягнення 16% (точніше 15,7%) відмов, який і характеризує дисперсію. Показниками надійності у цьому випадку вважаються час досягнення 50% відмов і абсолютне значення логарифма відношення згаданих величин часу. Зрозуміло, що чим більші обидва ці показники, тим надійнішими є прилади. Але результати ресурсних випробувань термоелектричних генераторних модулів, виконані в Інституті термоелектрики НАН та МОН України, свідчать, що відносне зменшення максимальної вихідної потужності цих модулів, яке і береться за критерій відмови, не підпорядковується лінійному закону (3), а значить, для опису їх деградації потрібна інша залежність, що буде являти собою узагальнення закону (3). Справді, переходячи у рівнянні (3) від скінчених приростів до нескінченно малих, отримаємо диференціальне рівняння

$$dV/V = \beta dt, \tag{4}$$

розв'язком якого є звичайна експонента:

$$V = V_0 \exp \beta t. \tag{5}$$

Знак коефіцієнта β залежить від того, збільшується чи зменшується відповідний параметр в процесі деградації.

Такий закон теж є спрощеним, але він допускає природне узагальнення

$$V = V_0 \exp \left[- (t / \tau_d)^{\delta_d} \right]. \tag{6}$$

Таким чином ми знову приходимо до закону Вейбула, в якому τ_d та δ_d — відповідно, стала часу та параметр форми закону деградації вихідної потужності. Знак “мінус” у формулі взято тому, що у ході деградації генерована максимальна потужність термоелектричного модуля, як правило, зменшується. Закон деградації (6) дозволяє спрогнозувати напрацювання до відмови у тому випадку, якщо за час, відведений для ресурсних випробувань, частина приладів не відмовила. З цією метою для кожного такого термоелектричного генераторного модуля спочатку методом найменших квадратів за результатами вимірів генерованої максимальної вихідної потужності знаходяться параметри τ_d та δ_d . Далі за заданою відносною втратою потужності δ_N знаходиться прогнозоване напрацювання до відмови термоелектричного генераторного модуля

$$t_f = \tau_d \left[- \ln (1 - \delta_N) \right]^{1/\delta_d}. \tag{7}$$

Методика ресурсних випробувань термоелектричних генераторних модулів

Вибірка з дев'яти модулів функціонувала протягом 12060 годин за температури гарячої та холодної сторони 50 та 300 °С відповідно в режимі генерації електричної енергії на узгоджене навантаження. Електричну потужність та ККД вимірювали кожні 180 годин. Ознакою відмови вважалась втрата 20% потужності. Протягом усього часу випробувань сталась відмова лише одного модуля після 9720 годин, тому для прогнозування напрацювання до відмови інших модулів довелося, використовуючи теоретичну деградаційну криву залежності (6), згладити часові залежності їхньої вихідної потужності методом найменших квадратів, після чого за формулою (7) спрогнозувати можливе напрацювання до відмови. При цьому для модуля, відмову якого було зафіксовано, прогнозоване напрацювання до відмови склало 9725 годин. Отримані результати прогнозування представлено у таблиці.

З метою підбору закону, який би найкраще описував представлену в таблиці часову залежність імовірності безвідмовної роботи, методом найменших квадратів були випробувані експоненціальний, Вейбула, нормальний, логарифмічно-нормальний, модифі-

Результати ресурсних випробувань вибірки з дев'яти генераторних модулів

Напрацювання, год	9725	10690	11140	11220	11760	12230	16080	22660	66780
Імовірність безвідмовної роботи	8/9	7/9	2/3	5/9	4/9	1/3	2/9	1/9	0

кований медико-демографічний та немонотонно-дифузійний закони. Застосування їх дало такі результати.

Для простого експоненціального закону, який описується формулою (1), було отримане значення $\lambda = 5,547 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$, при цьому сума квадратів відхилень експериментальних точок від теоретичної кривої склала $\Delta = 0,263$.

Для закону Вейбула, який описується формулою (2), значення параметрів склали $\tau = 12050 \text{ год}$, $\delta = 10,12$, при цьому було отримано $\Delta = 0,068$.

Для нормального закону, який описується формулою

$$P(t) = 1 - \frac{\int_0^t \exp\left[-(t-a)^2 / (2\sigma^2)\right]}{\int_0^\infty \exp\left[-(t-a)^2 / (2\sigma^2)\right]} dt, \quad (8)$$

значення параметрів склали $a = 11600 \text{ год}$, $\sigma = 1405 \text{ год}$, при цьому було отримано $\Delta = 0,067$.

Для логарифмічно нормального закону, який описується формулою

$$P(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\ln t} \exp\left[-\frac{(y-a)^2}{2\sigma^2}\right] dy, \quad (9)$$

значення параметрів склали $a = 9,362$, $\sigma = 0,143$, при цьому було отримано $\Delta = 0,065$.

Для модифікованого медико-демографічного закону, який, як вважається до сьогодні, виконується для мікроелектронних виробів з грубими технологічними дефектами, а також поблизу напрацювання до масових відмов і аналітичного виразу якого немає, у цій роботі запропоновано формулу

$$P(t) = \exp\left[-\frac{(t/t_0)^\alpha}{\gamma(1-t/t_0)^\beta}\right], \quad (10)$$

і значення його параметрів склали $\alpha = 6,973$; $\beta = 0,284$; $\gamma = 8,041 \cdot 10^{-6}$; $t_0 = 66780 \text{ год}$, при цьому було отримано $\Delta = 0,082$. В інтервалі часу $t \ll t_0$ справедливим є закон Вейбула, причому значення параметра форми α є істотно більшим за одиницю, що вказує на відсутність у дослідженій вибірці термоелектричних генераторних модулів з грубими технологічними дефектами, які б відмовляли протягом короткого часу. Величина t_0 у цьому випадку характеризує граничний ресурс модулів. Вона не видається значною, але, на жаль, можливостей проведення випробувань протягом більшого часу немає.

Для немонотонно-дифузійного закону, розробленого співробітниками Інституту проблем математичних машин НАН України і стандартизованого 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 якого за даними ресурсних випробувань деталізовано у національному стандарті України «Надійність техніки. Оцінювання та прогнозування надійності за результатами випробувань і (або) експлуатації в умовах малої статистики відмов» і який описується формулою

$$P(t) = \Phi_0\left(\frac{1-t/\mu}{v\sqrt{t/\mu}}\right) - \exp\left[-\frac{2}{v^2}\right] \cdot \Phi_0\left(\frac{-1-t/\mu}{v\sqrt{t/\mu}}\right), \quad (11)$$

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, значення параметрів склали $\mu = 11770 \text{ год}$, $v = 0,146$, при цьому було отримано $\Delta = 0,066$. Важливою особливістю цього закону є та обставина, що параметр v явним чином характеризує розсіювання значень швидкості відносної деградації параметрів термоелектричних генераторних модулів. Якщо у формулу (11) підставити $v = 0$, то графік імовірності безвідмовної роботи виродиться у ідеальний прямокутник довжиною μ й висотою 1, тобто ми матимемо “ідеальний” випадок з точки зору надійності, якщо за ознаку відмови візьмемо, наприклад, відносну зміну вихідної потужності термоелектричного генераторного модуля. А за основу побудови таблиці якраз і бралось 20% зниження вихідної потужності. З такої точки зору параметр v може слугувати показником відтворюваності, а отже, і якості технологічного процесу виготовлення термоелектричних генераторних модулів.

Бачимо, що сума квадратів відхилень експериментальних точок від теоретичної кривої для немонотонно-дифузійного закону є істотно меншою, ніж для експоненціального закону та модифікованого медико-демографічного закону і близькою до суми квадратів відхилень для законів Вейбула, нормального та логарифмічно нормального. З такої точки зору формально найкращим є логарифмічно нормальний закон, але зі змістовної точки зору він є справедливим за відсутності розсіювання значень швидкості відносної деградації параметрів. Немонотонно-дифузійний закон з незначно більшою сумою квадратів відхилень є більш змістовно обґрунтованим, оскільки явним чином враховує розсіювання значень швидкості відносної деградації параметрів термоелектричних генераторних модулів.

Далі, використовуючи значення μ та v і формули, наведені у проєкті національного стандарту України «Надійність техніки. Оцінювання та прогнозування надійності за результатами випробувань і (або) експлуатації в умовах малої статистики відмов», можна визначити стандартизовані ресурсні показники надійності та відносні похибки їх визначення. Тоді виходить, що середнє напрацювання на відмову для випробуваної вибірки термоелектричних генераторних модулів складає $T_f = 11770 \text{ год}$ з відносною похибкою 11,9%, а 95% ресурсу складає $T_f = 9170 \text{ год}$ з відносною похибкою 26,5%. Похибки визначались

за довірчої імовірності 0,99. Еквівалентна інтенсивність відмов, як величина, обернена часу, протягом якого кількість придатних модулів зменшується у 2,72 раза, складає $\lambda = 8,172 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$ з похибкою 10,5% за тієї ж довірчої імовірності. На перший погляд, така еквівалентна інтенсивність відмов видається досить значною, але тут слід мати на увазі, що випробувані термоелектричні генераторні модулі побудовано за найменш надійною схемою — це послідовно сполучені 127 термоелементів. А звідси випливає, що еквівалентна інтенсивність відмов одного термоелемента у режимі генерування електричної енергії складає $\lambda_{te} = 6,435 \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1}$, а це приблизно у 3,1 рази менше мінімального значення, наведеного у [10, с. 276], яке дорівнює $2 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$.

Графік імовірності безвідмовної роботи термоелектричних генераторних модулів, побудований за результатами ресурсних випробувань, зображено на **рис. 1**.

Зауважимо, що у національному стандарті України «Надійність техніки. Оцінювання та прогнозування надійності за результатами випробувань і (або) експлуатації в умовах малої статистики відмов» оцінки найбільш правдоподібних значень параметрів немонотонного дифузійного розподілу рекомендується робити не методом найменших квадратів, а безпосередньо, використовуючи співвідношення

$$\mu = N^{-1} \sum_{i=1}^N t_i; \quad (12)$$

$$G = N \left(\sum_{i=1}^N t_i^{-1} \right)^{-1}; \quad (13)$$

$$v = \sqrt{\mu / G - 1}. \quad (14)$$

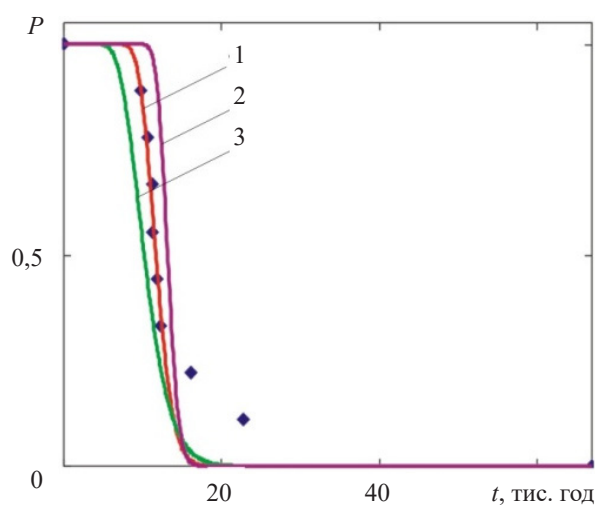


Рис. 1. Часові залежності імовірності безвідмовної роботи: 1 — “найбільш правдоподібна”; 2, 3 — граничні з урахуванням похибок за довірчої імовірності 0,99; точки — експериментальні дані, наведені в таблиці

Відповідно до цих формул параметри дифузійно-немонотонного розподілу складають $\mu = 13190 \text{ год}$, $v = 0,404$. Але у цьому випадку внаслідок істотного зростання коефіцієнта варіації швидкості деградаційних процесів зростає і відносна похибка визначення стандартизованих показників надійності та еквівалентної інтенсивності відмов. Так, за цього коефіцієнта варіації швидкості деградаційних процесів навіть за довірчої імовірності 0,95 відносна похибка визначення 95% ресурсу складе 66%, тоді як стандартом допускається максимальна відносна похибка 40%, причому виключно за узгодженням з замовником випробувань. Причиною цього є істотне відхилення найбільш правдоподібної кривої імовірності безвідмовної роботи від експериментальних даних, що ілюструється **рис. 2**.

Таким чином, виходить, що отримані за “методом максимальної правдоподібності” оцінки параметрів дифузійно-немонотонного розподілу можуть слугувати лише початковим наближенням для якогось з більш точних методів оцінки цих параметрів, зокрема методу найменших квадратів з мінімізацією середньоквадратичного відхилення теоретичної кривої від експериментальних даних ресурсних випробувань, наприклад, методом Ньютона. Саме таким чином і побудовано розроблену нами комп’ютерну програму визначення стандартизованих показників надійності та еквівалентної інтенсивності відмов термоелектричних генераторних модулів включно з відносними похибками отриманих значень цих показників за заздалегідь визначеної довірчої імовірності.

Наостанок варто зробити декілька зауважень змістовного характеру. Коефіцієнт v варіації швидкості деградаційних процесів, взагалі кажучи, відбиває два аспекти: стабільність й, отже, відтворюваність техно-

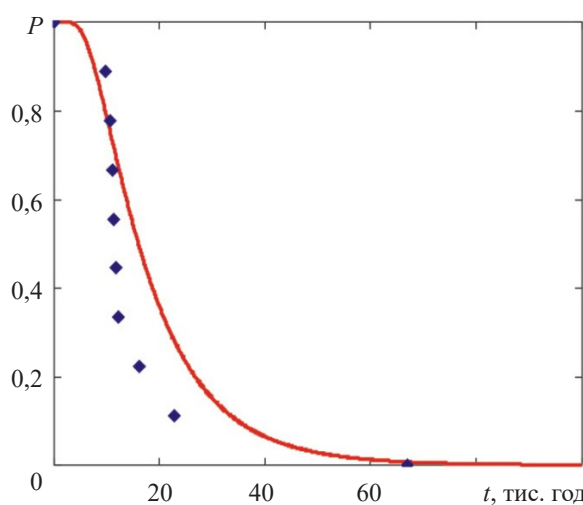


Рис. 2. “Найбільш правдоподібна” крива імовірності безвідмовної роботи (точки — експериментальні дані, наведені в таблиці)

логічного процесу виготовлення термоелектричних генераторних модулів і точність контролю параметрів та визначення напрацювання до відмови у процесі випробувань. Цей коефіцієнт тісно пов'язаний з фізичними процесами, які призводять до поступового або раптового (катастрофічного) зменшення генерованої вихідної потужності, та ККД. Для пов'язування статистики відмов з їхньою фізикою необхідно спочатку побудувати фізичні моделі деградації параметрів модулів, математично їх описати та знайти закони відносної деградації цих параметрів. Але навіть вирішення цієї доволі складної проблеми ще не розв'язує повністю завдання знаходження стандартизованих показників надійності, бо у ці моделі, які, вочевидь, за своєю суттю є детерміністськими, треба фізично обгрунтованим чином ввести "фактор випадковості", через який власне і виникає саме питання про надійність і статистику відмов.

Висновки

Дослідження показали, що з-поміж таких законів, як експоненціальний, Вейбула, нормальний, логарифмічно-нормальний, модифікований медикодемографічний та немонотонно-дифузійний, розподіл напрацювання до відмови термоелектричних генераторних модулів через значне розсіювання значень швидкості відносної деградації їхніх параметрів найкраще описується немонотонно-дифузійним. Його параметрами є середнє напрацювання на відмову та коефіцієнт варіації швидкості деградаційних процесів. При цьому слід зауважити, що хоча суто експоненціальний закон часової зміни відносної кількості придатних виробів для термоелектричних генераторних модулів виконується погано, все ж таки не слід відмовлятися від інтенсивності відмов як інструменту оцінки надійності складних систем, які містять такі модулі, а також термоелектричних генераторних модулів з різними схемами сполучення термоелементів. Цю інтенсивність слід визначати на основі істинного закону розподілу напрацювання до відмови як величину, обернену часу від початку випробувань (експлуатації), протягом якого кількість придатних виробів зменшується у 2,72 раза.

Напрямок подальших досліджень може бути побудова фізичних моделей деградації параметрів термоелектричних генераторних модулів і їх математичний опис з обгрунтованим долученням фактору випадковості.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Зайков В.П., Мешеряков В.І., Журавльов Ю.І. Вплив середньої об'ємної температури гілок термоелемента на основні параметри, показники надійності та динаміку функціонування термоелектричного теплового насоса. *Термоелектрика*, 2018, № 2, с. 31–46.
2. Гришин В.И., Котлов Д.В. *Способ изготовления полупроводниковых ветвей для термоэлектрического модуля и термоэлектрический модуль*. Публикация ВО/2015/126272
3. Salvo M., Smeacetto F., D'Isanto F. et al. Glass-ceramic oxidation protection of higher manganese silicide thermoelectrics. *Journal of European Ceramic Society*, 2019, vol. 39, pp. 66–71. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.01.007>
4. 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>
5. 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>
6. 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.
7. 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>
8. Левин Б.Р. *Элементы теории надежности. Учебное пособие*. Москва, редакционно-издательский отдел ВЗЭИС, 1969, 144 с.
9. Львович Я.Е. *Теоретические основы конструирования, технологии и надежности РЭА*. Москва, Радио и связь, 1986, 192 с.
10. Котырло Г.К. *Расчет и конструирование термоэлектрических генераторов и тепловых насосов. Справочник*. Киев, Наукова думка, 1980, 328 с.

Дата надходження рукопису
до редакції 25.04 2022 р.

PARTICULAR ASPECTS OF DETERMINING RELIABILITY INDICATORS
OF THERMOELECTRIC GENERATOR MODULES USING EXPERIMENTAL DATA

Resource tests allowed finding that the relative degradation of output power and efficiency of thermoelectric generator modules is not subject to linear law. This means that the distribution law for the failure time of such modules does not «copy» the distribution of their initial parameters, i.e. is neither normal nor logarithmically normal. Therefore, the aim of this paper is to find or select from among the existing such a failure time distribution law, which would clearly take into account the scattering of the rates of relative degradation of the parameters of thermoelectric generator modules.

The paper substantiates the need to use diffusion-nonmonotonic failure time distribution for processing the results of resource tests of thermoelectric generator modules in order to determine their standardized reliability indicators and relative errors of the obtained values. It is proposed to determine the point estimates of the parameters of the law, namely the average failure time and the parameter of variation of the rate of degradation processes not by formulas obtained by the method of maximum likelihood, but by smoothing the probability of failure-free operation obtained by tests. The least squares method and Newton's method are used. Estimates obtained by the method of maximum likelihood serve as an initial approximation for Newton's method. This allows achieving significantly less error in determining standardized reliability indicators than when using the method of maximum likelihood.

Keywords: reliability, thermoelectric module, failure time, diffusion-nonmonotonic distribution, maximum likelihood method, least squares method, relative error.

REFERENCES

1. Zaykov V.P., Mescheryakov V.I., Zhuravlov Yu. I. Effect of the volumetric average temperature of thermoelement leg on the basic parameters, reliability indicators and dynamics of thermoelectric heat pump operation. *Journal of Thermoelectricity*, 2018, no. 2, pp. 31–45.
2. Grishin V.I., Kotlov D.V. *Method for manufacturing semiconductive branches for a thermoelectric module, and thermoelectric module*. Publication of US20170012195A1
3. Salvo M., Smeacetto F., D'Isanto F. et al. Glass-ceramic oxidation protection of higher manganese silicide thermoelectrics. *Journal of European Ceramic Society*, 2019, vol. 39, pp. 66–71. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.01.007>
4. 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>
5. 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>
6. 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.
7. 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>
8. Levin B.R. *Elementy teorii nadezhnosti. Uchebnoye posobiye [Elements of the theory of reliability. Tutorial]*. Moscow, VZEIS, 1969, 144 p. (Rus)
9. Lvovich Ya.Ye. *Teoreticheskiye osnovy konstruirovaniya, tekhnologiya i nadezhnosti REA [Theoretical foundations of design, technology and reliability of electronic equipment]*. Moscow, Radio and communication, 1986, 192 p. (Rus)
10. Kotyrlo G.K. *Raschet i konstruirovaniye termoelektricheskikh generatorov i teplovykh nasosov. Spravochnik [Calculation and design of thermoelectric generators and heat pumps. Handbook]*. Kyiv, Naukova Dumka, 1980, 328 p. (Rus)

Опис статті для цитування:

Горський П. В. Особливості визначення показників надійності термоелектричних генераторних модулів за експериментальними даними. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*, 2022, № 1–3, с. 50–56. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2022.1-3.50>

Cite the article as:

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/ТКЕА2022.1-3.50>

ПОКАЖЧИК СТАТЕЙ, ОПУБЛІКОВАНИХ У ЖУРНАЛІ У 2021 РОЦІ

Електронні засоби: дослідження, розробки

Фотоприймальний пристрій, стійкий до фонові засвітки, з розширеним динамічним діапазоном вхідних сигналів. *Ліпка В. М., Рюхтін В. В., Добровольський Ю. Г.* 3–4

Пристрій для дослідження температурної сталості характеристик перетворювачів напруги в частоту. *Завадський В. А., Харченко Р. Ю., Дранчук С. М., Цацко В. І.* 3–4

Нові компоненти для електронної апаратури

Суперконденсаторні енергонакопичувачі для освітлювальних систем з комбінованим електроживленням. *Пекур Д. В., Коломзаров Ю. В., Костильов В. П., Сорокін В. М., Корнага В. І., Коркішко Р. М., Ніколаєнко Ю. Є.* 1–2

НВЧ-техніка

Синхронізація генераторів на ЛПД імпульсної та безперервної дії у мм-діапазоні довжини хвиль. Частина 1. Конструкції генераторів і узагальнена модель їх синхронізації зовнішнім сигналом. *Карушкін М. Ф.* 1–2

Синхронізація генераторів на лпд імпульсної та безперервної дії у мм-діапазоні довжини хвиль. Частина 2. Стабілізація НВЧ-параметрів синхронізованих генераторів. *Карушкін М. Ф.* 3–4

Методи вимірювання та математична модель основних характеристик хвилеводно-коаксіальних з'єднувачів. *Глушеченко Е. М.* 5–6

Контроль працездатності НВЧ-каналів приймання телеметричної інформації за непрямыми параметрами. *Чміль В. В.* 5–6

Системи передавання та обробки сигналів

Адаптивний алгоритм зниження рівня імпульсного шуму на зображеннях з камер відеоспостереження. *Садченко А. В., Кушніренко О. А., Троянський А. В., Савчук Ю. А.* 1–2

Модулятор для здійснення амплітудної модуляції багатьох складових. *Горбатий І. В., Карп Ю. С., Цимбалюк І. Р.* 3–4

Мікропроцесорні пристрої та системи

Порівняння точності позиціювання методом трилатерації та методом на базі генетичного алгоритму. *Ямненко Ю. С., Осокін В. О.* 5–6

Сенсоелектроніка

Датчики тиску на основі ниткоподібних кристалів кремнію для зниження шумових параметрів автоглушників. *Дружинін А. О., Кутраков О. П., Зінько Р. О.* 1–2

Квазісинхронна термокомпенсація в іонометрії із застосуванням ІСПТ. Частина 1. Теорія та моделювання. *Павлюченко О. С., Кукла О. Л.* 3–4

Квазісинхронна термокомпенсація в іонометрії із застосуванням ІСПТ. Частина 2: Практична реалізація. *Павлюченко О. С., Кукла О. Л.* 5–6

Новий підхід до підвищення чутливості газового сенсора на основі плівок нанокристалічного карбїду кремнію. *Семенов О. В., Любов Д. В.* (англійською мовою)

5–6

Забезпечення теплових режимів

Застосування шару на основі матеріалів з фазовим переходом «метал — напівпровідник» для електротеплового захисту сонячних елементів. *Тонкошкур О. С., Іванченко О. В.*

3–4

Критичні теплові потоки при кипінні в умовах капілярного транспорту у двофазних системах термостабілізації. *Мельник Р. С., Кравець В. Ю., Ліпницький Л. В.*

5–6

Візуалізація процесів пароутворення у двофазному термосифоні за різної його орієнтації в просторі. *Мельник Р. С., Ліпницький Л. В., Ніколаєнко Ю. Є., Кравець В. Ю., Пекур Д. В.*

5–6

Технологічні процеси та обладнання

Стабілізація зварювального зусилля в процесі ультразвукового монтажу дрітних і стрічкових виводів. *Петухов І. Б.*

1–2

Оцінка складності складання вузлів електронної апаратури. *Тининика А. Н.*

1–2

Кремнієвий *p–i–n*-фотодіод із підвищеною імпульсною чутливістю. *Кукурудзяк М. С., Добровольський Ю. Г.*

1–2

Покращення параметрів планарного імпульсного діода при використанні гетерування. *Литвиненко В. М., Баганов Є. О., Вікулін І. М., Горбачов В. Е.*

3–4

Термоміграція довільно орієнтованих рідких лінійних зон Al–Si крізь пластини кремнію (110). *Полухін О. С., Кравчина В. В.*

5–6

Матеріали електроніки

Електричні та фотоелектричні властивості гетеропереходів MoN/p-CdTe та MoN/n-CdTe. *Ковалюк Т. Т., Солован М. М., Мар'янчук П. Д.*

1–2

Метрологія.

Стандартизація

Методи контролю електрохімічних накопичувачів енергії: класифікація та особливості застосування. *Плаксін С. В., Житник М. Я., Левченко Р. Ю., Остаповська С. Я.*

1–2

Оцінка метрологічних характеристик методу спектрального аналізу для визначення морфології еритроцитів. *Сокол Є. І., Колісник К. В., Бернадська Т. В.*

3–4

Бібліографія

Показчик статей, опублікованих у журналі у 2020 році

1–2

INDEX OF ARTICLES PUBLISHED

IN THE JOURNAL IN 2021

**Electronic devices:
research, development**

Photodetector resistant to background light noise with extended dynamic range of input signals. *Lipka V. M., Ryukhtin V. V., Dobrovolsky Yu. G.* 3–4

Device for investigating thermal stability of characteristics of voltage-to-frequency converters. *Zavadsky V. A., Kharchenko R. Yu., Dranchuk S. M., Tsatsko V. I.* 3–4

**New components for electronic
equipment**

Supercapacitor energy storage systems for lighting systems with combined power supply. *Pekur D. V., Kolomzarov Yu. V., Kostilov V. P., Sorokin V. M., Kornaga V. I., Korkishko R. M., Nikolaenko Yu. E.* 1–2

Microwave engineering

Synchronization of pulsed and continuous-wave IMPATT oscillators in the millimeter wavelength range. Part 1. Generator designs and a generalized model of their external signal synchronization. *Karushkin N. F.* 1–2

Synchronization of pulsed and continuous-wave IMPATT oscillators in the millimeter wavelength range. Part 2. Stabilizing microwave parameters of synchronized generators. *Karushkin M. F.* 3–4

Measurement methods and mathematical model of main characteristics of waveguide-coaxial connectors. *Glushechenko E. M.* 5–6

Monitoring the efficiency of microwave channels for receiving telemetry information using indirect parameters. *Chmil V. V.* 5–6

**Signals transfer and processing
systems**

Adaptive algorithm for reducing pulse noise level in images from CCTV cameras. *Sadchenko A. V., Kushnirenko O. A., Troyanskiy A. V., Savchuk Yu. A.* 1–2

Modulator for implementation of amplitude modulation of many components. *Horbatiy I. V., Carp U. S., Tsymbaliuk I. R.* 3–4

**Microprocessor-based devices and
systems**

Comparison of mobile robot positioning techniques. *Yamnenko Yu. S., Osokin V. O.* 5–6

Sensors

Silicon whisker pressure sensors for noise reduction in silencers. *Druzhinin A. A., Kutrakov A. P., Zinko R. V.* 1–2

Quasi-synchronous thermocompensation for ISFET-based ionometric devices. Part 1. Theory and simulation. *Pavluchenko O. S., Kukla O. L.* 3–4

Quasi-synchronous thermocompensation for ISFET-based ionometric devices. Part 2: Implementation. *Pavluchenko A. S., Kukla A. L.* 5–6

A new approach to increasing the sensitivity of a gas sensor based on nanocrystalline silicon carbide films. *Semenov A., Lubov D.* (in English) 5–6

Thermal management

Using a layer based on materials with a metal to semiconductor phase transition for electrothermal protection of solar cells. *Tonkoshkur A. S., Ivanchenko A. V.*

3–4

Critical heat fluxes during boiling under capillary transport conditions in two-phase thermostabilization systems. *Melnyk R. S., Kravets V. Yu., Lipnitsky L. V.*

5–6

Visualization of vaporization events in two-phase thermosyphons operating in different orientations. *Melnyk R. S., Lipnitsky L. V., Nikolaenko Yu. E., Kravets V. Yu., Pekur D. V.*

5–6

Production technology and equipment

Stabilization of bonding force during ultrasonic wire and ribbon bonding. *Petuhov I. B.*

1–2

Assessment of assembly complexity of electronic units. *Tynnyuka A. N.*

1–2

Silicon *p-i-n* photodiode with increased pulse sensitivity. *Kukurudziak M. S., Dobrovolsky Yu. G.*

1–2

Improving parameters of planar pulse diode using gettering. *Litvinenko V. M., Baganov Ye. A., Vikulin I. M., Gorbachev V. E.*

3–4

Thermomigration of non-oriented aluminium-rich liquid zones through (110) silicon wafers. *Polukhin O. S., Kravchina V. V.*

5–6

Materials of electronics

Electrical and photoelectric properties of MoN/p-CdTe and MoN/n-CdTe heterojunctions. *Kovaliuk T. T., Solovan M. N., Maryanchuk P. D.*

1–2

Metrology. Standardization

Evaluation of metrological characteristics of spectral analysis method for determining erythrocyte morphology. *Sokol Ye. I., Kolisnyk K. V., Bernads'ka T. V.*

1–2

Evaluation of metrological characteristics of spectral analysis method for determining erythrocyte morphology. *Sokol Ye. I., Kolisnyk K. V., Bernads'ka T. V.*

3–4

Bibliography

Index of articles published in the journal in 2020

1–2

РЕЦЕНЗЕНТИ НОМЕРА

Єфіменко Анатолій Афанасійович, докт. техн. наук, професор, Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса

Кравець Володимир Юрійович, докт. техн. наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

Круковський Семен Іванович, докт. техн. наук, керівник відділу, НВП «Карат», м. Львів

Павлюченко Олексій Сергійович, наук. співробітник, Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова, м. Київ

Плаксін Сергій Вікторович, докт. фіз.-мат. наук, зав. відділу, Інститут транспортних систем і технологій НАН України («Трансмаг»), м. Дніпро

Садченко Андрій Валерійович, канд. техн. наук, доцент, Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса

Сафронов Павло Сергійович, канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

Підписано до друку 24.06 2022 р. Формат 60×84 1/8. Друк. арк. 7,5. Тираж 100 прим. Зам. № 144/146
Оригінал-макет виготовлено в 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-макету
(65044, м. Одеса, пр-т. Шевченка, 1а)

*Номер готували
Дніпро, Київ, Львів, Одеса,
Харків, Чернівці*



Пишіть
Передплачайте
Читайте