ТЕХНОЛОГІЯ ТА КОНСТРУЮВАННЯ В ЕЛЕКТРОННІЙ АПАРАТУРІ

До статті «Оптимізація конструкції кремнієвих сонячних елементів для роботи в режимі концентрації наземного сонячного випромінювання»



Блок керування електромеханічною системою затінення

-22024

СІЧЕНЬ — ЧЕРВЕНЬ

Зовнішній вигляд та розташування вузлів концентраторної установки

НАУКОВО-ВИРОБНИЧИЙ ЖУРНАЛ «ТЕХНОЛОГІЯ ТА КОНСТРУЮВАННЯ В ЕЛЕКТРОННІЙ АПАРАТУРІ»

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

Виходить один раз в 3 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) D. Eng. D. Morales (Granada, Spain) Д. т. н. А. П. Бондарев (м. Львів, Україна) Д. т. н. І. Ш. Невлюдов (м. Харків, Україна) Prof. I. Vajda (Budapest, Hungary) Dr. Sc. D. Nika (Chisinau, Moldova) Prof. D. Vinnikov (Tallinn, Estonia) Д. т. н. Ю. Є. Ніколаенко (м. Київ, Україна) Prof. I. Galkin (Riga, Latvia) Prof. V. Pires (Setúbal, Portugal) К. т. н. Е. М. Глушеченко (м. Київ, Україна), Д. ф.-м. н. С. В. Плаксін (м. Дніпро, Україна) заст. головного редактора К. т. н. В. М. Прокопець (м. Київ, Україна) Dr. D. Guilbert (Lorraine, France) D. Eng. N. Rodriguez (Granada, Spain) Prof. K. Dhoska (Tirana, Albania) Prof. E. Romero-Cadaval (Badajoz, Spain) Д. ф.-м. н. В. В. Должиков (м. Харків, Україна) К. ф.-м. н. О. В. Рибка (м. Харків, Україна) Д. т. н. А. О. Дружинін (м. Львів, Україна) К. т. н. А. В. Садченко (м. Одеса, Україна) Д. т. н. А. А. Єфіменко (м. Одеса, Україна), К. т. н. П. С. Сафронов (м. Київ, Україна) заст. головного редактора Д. т. н. В. С. Ситніков (м. Одеса, Україна) Д. ф.-м. н. Д. В. Корбутяк (м. Київ, Україна) Д. т. н. С. І. Круковський (м. Львів, Україна) К. т. н. С. А. Степенко (м. Чернігів, Україна) Чл.-кор. НАНУ, д. ф.-м. н. В. С. Лисенко (м. Київ, Д. х. н. В. М. Томашик (м. Київ, Україна) Україна) К. т. н. В. Є. Трофімов (м. Одеса, Україна) Prof. J. Martins (Caparica, Portugal) К. т. н. О. В. Троянський (м. Одеса, Україна)

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

Контактна інформація

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

Редакція

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

ТЕХНОЛОГІЯ ТА КОНСТРУЮВАННЯ В ЕЛЕКТРОННІЙ АПАРАТУРІ

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

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

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

Схвалено до друку Вченою радою Національного університету «Одеська політехніка» (Протокол № 12 від 21.05 2024 р.) Відп. за випуск: О. А. Тихонова

СПІВЗАСНОВНИКИ

Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України; Науково-виробниче підприємство

«Сатурн»; Національний університет «Одеська політехніка»;

Видавництво «Політехперіодика»

Ідентифікатор медіа R30-03458 Рішення Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення № 896 від 21.03.2024 р.



3MICT

Енергетична електроніка

Оптимізація конструкції кремнієвих сонячних елементів для роботи в режимі концентрації наземного сонячного випроміню- вання. Коркішко Р. М., Власюк В. М., Костильов В. П., Черненко В. В., Дверніков Б. Ф.	3
Модифікований активний балансир для застосування в бага- томодульних акумуляторних батареях. <i>Ліпко Д. О., Бондаренко</i> <i>О. Ф.</i>	11
Системи передавання та обробки сигналів	
Синхронне оброблення ортогональних циклічних АФМ-сигналів в умовах невизначеності коефіцієнта посилення приймального тракту. <i>Садченко А. В., Кушніренко О. А., Троянський О. В.</i>	24
Неспотворюючий алгоритм вбудовування цифрового водяно- го знаку у медичні зображення. Садченко А. В., Кушніренко О. А	33
Забезпечення теплових режимів	
Вплив геометричних факторів на теплопередавальні характери- стики двофазних термосифонів. <i>Кравець В. Ю., Шепель Г. С.,</i> <i>Гуров Д. І., Данилович А. О.</i>	43
Теплофізична модель термокатода з індукційним нагріванням. Писаренко Л. Д., Цибульський І. Л	49
Рецензенти номера	55
Покажчик статей, опублікованих у 2023 р	56



TECHNOLOGY AND DESIGN IN ELECTRONIC EQUIPMENT

CONTENTS

Power electronics

Optimization of silicon solar cell design for use under concen- trated solar irradiation. <i>Korkishko R. M., Vlasiuk V. M., Kostylyov V. P., Chernenko V. V., Dvernikov B. F.</i>	3
Modified active balancer for use in multi-module batteries. <i>Lipko D. O., Bondarenko O. F.</i>	11
Signals transfer and processing systems	
Synchronous processing of orthogonal cyclic AFM signals under conditions of reception gain coefficient uncertainty. <i>Sadchenko A. V., Kushnirenko O. A., Troyanskiy O. V.</i>	24
Noise immunity algorithm for embedding a digital watermark in medical images. <i>Sadchenko A. V., Kushnirenko O. A.</i>	33
Thermal management	
Influence of geometric factors on the heat transfer characteristics of two-phase thermosyphons. <i>Kravets V. Yu., Shepel A. S., Hurov D. I., Danylovich A. O.</i>	43
Thermophysical model of a thermonic cathode with induction heating. <i>Pysarenko L. D., Tsybulskyi I. L.</i>	49
Reviewers	55

The journal is included in the category «Б» 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 Odesa Polytechnic National University Academic Council

(Summary Records N 12, 21.05 2024)

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)

Media ID R30-03458 Resolution of the National Service of Ukraine regarding TV and radio supply No. 896 dated 03.21.2024

УДК 621.383.51

DOI: 10.15222/TKEA2024.1-2.03

К. т. н. Р. М. КОРКІШКО, к. ф-м. н. В. М. ВЛАСЮК, д. ф-м. н. В. П. КОСТИЛЬОВ, к. ф-м. н. В. В. ЧЕРНЕНКО, Б. Ф. ДВЕРНІКОВ

Україна, м. Київ, Інститут фізики напівпровідників імені В. Є. Лашкарьова НАН України E-mail: romkin.ua@gmail.com

ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ КРЕМНІЄВИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ РОБОТИ В РЕЖИМІ КОНЦЕНТРАЦІЇ НАЗЕМНОГО СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Представлено результати оптимізації конструкції та удосконалення технології виготовлення кремнієвих сонячних елементів, призначених для роботи в режимі концентрації наземного сонячного випромінювання, а також конструкторсько-технологічні рішення щодо розроблення та виготовлення концентраторної установки на основі лінзи Френеля, призначеної для використання у складі стендової бази Центру випробувань фотоперетворювачів та батарей фотоелектричних Інституту фізики напівпровідників імені В. Є. Лашкарьова НАН України при проведенні фотоелектричних випробувань кремнієвих сонячних елементів в спектральних умовах АМ1.5 за концентрованих потоків наземного сонячного випромінювання із ступенем концентрації від 1Х до 200Х.

Ключові слова: кремнієві сонячні елементи, концентроване сонячне випромінювання, фотоелектричні характеристики, установка.

Значне зменшення запасів сировини для традиційної енергетики спонукає країни світової спільноти, зокрема й Україну, дедалі більше уваги приділяти активному пошуку шляхів альтернативного енергозабезпечення [1-3]. Сонячні електростанції, які працюють за принципом прямого перетворення сонячної енергії в електричну, є надійними, ефективними, компактними джерелами енергії, отриманої альтернативним способом [4, 5]. Підвищення ефективності фотоперетворення сонячних елементів (СЕ) і, як наслідок, зменшення вартості отриманої від них енергії — основний і пріоритетний напрямок розвитку сонячної енергетики [6, 7]. Сонячні електростанції, побудовані з використанням моно- та мультикристалічного кремнію, забезпечують основну частину електроенергії, одержаної фотоелектричним (ФЕ) способом.

Одним з ефективних методів зменшення вартості виробництва одиниці електричної енергії є використання концентраторних систем фотоелектричного перетворення енергії з більш дешевими кремнієвими СЕ малої площі, адже для їх виготовлення потрібно значно менше напівпровідникового матеріалу, вартість якого складає близько 50% вартості готового сонячного модуля [8-11]. В таких системах СЕ працюють при рівнях енергетичної освітленості до $10^5 - 10^6$ Вт/м², що перевищує рівень освітленості земної поверхні в 100-1000 разів (ступінь концентрації 100Х-1000Х), при цьому дорогі СЕ замінюються дешевими концентраторами (наприклад, пластмасовими лінзами Френеля), а це зменшує вартість одиниці отриманої енергії. Для удосконалення конструкції і технології виготовлення кремнієвих СЕ, призначених для використання в концентраторних режимах, дослідження їхніх основних характеристик і визначення параметрів при проведенні випробувань в умовах концентрації сонячного випромінювання необхідне відповідне апаратне забезпечення.

Метою цієї роботи є розроблення рішень з оптимізації конструкції та удосконалення технології виготовлення кремнієвих сонячних елементів, призначених для роботи в режимі концентрації наземного сонячного випромінювання, а також визначення фотоелектричних характеристик кремнієвих СЕ в зазначених умовах за допомогою створеної концентраторної установки на основі лінзи Френеля.

Конструктивно-технологічні особливості установки для визначення фотоелектричних параметрів кремнієвих сонячних елементів

Розроблена та виготовлена концентраторна установка [12] використовується для проведення випробувань кремнієвих СЕ з геометричними розмірами до 25×25 мм при їх освітленні потоками наземного сонячного випромінювання зі ступенем концентрації від 1Х до 200Х (рівень освітленості від 10^3 до $2 \cdot 10^5$ Вт/м²). Структурна схема цієї установки, що складається з металевої основи із закріпленим на ній робочим столиком з контактною системою, активним охолодженням і електромеханічною (**EM**) системою затінення, блоку керування системою затінення, вузла кріплення лінзи, на якому змонтована лінза Френеля, та ручної системи орієнтації у напрямку Сонця, наведена на **рис. 1**, а її зовнішній вигляд та розташування основних вузлів — на **рис. 2**.

Пластмасова лінза Френеля концентрує сонячне випромінювання на експериментальний зразок СЕ. Вузол кріплення лінзи забезпечує надійне кріплен-



Рис. 1. Структурна схема концентраторної установки для визначення ФЕ-параметрів кремнієвих СЕ

ня лінзи на металевій основі установки, а також дозволяє легко її переміщати й, змінюючи відстань між нею і робочим столиком, змінювати ступінь концентрації сонячного випромінювання в робочій зоні установки, направляти оптичну вісь лінзи на Сонце, фіксувати лінзу під певним кутом до поверхні Землі. Орієнтування оптичної осі лінзи на Сонце в процесі випробувань здійснюється за допомогою ручної системи орієнтації.

Робочий столик складається з масивного алюмінієвого радіатора з площею робочої поверхні 400 см², на якому змонтована контактна система для електричного під'єднання до випробовуваних зразків СЕ, він забезпечує їх надійне кріплення і незмінне положення у ході випробувань.

В процесі проведення вимірювань в умовах концентрованого сонячного випромінювання робочий



Рис. 2. Зовнішній вигляд та розташування вузлів концентраторної установки:

 пластмасова лінза Френеля; 2 — металева основа для встановлення концентратора на горизонтальній поверхні;
 вузол кріплення лінзи Френеля до корпусу концентратора;
 система ручної орієнтації в напрямку Сонця; 5 — робочий столик

столик з тилової сторони охолоджується потоком повітря від вентилятора, а на його фронтальній стороні розміщується електромеханічна система, яка забезпечує затінення СЕ між випробуваннями для зменшення його нагрівання в ці проміжки часу. Керування системою затінення здійснюється за допомогою розробленого на основі плати мікроконтролера Arduino Uno блока керування, для якого було створене відповідне програмне забезпечення.

На **рис. 3** наведено зовнішній вигляд робочого столика концентраторної установки із контактною системою, системою активного охолодження та ЕМсистемою затінення, а також зовнішній вигляд блока керування останньою. Розроблена концентраторна установка дає можливість проводити вимірювання світлових вольт-амперних характеристик (**BAX**) і визначати фотоелектричні параметри кремнієвих СЕ:



6 7 8



б)

a)

струм короткого замикання, напругу розімкненого кола, коефіцієнт форми ВАХ, ефективність фотоперетворення. Вимірювання світлових ВАХ і визначення з них фотоелектричних параметрів СЕ при проведенні випробувань здійснюється за допомогою мікропроцесорного вимірювача ФЕ-параметрів «ФОТОН-3», розробленого та виготовленого в нашому Інституті. Зразок СЕ встановлюється на робочому столику, на нього опускаються контакти та піл'єднуються до вхідних клем вимірювача, відкривається захист системи затінення та проводяться вимірювання світлової ВАХ. Час бесперервного освітлення поверхні зразка СЕ концентрованим сонячним випромінюванням в процесі вимірювання світлових ВАХ приладом «ФОТОН-3» не перевищує 3-5 секунд, після чого світловий потік перекривається за допомогою системи затінення.

Розроблена та виготовлена концентраторна установка має такі технічні характеристики:

площа лінзи Френеля — 0,1 м²;

фокусна відстань — не менше 300 мм;

діапазон зміни енергетичної освітленості (AM1.5) поверхні робочого столика 25×25 мм — 10³–2·10⁵ Вт/м² (ступінь концентрації сонячного випромінювання від 1X до 200X);

точність наведення оптичної осі концентратора на Сонце $\pm 10^{\circ}$;

неоднорідність розподілу енергетичної освітленості по поверхні робочого столика 25×25 мм — не більше 10%.

Експериментальні зразки кремнієвих СЕ

В Україні провідне місце серед вітчизняних розробників сучасних кремнієвих СЕ космічного та наземного призначення посідає ІФН НАНУ, а результати досліджень, проведених в напрямку розроблення фізичних і фізико-технологічних основ створення високоефективних кремнієвих СЕ, викладено у [13-16]. Практичним результатом зазначених комплексних досліджень стало створення високоефективних СЕ з комбінованими дифузійно-польовими бар'єрами космічного та наземного призначення з ефективністю фотоперетворення до 20% (AM1.5). Цей тип СЕ базується на використанні комбінованого індуковано-дифузійного способу формування роздільних бар'єрів у кремнієвих багатофазних структурах типу «діелектрик — напівпровідник» (ДН) чи «метал — діелектрик — напівпровідник» (МДН). При цьому дифузійно-польові бар'єри створюються як за допомогою дифузії мілких легувальних домішок, так і цілеспрямованим вбудовуванням заряду значної величини у шар двоокису кремнію, нанесеного на поверхню дифузійного шару (емітера). Відносно невисокий рівень легування емітерної області СЕ дифузійно-польового типу забезпечує істотно нижчий, ніж у звичайних дифузійних СЕ, рівень генераційно-рекомбінаційних втрат в цій області, а існування в емітерній області приповерхневого польового бар'єра, створеного зарядом, вбудованим у нанесений на поверхню емітера діелектрик, дозволяє істотно зменшити швидкість поверхневої рекомбінації на межі поділу ДН та опір приповерхневого шару емітерної області.

На рис. 4 наведено базову конструкцію високоефективного СЕ дифузійно-польового типу, виготовленого на основі кремнієвої пластини р-типу провідності. СЕ на основі матеріалу *п*-типу має аналогічну конструкцію з відмінностями у типі провідності дифузійних фронтальної та тилової областей. СЕ підвищеної ефективності виготовлено на основі пластини кремнію р-типу 6 товщиною 350-380 мкм та питомим опором 9-10 Ом см (питомий опір 2-5 Ом см для СЕ на базі матеріалу *n*-типу), на поверхню якого нанесені діелектричний шар з вбудованим зарядом 3 і просвітлювальний шар 2. Вбудований заряд створює приповерхневий індукований *n*⁺⁺-шар 4. Під'єднання до дифузійного n^+ -шару 5 здійснюється за допомогою фронтального металевого гребінчастого електрода *1* через вікна просвітлювального 2 та діелектричного 3 шарів. Тиловий контакт 8 до базового шару 6 здійснюється через дифузійну антирекомбінаційну p^+ -область 7.

На зонній діаграмі кремнієвого СЕ дифузійнопольового типу, наведеній на **рис. 5**, показано, що завдяки наявності вбудованого заряду в діелектричному шарі з концентрацією N_{S0} на фронтальній поверхні СЕ утворюється приповерхневий збагачений шар, який дозволяє зменшити швидкість поверхне-



Рис. 4. Конструкція кремнієвого СЕ дифузійно-польового типу:

1 — фронтальний металевий гребінчастий електрод (Al); 2 — просвітлювальний шар Si₃N₄ (40–50 нм); 3 — заряджений діелектричний шар SiO₂ (30 нм); 4 — індукований n^{++} -шар; 5 — дифузійний n^{+} -шар; 6 — квазінейтральна базова область *p*-типу (350–380 нм); 7 — дифузійний p^{+} -шар, який створює антирекомбінаційний ізотипний перехід на тиловій поверхні; 8 — тилова металізація (Al)



Рис. 5. Зонна діаграма кремнієвого СЕ комбінованого дифузійно-польового типу:

 W_n, W_{p^+} — товщина індукованого n^{++} - та дифузійного тилового p^+ -шарів відповідно; $(W_{p^+}-W), d$ — товщина квазінейтральної бази і СЕ відповідно; N_{S0} — концентрація вбудованого в діелектричний шар заряду; E_C, E_V — енергія, що відповідає краю зони провідності та валентної зони, відповідно; E_F — рівень Фермі; E_I — рівень хімічного потенціалу у власному напівпровіднику

вої рекомбінації та підвищити електропровідність емітерного шару СЕ.

Як було показано в роботі [17], ключові параметри, які визначають ефективність фотоперетворення кремнієвих СЕ в умовах концентрованого сонячного випромінювання, — це послідовний опір та температура. Основними складовими послідовного опору є опір фронтальної контактної сітки і тилового (як правило, суцільного) контакту; перехідний опір контакту «метал — напівпровідник» на фронтальній і тиловій стороні; опір розтікання фронтального сильно легованого шару (емітера); опір базового напівпровідника.

Опір фронтальної контактної сітки можна зменшити збільшенням її відносної площі (частки від фронтальної поверхні), але при цьому збільшується також затінення освітлюваної поверхні, внаслідок чого пропорційно зменшується струм короткого замикання. Збільшення товщини контактної металізації ефективно зменшує її опір. Для зменшення перехідного опору контакту «метал — напівпровідник» необхідно підібрати метал, який утворює низькоомний контакт з кремнієм, і відповідний режим термічного відпалу для покращення контакту.

Опір розтікання фронтального сильно легованого шару (емітера) залежить від типу домішки, рівня і профілю легування. Зі збільшенням рівня легування та глибини залягання p^+ –n-переходу опір шару зменшується, одночасно зменшується й перехідний опір контакту «метал — напівпровідник». Разом з тим, зі збільшенням рівня легування посилюється рекомбінація Оже в сильно легованому емітері й падає фоточутливість (квантовий вихід) СЕ в короткохвильовій області, що призводить до зменшення струму короткого замикання, напруги розімкненого кола і, відповідно, ефективності фотоперетворення. Опір базового напівпровідника слід обирати з врахуванням результатів аналізу, викладених у [18], де було показано, що оптимальним з точки зору ефективності рівнем легування бази кремнієвого СЕ *n*-типу провідності є $2 \cdot 10^{16}$ см⁻³ (близько 1 Ом·см), тоді як для бази *p*-типу цей рівень суттєво нижчий: 10^{15} см⁻³ (близько 4 Ом·см). Водночас при високих рівнях легування бази довжина дифузії неосновних носіїв заряду в ній може бути недостатньо високою (менше товщини зразка), тому у цьому випадку потрібно надавати перевагу кремнію з меншим рівнем легування, але з високими значеннями довжини дифузії.

При оптимізації маршрутів виготовлення СЕ дифузійно-польового типу для роботи в режимі концентрації сонячного випромінювання також були використані результати досліджень впливу поверхневої рекомбінації на ефективність фотоперетворення кремнієвих СЕ, які представлені у [18-20]. Завдяки використанню комбінованих дифузійно-польових бар'єрів вдалося зменшити швидкість поверхневої рекомбінації й підвищити провідність емітерної області СЕ. Також експериментально було встановлено, що для концентраторних режимів роботи оптимальними є конструктивно-технологічні рішення з геометричними розмірами СЕ не більше 5×5 мм, оскільки у випадку СЕ більшої площі значно посилюється вплив послідовного опору. Разом із тим, при вирішенні завдання створення концентраторного сонячного модуля нами було запропоновано конструктивне рішення набирати необхідну потужність з CE 5×5 мм, з'єднуючи їх паралельно або послідовно. При цьому у разі послідовного з'єднання СЕ вплив послідовного опору зменшується через збільшення вихідної напруги, а не струму. Крім того, для зменшення послідовного опору контактної металізації було оптимізовано топологію фронтальної сітки, а також значно, до 3 мкм, збільшено її товщину та товщину тилового електрола СЕ.

Моделювання процесів фотоелектричного перетворення енергії в кремнієвих сонячних елементах при концентрованому сонячному випромінюванні

Для теоретичного моделювання залежностей основних фотоелектричних параметрів досліджуваних СЕ від ступеню концентрації нами використано так звану дводіодну (двоекспоненційну) модель [21, с. 210]

$$J = J_{L} - J_{01} \left(\exp \frac{q \left(V - JR_{s} \right)}{A_{1} kT} - 1 \right) - J_{02} \left(\exp \frac{q \left(V - JR_{s} \right)}{A_{2} kT} - 1 \right) - \frac{V + JR_{s}}{R_{sh}},$$
(1)

де J_L — густина фотоструму;

J₀₁ — густина дифузійного струму насичення;

 J_{02} — густина рекомбінаційного струму насичення;

q — елементарний електричний заряд;

R_s, *R_{sh}* — послідовний і шунтувальний опори;

*A*₁, *A*₂ — чинники неідеальності *p*–*n*-переходу;

k — постійна Больцмана;

Т — термодинамічна температура;

V — напруга зміщення.

Зазначимо, що при концентрованому випромінюванні $J_L = KJ_{sc}$, де K — ступінь концентрації сонячного випромінювання, J_{sc} — густина струму короткого замикання СЕ при K=1 (1000 Вт/м²).

Залежність величини напруги розімкненого кола V_{oc} від ступеня концентрації K визначалася з виразу (1), якщо покласти в ньому J=0, тобто величина напруги розімкненого кола V_{oc} знаходилася із розв'язку трансцендентного рівняння

$$J_{L} - J_{01} \left(\exp \frac{qV}{A_{1}kT} - 1 \right) - J_{02} \left(\exp \frac{qV}{A_{2}kT} - 1 \right) - \frac{V}{R_{sh}} = 0.$$
(2)

Помноживши (1) на прикладену напругу V, отримуємо потужність P, а з умови максимуму dP/dV=0знаходимо величину напруги в точці відбору максимальної потужності V_m . Підставивши V_m у рівняння (1), отримуємо густину струму в точці відбору максимальної потужності J_m . Це дозволяє розрахувати коефіцієнт форми BAX *FF* та ефективність фотоперетворення η CE одиничної площі при концентрованому сонячному випромінюванні із урахуванням втрат на послідовному опорі:

$$FF = \frac{J_m V_m}{K J_{sc} V_{oc}} \left(1 - \frac{J_m R_s}{V_m} \right); \tag{3}$$

$$\eta = \frac{J_m V_m}{K P_s} \left(1 - \frac{J_m R_s}{V_m} \right), \tag{4}$$

де P_s — густина потужності падаючого сонячного випромінювання (в наземних умовах $P_s = 1000 \text{ Bt/m}^2$).

Визначення фотоелектричних параметрів кремнієвих CE

Для тестування концентраторної установки було проведено дослідження фотоелектричних характеристик кремнієвих СЕ з комбінованими дифузійнопольовими бар'єрами при концентрованому сонячному випромінюванні в умовах натурного Сонця. Ступінь концентрації змінювався від 1Х до 100Х. З виміряних світлових ВАХ визначено їхні фотоелектричні параметри. Для досліджень вибиралися зразки СЕ з комбінованими дифузійно-польовими бар'єрами оптимізованої конструкції, призначені для роботи в умовах концентрованого сонячного випромінювання. Такі СЕ мають структуру $p^{++}-p^+-n-n^+$, вони виготовлені на основі кремнію *n*-типу марки КБЕ-2 з питомим опором 2–3 Ом см, мають мінімізований, близький до 0,035 Ом см², питомий послідовний опір і геометричні розміри 5×5 мм.

Результати експериментальних і теоретичних (з використанням формул (1)–(4)) досліджень залежності фотоелектричних параметрів від ступеня концентрації K сонячного випромінювання наведено на **рис. 6, 7**. Під час проведення експериментальних досліджень зразків кремнієвих СЕ в режимі концентрації наземного сонячного випромінювання фіксувалася їхня робоча температура $T_{\rm exp}$. Отримані значення $T_{\rm exp}$ надалі були використані для перерахунку експериментальних залежностей напруги розімкненого кола V_{oc} та ефективності фотоперетворення η в такі ж залежності при $T=25^{\circ}$ С.

Слід зазначити, що виготовлені за доопрацьованим для умов концентрованого сонячного випромінювання технологічним маршрутом досліджувані зразки СЕ в умовах АМ1.5 характеризувалися дещо меншими значеннями основних фотоенергетичних параметрів: струму короткого замикання, напруги розімкненого кола та ефективності фотоперетворення порівняно зі зразками, виготовленими за технологічним маршрутом до його доопрацювання. Зокрема, було отримано η величиною в межах 15,5-16% (АМ1.5). Таке погіршення викликане певним зменшенням відносної фотоактивної площі та збільшенням рівня легування емітера (збільшення рекомбінаційних втрат внаслідок рекомбінації Оже). Зменшення розмірів СЕ до 5×5 мм також призвело до зменшення напруги розімкненого кола, оскільки збільшився негативний вплив периферії на рекомбінаційні процеси в СЕ.

З представлених даних видно, що у всьому діапазоні зміни рівня освітленості (K=0,6X-100X) зразки кремнієвих СЕ дифузійно-польового типу характеризуються лінійною залежністю $I_{sc}(K)$ (рис. 6, *a*). Залежність $V_{oc}(K)$, наведена на рисунку 6, δ в напівлогарифмічному масштабі, до ступенів концентрації 50X-60X має лінійний характер (тобто V_{oc} від ступеня концентрації залежить логарифмічно), а потім стабілізується і далі починає спадати. Причиною зменшення V_{oc} є вплив нагрівання зразка концентрованим сонячним випромінюванням і, меншою мірою, збільшенням рекомбінаційних втрат внаслідок рекомбінації Оже через домішкові центри з залученням екситонів.

Як можна бачити з рис. 6, 7, СЕ дифузійнопольового типу оптимізованої конструкції на основі кремнію ефективно працюють в діапазоні концентрацій натурного сонячного випромінювання K=1X-100X, при цьому залежність ефективності фотоперетворення (рис. 7, δ) і напруги розімкнено-



го кола (рис. 6, δ) мають вигляд кривої з максимумом при $K \approx 25$ X для $V_{jc}(K)$ і в межах K = 35X – 45X для $\eta(K)$. Спостерігається збільшення V_{oc} до значень 0,750 В, а ефективності фотоперетворення до 17,8% при $K \approx 45$ X. Обмеження величини V_{oc} і подальший її спад пов'язано з впливом нагрівання зразка (рис. 6, δ). Значення ефективності фотоперетворення СЕ при K = 100X складає 17,2%, що перевищує початкові (при K = 1X) — 15,6%.

Висновки

Розроблена та виготовлена концентраторна установка на основі лінзи Френеля, що забезпечує необхідний ступінь концентрації та температурний режим в процесі проведення вимірювань, дозволила провести дослідження фотоелектричних характеристик експериментальних зразків кремнієвих СЕ дифузійно-польового типу оптимізованих для роботи при концентрованих потоках наземного сонячного випромінювання.

Результати вимірювання світлових ВАХ кремнієвих СЕ дифузійно-польового типу при концентрованому сонячному випромінюванні в діапазоні від 1Х до 100Х добре узгоджуються з результатами теоретичного моделювання. Завдяки мінімізації питомого послідовного опору (≈0,035 Ом·см²) зразки таких СЕ мають високі значення експлуатаційних параметрів в діапазоні концентрації натурного сонячного випромінювання K=1X-100X, а максимального підвищення ефективності фотоперетворення на рівні 17,8% вдається досягти при концентрації наземного сонячного випромінювання $K\approx45X$, що на 14,1% перевищує початкову ефективність при K=1X.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Ahmed S., Ali A., D'Angola A. A Review of Renewable Energy Communities: Concepts, Scope, Progress, Challenges, and Recommendations. *Sustainability*, 2024, vol. 16, p. 1749. https://doi. org/10.3390/su16051749

2. Casalicchio V., Manzolini G., Prina M. G., Moser D. From investment optimization to fair benefit distribution in renewable energy community modeling. *Appl. Energy*, 2022, vol. 310, p. 118447. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118447

3. Stančin H., Mikulčić H., Wang X., Duić N. A review on alternative fuels in future energy system. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2020, vol. 128, p. 109927. https://doi.org/10.1016/j. rser.2020.109927

4. Hasan M. M., Hossain S., Mofijur M. et al. Harnessing solar power: a review of photovoltaic innovations, solar thermal systems, and the dawn of energy storage solutions. *Energies*, 2023, vol. 16, p. 6456. https://doi.org/10.3390/en16186456

5. Chang N. L., Ho-Baillie A. W. Y., Vak D. et al. Manufacturing cost and market potential analysis of demonstrated roll-to-roll perovskite photovoltaic cell processes. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 2018, vol. 174, pp. 314–324. https://doi.org/10.1016/j. solmat.2017.08.038

6. Green M. A., Dunlop E. D., Yoshita M. Solar cell efficiency tables (Version 63). *Progress in Photovoltaics Research and Applications*, 2023, 32, p. 3–13. https://doi.org/10.1002/pip.3750

7. Ballif C., Haug F.-J., Boccard M. et al. Status and perspectives of crystalline silicon photovoltaics in research and industry. *Nature Reviews Materials*, 2022, 7, pp. 597–616. https://doi.org/10.1038/s41578-022-00510-4

8. Костильов В. П., Коркішко Р. М., Мелах В. Г. та ін. Кремнісві фотоперетворювачі сонячної енергії з дифузійнопольовими бар'єрами для роботи в концентраторних установках. Збірник наукових праць IX Міжнародної наукової конференції «Функціональна база наноелектроніки», Україна, Харків — Одеса, 2017, с. 124–127.

9. Rodat S., Thonig R. Status of Concentrated Solar Power Plants Installed Worldwide: Past and Present Data. *Clean Technol.*, 2024, vol. 6, pp. 365–378. https://doi.org/10.3390/ cleantechnol6010018

10. Yamada N, Hirai D. Maximization of conversion efficiency based on global normal irradiance using hybrid concentrator photovoltaic architecture. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2016, vol. 24, iss. 6, pp. 846 – 854. https://doi. org/10.1002/pip.2765

11. Han X, Lv Y. Design and dynamic performance of a concentrated photovoltaic system with vapor chambers cooling. *Appl Therm Eng.*, 2022, vol. 201, p. 117824. https://doi.org/10.1016/j. applthermaleng.2021.117824

12. Коркішко Р. М., Костильов В. П., Черненко В. В. та ін. Установка для визначення фотоелектричних параметрів кремнієвих сонячних елементів в умовах концентрованого сонячного випромінювання. *Труди 25-ї МНПК «Сучасні інформаційні та електронні технології»*, Україна, Одеса, 2024, с. 67–69.

13. Sachenko A. V., Kostylyov V. P., Korkishko R. M. et al. Key parameters of textured silicon solar cells 26.6% photoconversion efficiency. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2021, vol. 24, no. 2, pp. 175–184. https://doi. org/10.15407/spqeo24.02.175

14. Sachenko A. V., Kostylyov V. P., Korkishko R. M. et al. Simulation and characterization of planar high-efficiency back contact silicon solar cells. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics* & *Optoelectronics*, 2021, vol. 24, no 3, pp. 319–327. https://doi. org/10.15407/spqc024.03.319 15. Sachenko A. V., Kostylyov V. P., Vlasiuk V. M. et al. Optimization of textured silicon solar cells. 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Canada, Calgary, 2020, pp. 0719–0723. https://doi.org/10.1109/PVSC45281.2020.9300877

16. Sachenko A. V., Kostylyov V. P., Vlasiuk V. M. et al. Characterization and optimization of highly efficient siliconbased textured solar cells: theory and experiment. 2021 IEEE 48th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), USA, FL, Fort Lauderdale, 2021, pp. 544-550. https://doi.org/10.1109/ PVSC43889.2021.9518764

17. Костильов В. П., Коркішко Р. М., Мелах В. Г., Дверніков Б. Ф. Особливості технології виготовлення кремнієвих фотоперетворювачів сонячної енергії з дифузійно-польовими бар'єрами для роботи при концентрованому випромінені. *Тези доповідей МНПК* «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка» (НМІТФ-2016), Україна, Кременчук, 2016, С. 51–52.

18. Sachenko A. V., Kostylyov V. P., Gerasymenko M. V. et al. Analysis of the silicon solar cells efficiency. Type of doping and level optimization. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics* & *Optoelectronics*, 2016, vol. 19, no. 1, pp. 67–74. https://doi. org/10.15407/spqe019.01.067

19. Mackel H., Varner K. On the determination of the emitter saturation current density from lifetime measurements of silicon devices. *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, 2013, vol. 21, no. 5, pp. 850–866. https://doi.org/10.1002/pip.2167

20. Richter A., Benick J., Feldmann F. et al. n-Type Si solar cells with passivating electron contact: Identifying sources for efficiency limitations by wafer thickness and resistivity variation. *Sol. Energy Mater Sol Cells.*, 2017, vol. 173, pp. 96–105. https://doi.org/10.1016/j. solmat.2017.05.042

21. Fahrenbruch A. L., Bube R. H. *Fundamentals of solar cells: Photovoltaic solar energy conversion*. Academic Press, New York, 1983, 559 p.

Дата надходження рукопису до редакції 05.05 2024 р.

DOI: 10.15222/TKEA2024.1-2.03 UDC 621.383.51 R. M. KORKISHKO, V. M. VLASIUK, V. P. KOSTYLYOV, V. V. CHERNENKO, B. F. DVERNIKOV

Ukraine, Kyiv, V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, NAS of Ukraine E-mail: romkin.ua@gmail.com

OPTIMIZATION OF SILICON SOLAR CELL DESIGN FOR USE UNDER CONCENTRATED SOLAR IRRADIATION

The task of reducing the cost of a unit of photoelectric-generated electricity is still relevant today. One of the most effective ways to do that is to use concentrator photovoltaic energy conversion systems with cheaper, small-area silicon solar cells (SC), because they require significantly less semiconductor material to make. In this study, the authors develop solutions to optimize the design and improve the manufacturing technology of silicon SCs of the combined diffusion-field type. Such SCs are used to concentrate solar irradiation. The authors propose design and technological solutions for the development and manufacture of a concentrator unit based on the Fresnel lens, which is designed to measure the photoelectric characteristics of SCs when concentrating solar irradiation. Next, the photoelectric characteristics of the combined diffusion-field type SCs were investigated under concentrated solar irradiation in natural sun conditions. The degree of concentration varied from 1X to 100X. Measuring the light I-V characteristics allowed determining photoelectric parameters of the cells — short-circuit current, open-circuit voltage, fill factor and photoconversion efficiency. The obtained experimental results are in good agreement with the results of theoretical modeling. It is shown that due to the minimization of the specific series resistance, the samples of such SCs have high values of operational parameters in the range of natural solar irradiation concentration K=1X-100X.

Keywords: silicon solar cells, concentrated solar irradiation, photoelectric parameters, equipment.

REFERENCES

1. Ahmed S., Ali A., D'Angola A. A Review of Renewable Energy Communities: Concepts, Scope, Progress, Challenges, and Recommendations. *Sustainability*, 2024, vol. 16, p. 1749. https://doi. org/10.3390/su16051749

2. Casalicchio V., Manzolini G., Prina M. G., Moser D. From investment optimization to fair benefit distribution in renewable energy community modeling. *Appl. Energy*, 2022, vol. 310, p. 118447. https:// doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118447

3. Stančin H., Mikulčić H., Wang X., Duić N. A review on alternative fuels in future energy system. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2020, vol. 128, p. 109927. https://doi.org/10.1016/j. rser.2020.109927

4. Hasan M. M., Hossain S., Mofijur M. et al. Harnessing solar power: a review of photovoltaic innovations, solar thermal systems, and the dawn of energy storage solutions. *Energies*, 2023, vol. 16, p. 6456. https://doi.org/ 10.3390/en16186456

5. Chang N. L., Ho-Baillie A. W. Y., Vak D. et al. Manufacturing cost and market potential analysis of demonstrated roll-to-roll perovskite photovoltaic cell processes. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 2018, vol. 174, pp. 314–324. https://doi.org/10.1016/j.sol-mat.2017.08.038

6. Green M. A., Dunlop E. D., Yoshita M. Solar cell efficiency tables (Version 63). *Progress in Photovoltaics Research and Applications*, 2023, 32, p. 3–13. https://doi.org/10.1002/pip.3750

7. Ballif C., Haug F.-J., Boccard M. et al. Status and perspectives of crystalline silicon photovoltaics in research and industry. *Nature Reviews Materials*, 2022, 7, pp. 597–616. https://doi.org/10.1038/s41578-022-00510-4

8. Kostylyov V. P., Korkishko R. M. Melakh V. G. et al. [Silicon solar cells with diffusion-field barriers for use in concentrator plants]. *Proc. of IX International Scientific Conference «Fundamental Basic of Nanoelectronics» Collection of Scientific Paper*, Ukraine, Kharkiv — Odesa, 2017, pp. 124–127. (Ukr)

9. Rodat S., Thonig R. Status of Concentrated Solar Power Plants Installed Worldwide: Past and Present Data. *Clean Technol.*, 2024, vol. 6, pp. 365–378. https://doi.org/10.3390/ cleantechnol6010018

10. Yamada N., Hirai D. Maximization of conversion efficiency based on global normal irradiance using hybrid concentrator photovoltaic architecture. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2016, vol. 24, iss. 6, pp. 846–854. https://doi. org/10.1002/pip.2765

11. Han X, Lv Y. Design and dynamic performance of a concentrated photovoltaic system with vapor chambers cooling. *Appl Therm Eng.*, 2022, vol. 201, p. 117824. https://doi.org/10.1016/j. applthermaleng.2021.117824 12. Korkishko R.M., Kostylyov V.P., Chernenko V.V. et al. [Equipment for determining of photovoltaic parameters of silicon solar cells under concentrated solar irradiation]. *Proc. of 25th ISPC «Modern information and electronic technologies»*, Ukraine, Odesa, 2024, pp. 67–69. (Ukr).

13. Sachenko A. V., Kostylyov V. P., Korkishko R. M. et al. Key parameters of textured silicon solar cells 26.6% photoconversion efficiency. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2021, vol. 24, no. 2, pp. 175–184. https://doi. org/10.15407/spqe024.02.175

14. Sachenko A. V., Kostylyov V. P., Korkishko R. M. et al. Simulation and characterization of planar high-efficiency back contact silicon solar cells. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics* & *Optoelectronics*, 2021, vol. 24, no 3, pp. 319–327. https://doi. org/10.15407/spqe024.03.319

15. Sachenko A. V., Kostylyov V. P., Vlasiuk V. M. et al. Optimization of textured silicon solar cells. *47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Canada, Calgary, 2020, pp. 0719–0723. https://doi.org/10.1109/PVSC45281.2020.9300877

16. Sachenko A. V., Kostylyov V. P., Vlasiuk V. M. et al. Characterization and optimization of highly efficient silicon-based textured solar cells: theory and experiment. 2021 *IEEE 48th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, USA, FL, Fort Lauderdale, 2021, pp. 544–550. https://doi.org/10.1109/PVSC43889.2021.9518764

17. Kostylyov V. P., Korkishko R. M. Melakh V. G., Dvernikov B.F. [Features of the technology for manufacturing silicon solar cells with diffusion-field barriers for use in concentrated radiation]. *Proc. of International conference «Semiconductor materials, information technology and photovoltaics»*, Ukraine, Kremenchuk, 2016, pp. 51–52. (Ukr).

18. Sachenko A. V., Kostylyov V. P., Gerasymenko M. V. et al. Analysis of the silicon solar cells efficiency. Type of doping and level optimization. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics* & *Optoelectronics*, 2016, vol. 19, no. 1, pp. 67–74. https://doi. org/10.15407/spqe019.01.067

19. Mackel H., Varner K. On the determination of the emitter saturation current density from lifetime measurements of silicon devices. *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, 2013, vol. 21, no. 5, pp. 850–866. https://doi.org/10.1002/pip.2167

20. Richter A., Benick J., Feldmann F. et al. *n*-Type Si solar cells with passivating electron contact: Identifying sources for efficiency limitations by wafer thickness and resistivity variation. *Sol. Energy Mater Sol Cells.*, 2017, vol. 173, pp. 96–105. https://doi.org/10.1016/j. solmat.2017.05.042

21. Fahrenbruch A. L., Bube R. H. *Fundamentals of solar cells: Photovoltaic solar energy conversion.* Academic Press, New York, 1983, 559 p.

Опис статті для цитування:

Cite the article as:

Коркішко Р. М., Власюк В. М., Костильов В. П., Черненко В. В., Дверніков Б. Ф. Оптимізація конструкції кремнієвих сонячних елементів для роботи в режимі концентрації наземного сонячного випромінювання. Технологія та конструювання в електронній апаратурі, 2024, № 1–2, с. 3–10. http://dx.doi. org/10.15222/TKEA2024.1-2.03

Korkishko R. M., Vlasiuk V. M., Kostylyov V. P., Chernenko V. V., Dvernikov B. F. Optimization of silicon solar cell design for use under concentrated solar irradiation. Technology and design in electronic equipment, 2024, no. 1–2, pp. 3–10. http://dx.doi. org/10.15222/TKEA2024.1-2.03

УДК 621.355:621.311.61

DOI: 10.15222/TKEA2024.1-2.11

Д. О. ЛІПКО, к. т. н. О. Ф. БОНДАРЕНКО

Україна, м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського E-mail: bondarenkoaf@gmail.com

МОДИФІКОВАНИЙ АКТИВНИЙ БАЛАНСИР ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ В БАГАТОМОДУЛЬНИХ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЯХ

Запропоновано вдосконалену топологію активного балансира, яка забезпечує додаткове балансування на рівні модулів, а також гнучку зміну способу балансування для його пришвидшення й збільшення надійності. Проведено моделювання швидкості балансування для різних топологій активних балансирів і підтверджено ефективність запропонованої топології.

Ключові слова: електромобіль, комірка, акумуляторна батарея, активне балансування, пасивне балансування, система керування акумуляторною батареєю.

Наразі у світі стрімко збільшується кількість електромобілів, а з ними й кількість акумуляторних батарей на основі літію. Акумуляторні батареї мають обмежений ресурс та з часом потребують заміни, але на сьогодні технологій їх утилізації та перероблення майже немає. З непридатних для використання в електромобілі акумуляторних батарей роблять стаціонарні накопичувачі енергії [1]. Акумуляторні батареї, що не підходять навіть для накопичувачів, зберігають на спеціалізованих складах доти, поки не буде знайдено дешевої та ефективної технології їх перероблення. У світлі цього очевидно, що продовження ресурсу акумуляторних батарей та відтермінування часу їх утилізації є досить актуальною проблемою.

Ресурс акумуляторної батареї характеризується кількістю повних циклів заряду-розряду до втрати певної ємності, але ця кількість може змінюватись як в бік збільшення, так і зменшення залежно від таких факторів як температура, струм заряду-розряду, глибина розряду тощо. На деградацію акумулятора впливають умови та термін його експлуатації. Наприклад, під час експлуатації акумулятора може виникати дисбаланс серед комірок акумулятора, одна з причин його виникнення — нерівномірна температура батареї в процесі її заряджання або розряджання, що спричиняє різний внутрішній опір комірок. Дисбаланс дуже погано впливає на акумуляторну батарею електромобіля через те, що одні комірки постійно є більш зарядженими, інші, навпаки, більш розрядженими, а деякі комірки більше часу працюють в крайніх діапазонах рівня заряду, що призводить до втрати ємності. Через це відбувається обмеження доступної для використання ємності акумулятора, що зменшує запас ходу електромобіля. Вагому роль у збереженні загального ресурсу акумуляторних батарей відіграє система керування акумуляторною батареєю (*battery management system*, скор. BMS) — система, що контролює параметри та балансує батарею і тим самим протидіє дисбалансу [2]. Метою цієї роботи було поліпшення системи ба-

Метою цієї роботи було поліпшення системи балансування акумуляторних батарей, що має позитивно впливати на їхній ресурс та термін експлуатації. Будемо розглядати акумуляторні батареї електромобілів — на сьогодні це найбільш актуальний приклад застосування, а отримані результати можуть бути розповсюджені на багатомодульні акумуляторні батареї іншого призначення.

Особливості будови акумуляторної батареї електромобіля

Акумуляторна батарея електромобіля складається з великої кількості окремих одиничних комірок, увімкнутих послідовно або паралельно. Ці комірки складаються у модулі, а модулі, своєю чергою, в акумуляторну батарею (**рис. 1**), конфігурація якої залежить від того, який тип комірок застосовується. Комірки відрізняються між собою за формфактором і за типом хімічного складу компонентів.





Рис. 2. Типи формфакторів акумуляторів: циліндричний, призматичний, пакет

В електромобілях застосовуються три основні формфактори комірок (**рис. 2**):

 циліндричні: листи компонентів згорнуто у рулон всередині металевого циліндричного корпусу;

 призматичні: складені кілька разів листи розміщуються у корпусі прямокутної форми;

— пакети: комірки формуються з бажаної кількості однакових шарів листів, накладених один на інший, такі акумулятори є найбільш гнучкими.

Ці три формфактори можуть мати різні розміри, що й впливає на можливий об'єм накопиченої енергії.

Окрім розміру, на параметри акумулятора сильно впливає хімічний склад його компонентів. Наразі існує багато типів акумуляторів за видом хімічного складу, однак в сучасних електромобілях застосовуються три основні типи літієвих акумуляторів [3, 4]: NMC (нікель-марганець-кобальт), LFP (літій-залізофосфат) і NCA (нікель-кобальт-алюміній), експлуатаційні характеристики кожного зображені на **рис. 3**.

В акумуляторній батареї електромобіля кількість комірок та модулів відповідає напрузі та ємності, які хоче отримати виробник електромобіля з врахуванням певного простору для батареї всередині електромобіля. Ця кількість залежить від розміру комірок і їхньої енергетичної щільності. У більшості сучасних електромобілів (Tesla, Nissan [6], Renault) напруга тягової акумуляторної батареї лежить в межах 300 – 400 В, іноді напруга батареї складає 800 В, але може перекомутовуватись у 400 В для станцій швидкої зарядки. Батарея може складатися з 96 послідов-

но з'єднаних комірок NCA або NMC або з 112 LFP. Кількість комірок 96 використовується виробниками через те, що це число має багато варіантів парного ділення націло, тобто є багато варіантів конфігурації модулів акумуляторної батареї. Започаткувала цей підхід компанія Tesla у своєму першому серійному електромобілі на NCA-комірках. В батареях на елементах LFP кількість комірок більша через те, що номінальна напруга такої комірки нижча, ніж NCA або NMC. Слід зазначити, що описані варіанти не є стандартом, в електромобілях можна побачити батарею, наприклад, як з 84 послідовно підключених комірок, так і зі 198.

У табл. 1 зведено інформацію щодо характеристик акумуляторних батарей різних серійних електромобілів, складену на основі [7] й доповнену з власних спостережень.

Безпечне використання акумуляторної батареї забезпечує система BMS, завданням якої є вимірювання напруги кожної комірки, сили струму, температури всередині батареї, опору ізоляції, замкненості силових роз'ємів. На основі цих даних BMS розраховує багато параметрів, зокрема рівні заряду та деградації акумуляторної батареї, доступну потужність заряду та розряду, внутрішній опір комірок, та передає їх до інших систем електромобіля через мережу CAN (controller area network). Рівні заряду (state of charge, SoC) та деградації (state of health, SoH) розраховуються за формулами

$$SoC = C_{current} / C_{real};$$
(1)

$$SoH = C_{real} / C_{nom},$$
 (2)

де C_{current} — ємність акумулятора у поточний момент; C_{real} — ємність зарядженого акумулятора з урахуванням деградації;

 $C_{\rm nom}$ — номінальна ємність акумулятора.

BMS захищає акумуляторну батарею від надмірного розрядження та перезарядження, обмежує її використання в умовах низької або високої температури. Будь-яка BMS, призначена для використання в електромобілі, обов'язково має датчик вимірюван-



Таблиця	1
---------	---

V			~		· · ·
ларак	теристики	акумуляторних	оатареи	сериних	електромооілів

	mpun		ijininopinan ounnap	eu ceptunta c			
Електромобіль	Ємність батареї	Конфігурація батареї	Кількість (конфігурація) модулів	Щільність комірок, Вт·год/кг	Форм- фактор	Тип хімії	Виробник
	24	96s2p	48 (2s2p)	110			
Nissan Leaf	40	96s2p	24 (4s2p)	130	Пакет	NMC	Envision AFSC
	62	96s3p	24 (4s2p)	150			
	40	96s2p	12 (8s2p)	145			
Renault Zoe	52	96s2p	12 (8s2p)	168			
Hyundai Kona Electric	64	98s3p	8(10s3p), 2(9s3p)	149			
Hyundai IONIQ Electric	28	96s2p	6(10s2p), 6(6s2p)	112	Пакет	NMC	LG Chem
Audi e-tron 55	95	108s4p	36(3s4p)	136			
Porsche Taycan Turbo S	93	198s2p	33(6s2p)	148			
Jaguar I-PACE	90	108s4p	36(3s4p)	149			
Tesla Model S	100	96s86p	16 (6s86p)	162			
Tesla Model 3	75	96s46p	2 (25s46p), 2 (23s46p)	168	Циліндр	NCA	Panasonic
Tesla Model X	100	96s86p	16 (6s86p)	162			
	33	96s1p	8(12s1p)	132			
BMW 13	42	96s1p	8(12s1p)	152	Призма	NMC Sa	Samsung
VW e-Golf	36	88s3p	16(4s3p), 11(2s3p)	103	Пакет		SDI
Peugeot e-208	50	108s2p	18(6s2p)	140	Призма	NMC	CATL
Mercedes-Benz EQC	85	96s4p	4 (36s2p), 2 (24s2p)	130	Пакет	NMC	LG Chem aбo SK Innovation

ня опору ізоляції батареї відносно кузова електромобіля, захищаючи тим самим людей від ураження струмом, а також інші електричні компоненти, якщо батарея вийде з ладу. Крім цього, BMS вирівнює напругу на комірках, що дуже важливо, оскільки дисбаланс зменшує діапазон заряду, в якому може працювати батарея, і безпосередньо впливає позитивно як на запас ходу електромобіля, так і на ресурс акумуляторної батареї.

BMS в електротранспорті може складатись з одного модуля або ж мати модульну структуру, де є головний модуль і другорядні, якими він керує (**рис. 4**). Другорядні модулі, вимірюють напругу комірок і надсилають дані до головного модуля (найчасті-

ше — через протокол обміну даними CAN, але також застосовують UART, *universal asynchronous receiver/ transmitter*, або RS485, *recommended standard* 485). Головний модуль обробляє ці дані та відправляє їх до основної мережі CAN електромобіля для використання іншими системами. Також головний модуль керує процесом балансування комірок, даючи команду другорядним модулям під'єднувати шунтувальні резистори до певних комірок. У немодульній BMS всі комірки під'єднуються до одного основного модуля.

Модульна структура BMS має декілька переваг при застосуванні в електромобілі, зокрема дозволяє зменшити довжину балансувальних дротів, що підвищує точність вимірювання напруги комірок та змен-





шує вплив зовнішніх шумів. Також така структура дозволяє виробникам швидко змінювати конфігурацію батареї, варіюючи кількість модулів, від чого залежить кількість підключених комірок. Централізована BMS таких можливостей не надає, оскільки розрахована на певну кількість комірок.

Ємність комірки вимірюється в А·год та визначається як

$$C_{\text{cell}} = \int_{t_{\text{SoC}=0}}^{t_{\text{SoC}=1}} I_{\text{cell}} dt,$$
(3)

де I_{cell} — струм, що протікає через комірку; *t* — час.

Дисбаланс ємності комірок визначається як $\Delta SoC = SoC_{max} - SoC_{min},$ (4)

де SoC_{max}, SoC_{min} — рівні заряду комірок з максимальним та мінімальним зарядом відповідно.

Загальна ємність акумуляторної батареї дорівнює ємності комірки з найменшою ємністю, але з врахуванням дисбалансу загальну ємність акумуляторної батареї можна представити у вигляді

$$C_{\rm bat} = \int_{I_{\rm SoC=0}}^{I_{\rm SoC=1-\Delta SoC}} I_{\rm bat} dt, \qquad (5)$$

де I_{bat} — струм, що протікає через батарею.

В нових акумуляторних батареях основною причиною виникнення дисбалансу є різний внутрішній опір комірок під час роботи батареї, що може бути спричинене різною температурою комірок, а також різною ємністю комірок внаслідок старіння акумулятора або фізичного пошкодження комірки під час виробництва або експлуатації.

Способи балансування акумуляторних батарей

Способи балансування акумуляторної батареї можна поділити на дві основні категорії: пасивне балансування та активне. Основна відмінність між ними полягає у тому, що у разі пасивного балансування енергія більш зарядженої комірки розсіюється в тепло. Активний спосіб передбачає перетікання енергії від більш зарядженої комірки до менш зарядженої. Наразі в електромобілях застосовується тільки пасивний метод.

Пасивний спосіб балансування можна поділити на два види залежно від того, яким чином використовуються шунтувальні резистори — під'єднуються до комірок фіксовано або перемикаються між комірками. У першому випадку комірки розряджаються резисторами, до яких вони під'єднані постійно. Оскільки опір всіх резисторів однаковий, струм від найбільш зарядженої комірки теж найбільший, тому ця комірка розряджається сильніше за інші [8]. Цей метод має багато недоліків, таких як великі втрати енергії, ризик глибокого розрядження комірок батареї через неконтрольованість процесу балансування, а єдиною його перевагою можна вважати лише його низьку вартість. Його можна застосовувати лише для свинцево-кислотних та нікелевих акумуляторів, оскільки для них, на відміну від літієвих, глибокий розряд не є настільки критичним.

Спосіб балансування, коли шунтувальні резистори перемикаються між комірками, зараз застосовується в усіх серійних електромобілях. Він полягає в тому, що резистори під'єднуються до більш заряджених комірок, розряджають їх до рівня інших і після цього від'єднуються. Зазвичай балансування відбувається, коли батарея майже заряджена. Цей спосіб характеризується простотою схемотехніки, модульністю, малою собівартістю. Основний його недолік — низька ефективність, оскільки надлишкова енергія з комірки розсіюється у вигляді теплоти.

При пасивному балансуванні акумуляторної батареї теплова потужність, що виділяється на шунтувальних резисторах, розраховується як

$$P_{\text{bal}_\text{loss}} = V_{\text{bal}} I_{\text{bal}} N_{\text{cell}_\text{bal}},\tag{6}$$

- де $V_{\rm bal}, I_{\rm bal}$ напруга та струм балансування комірки відповідно;
 - N_{cell_bal} кількість комірок, що потребують балансування (чим вона більша, тим більші втрати при балансуванні).

Пасивне балансування є ефективним, коли невелика частина комірок батареї має заряд більший за інші, тоді вони розряджаються до рівня основної час-

тини комірок. Проте у випадку, коли заряд невеликої кількості комірок нижчий, ніж у більшості, необхідно розряджати більшість комірок до рівня комірки з найнижчим зарядом, що, очевидно, є досить довгим та неефективним процесом. Активне балансування немає таких недоліків.

Способи активного балансування можна класифікувати за різними критеріями, оскільки варіантів топологій дуже багато, при цьому стандартизованої класифікації немає, тому багато дослідників намагались зробити свою [9]. В більш давніх публікаціях [10 – 12] можна знайти класифікацію методів активного балансування за типом елемента, через який перетікає енергія: конденсатор, трансформатор, DC– DC-перетворювач. Далі ці три категорії розділяються на підкатегорії за типом під'єднання цих елементів до комірок. На наш погляд, така класифікація не є точною та має помилки. У більш нових дослідженнях [13, 14] класифікація способів активного балансування будується за типом перетікання енергії, що є більш узагальненим та краще відображає недоліки та переваги кожного способу. Проаналізувавши вище вказані джерела, ми розробили власну класифікацію способів балансування акумуляторних батарей за типом перетікання енергії (**рис. 5**).

Розглянемо приклади топологій активних балансирів, які наведено на **рис. 6**.

Топологія в обхід комірки, рис. 6, *a*: певні комірки обходять відповідними перемикачами, щоб запобігти їх надмірному зарядженню або розрядженню. У цьому способі втрата провідності є досить високою, що призводить до низької ефективності та надійності [15].

Топологія від комірки до сусідньої комірки, рис. 6, б: енергія перетікає від більш зарядженої комірки до менш зарядженої сусідньої. Цей вид балансування простий за схемотехнікою, і тільки в ньому допускається використання гальванічно неізольованих перетворювачів. Основний недолік цієї тополо-



Рис. 5. Способи активного балансування акумуляторних батарей за типом перетікання енергії



a — в обхід комірки; *б* — від комірки до сусідньої комірки; *в* — від комірки до комірки через зовнішній накопичувач енергії; *г* — від комірки до модуля й від модуля до комірки

Технологія та конструювання в електронній апаратурі, 2024, № 1–2

гії в тому, що для балансування комірок, які не є сусідніми, енергію необхідно передавати ланцюжком через інші, сусідні, комірки, тим самим зайвий раз їх заряджати або розряджати, що погано впливає на ресурс комірок і на ефективність балансування в цілому. Зі збільшенням кількості комірок швидкість балансування зменшується, а втрати енергії при її передачі збільшуються [16].

Топологія від комірки до комірки через додатковий накопичувач енергії, рис. 6, *в*: кожна комірка батареї може заряджатись або розряджатись через двоспрямований ізольований перетворювач від додаткового накопичувача енергії. Перевага такої топології в тому, що обмін енергією може відбуватись між будь-якими комірками, що збільшує швидкість та ефективність балансування. Також можлива реалізація балансування всього акумуляторного модуля відносно інших модулів завдяки зарядженню або розрядженню всіх комірок модуля до певного рівня від додаткового накопичувача енергії, що неможливо при інших топологіях. Схемотехніка цієї топології більш складна та коштовна порівняно з попередніми [17].

Топологія від комірки до модуля і навпаки, рис. 6, г: комірка може заряджатись через двоспрямований ізольований перетворювач від модуля, в якому вона встановлена, або розряджатися на нього. Метод схожий із попереднім, проте тут немає додаткового накопичувача енергії, через що втрати енергії менші, але й немає можливості балансування акумуляторного модуля відносно інших [18].

Активні балансири на основі перетворювачів і комутаторів

Акумуляторні батареї в електротранспорті та стаціонарних накопичувачах енергії мають велику кількість комірок та модульну архітектуру, через що виникає складність у використанні активних балансирів. При активному балансуванні енергія розподіляється між всіма комірками батареї, тому необхідно забезпечити можливість перетікання енергії від будь-якої комірки до іншої, незалежно від того, де вони розміщені. Це ставить обмеження на модульність акумуляторних батарей, що може бути критичним в акумуляторах певної архітектури.

Розглянемо топології активних балансирів на основі DC–DC-перетворювача та матриці ключів. На **рис.** 7, *а* зображено схему балансира, що має один рівень ключів та двоспрямований ізольований DC–DC-перетворювач. За допомогою ключів певна комірка, яку необхідно збалансувати, під'єднується до DC–DC-перетворювача, під'єднаного до загального акумуляторного блоку. Ця комірка може заряджатися або розряджатися залежно від потреби. Таку топологію можна віднести до категорії «комірка — модуль — комірка». Кількість комутаційних ключів складає 2n (де n — кількість комірок), тобто на кожну комірку модуля необхідно 2 ключі.





На рис. 7, δ зображено схему активного балансира, що складається з двоспрямованого ізольованого DC–DC-перетворювача та має два рівні комутувальних ключів. Час балансування такий самий, як і в попередній топології, але в цьому варіанті для комутації комірки до перетворювача необхідна менша кількість ключів. Недоліком цієї топології можна вважати неможливість комутації до перетворювача одразу декількох сусідніх комірок, що могло б пришвидшити процес балансування. Якщо схема масштабується, кількість комутаційних ключів дорівнює n+4. Це означає, що використання такого балансира має сенс в модулях, що містять більше ніж 4 послідовно під'єднаних комірок, за меншої кількості раціональніше використовувати схему з одним рівнем ключів.

Схема активного балансира на основі DC–DCперетворювача (може бути як одно-, так і двоспрямованим) з двома однорівневими ключами має більше переваг, ніж описані варіанти (**рис. 8**). Основне — це більша швидкість балансування завдяки тому, що перетікання енергії відбувається від комірки до комірки, а також є можливість перетікання енергії від комірки, до модуля і від модуля до комірки, що збільшує варіативність методів комутації. Тобто, залежно від ситуації балансир може застосовувати найкращу комутацію. Наприклад, якщо рівень заряду лише однієї ко-



Рис. 8. Схема активного балансира на основі DC/DCперетворювача з двома однорівневими ключами [21]

мірки відрізняється від інших, то краще під'єднати цю комірку до перетворювача, перетворювач до загальної напруги модуля, а всі інші комірки будуть однаково розряджатися або заряджатися. Кількість ключів в цій схемі дорівнює 4*n*. Недоліком можна вважати більшу кількість комутаційних ключів порівняно з іншими схемами. Проте таку схему можна вважати більш надійною, оскільки у разі виходу з ладу однієї пари ключів, що комутують комірку, може під'єднатися другий комутатор, з іншого боку, й схема залишиться в робочому стані. Подібна схема розглядалась в досліджені [22], але система комутаційних ключів була використана дворівнева, як на рис. 7, б, що позитивно впливає на кількість ключів при роботі балансира з більш ніж чотирма комірками, але робить неможливим під'єднання більше ніж однієї комірки до перетворювача.

Всі описані схеми активних балансирів мають один великий недолік — відсутність модульності через неможливість збалансовувати модулі між собою. Тобто, комірки всередині модуля можуть бути збалансованими, а модулі відрізнятися між собою рівнем заряду. Модульність балансирів досить важлива для акумуляторних батарей з великою кількістю комірок, що використовуються в електромобілях. Тому необхідно знайти розв'язання цієї проблеми.

У будь-якому електромобілі є допоміжна акумуляторна батарея, зазвичай на 12 В, для живлення бортової низьковольтної мережі. Від нього живляться всі електронні блоки електромобіля, також за його допомогою вмикаються контактори, що під'єднують або від'єднують високовольтну тягову батарею до високовольтної системи електромобіля. Після під'єднання високовольтної батареї вмикається DC–DC-перетворювач, що перетворює її постійну напругу у напругу низьковольтної системи та заряджає допоміжний акумулятор.

Оскільки будь-який електромобіль вже має вбудований DC–DC-перетворювач, що заряджає допоміжний акумулятор, цей акумулятор можна використовувати в системі балансування високовольтної акумуляторної батареї. Тому пропонується поліпшена схема активного балансира на основі DC–DCперетворювача з двома однорівневими ключами для електромобіля (**рис. 9**).

Схема на рис. 9, a має додаткову пару ключів, що комутують 12-В акумулятор до DC–DCперетворювача. Це дає можливість не тільки балансувати комірки всередині модуля, а й балансувати модуль відносно інших модулів шляхом перетікання енергії між модулем і 12-В акумулятором. Кількість комутаційних ключів в цій схемі дорівнює 4n+2. DC–DC-перетворювач в балансирі має бути гальванічно ізольованим і може бути як одно-, так і двоспря-



Рис. 9. Поліпшена схема активного балансира на основі DC–DC-перетворювача з двома однорівневими ключами для електромобіля

мованим, при цьому двоспрямований значно збільшує функціонал.

Схема на рис. 9, δ аналогічна попередній, але має додаткову пару ключів, що дозволяє комутувати 12-В акумулятор з двох боків DC–DC-перетворювача. Кількість комутаційних ключів у схемі 4n+4. Це дозволяє підвищити надійність балансира завдяки повністю дубльованій системі ключів, оскільки вихід з ладу одного з комутаторів не впливає на роботу балансира. Така особливість схеми може знайти своє застосування в авіації, де всі системи обов'язково мають дублюватися.

Розглянемо способи балансування батареї балансиром на базі топології, представленої на рис. 9, б. Перевагою такої схеми балансира можна вважати можливість балансування комірки багатьма способами: шляхом перетікання енергії між коміркою та коміркою, між коміркою та модулем, між коміркою та декількома комірками, між коміркою та бортовим акумулятором, між багатьма комірками та бортовим акумулятором, між модулем та бортовим акумулятором (**рис. 10**). Такий широкий набір способів балансування дозволяє збільшити його швидкість завдяки тому, що протягом одного циклу перетікання енергії може одразу заряджатись або розряджатись не одна, а декілька комірок. Перетікання енергії від однієї або декількох комірок до бортового акумулятора не впливає на баланс інших комірок, що також позитивно позначається на швидкості балансування. Очевидно, що через велику варіативність шляхів балансування надалі слід розробити алгоритм автоматичного пошуку найшвидшого шляху балансування.

Зазначимо, що для систем, де необхідна висока надійність, наприклад літальних апаратів, перевагою такої топології, окрім повної дубльованості комутаторів, є можливість замінити основний DC–DC-перетворювач у разі виходу його з ладу, не перериваючи роботу бортової мережі — балансир може перейти в режим перетікання енергії від модуля до бортового акумулятора, тим самим підтри-



Рис. 10. Перетікання енергії в балансирі між комірками (*a*), між коміркою та модулем (*б*), між коміркою та декількома комірками (*в*), між коміркою та бортовим акумулятором (*c*), декількома комірками та бортовим акумулятором (*d*), між модулем та бортовим акумулятором (*e*)

муючи роботу в аварійному режимі. Більшу надійність також забезпечує дублювання — у разі виходу з ладу одного ключа його може замінити ключ, що стоїть навпроти, без втрати функціонала. Недоліком цієї схеми є велика кількість комутаційних ключів, що може бути критичним для застосувань, в яких це суттєво відіб'ється на собівартості.

Моделювання швидкості активного балансування

Моделювання проводилося для семи методів балансування, які використовуються у розглянутій вище топології активного балансира, за початкових умов, наведених у **табл. 2**.

Моделювання відбувалось за умови, що перетворювач працює в режимі постійного струму (*constant current*, скор. СС) та має максимальну потужність 4 Вт, а значить, струм балансування змінювався залежно від вхідної та вихідної напруги. Балансування зупинялось, коли різниця між коміркою з максимальною та мінімальною ємністю досягала 10 мА год.

Отримані результати моделювання представлено у вигляді графіків на **рис. 11** і у **табл. 3**. Із семи методів балансування найбільшу швидкість показав метод від комірки до комірки (рис. 11, a), наступним за швидкістю були методи від модуля до комірки і навпаки (рис. 11, c), від зовнішньої батареї до комірки і навпаки (рис. 11, e), в інших вона була майже втричі меншою.

Отже, за результатами моделювання можна зробити висновок, що для модульного активного балансира за базовий треба брати метод від комірки до комірки. При цьому у випадку виходу з ладу одного з ключів, що робить неможливим використання методу балансування від комірки до комірки, можна застосовувати інші методи балансування — тоді, хоча швидкість балансування буде нижчою, сам процес балансування продовжуватиметься.

Висновки

Судячи зі всього, відмова від неефективного пасивного способу балансування акумуляторів, яке зараз використовується в усіх електромобілях, на користь активного доволі швидко стане необхідністю, адже зі збільшенням ємності нових акумуляторів в електромобілях необхідно збільшувати струм балансування. Проте для активного балансування існує проблема балансування модулів акумуляторної батареї між собою. Існують різні топології активного балансування, і деякі з них можуть розв'язувати проблему модульності шляхом додаткових провідників і перетворювачів, але це ускладнює конструкцію. Перевага розглянутої топології в тому, що вона може повноцінно замінити модульні системи BMS з пасивним балансуванням, що вже встановлені в електромобілях. Надалі є можливість зробити BMS з активним балансуванням за цією топологією, що може повністю повторювати формфактор, спосіб під'єднання, інтерфейс обміну даними вже встановленої в електромобіль BMS та повноцінно її замінити. Така модернізація може значно збільшити тривалість життя акумуляторної батареї наявних електромобілів й тим самим надати виробникам додатковий час на пошук способів перероблення таких акумуляторів. ВМЅ з активним балансуванням на основі пропонованої топології вбачається перспективною для її використан-

Таблиця 2

Кількість	Потужність	Ємність		S	БоС ком	ирки, %	6	
комірок	перетворювача, Вт	комірки, мА·год	1	2	3	4	5	6
6	4	3000	40	50	60	70	80	90

Початкові умови змодельованої системи

Таблиця 3

		Метод балансування					
Параметр	від К до К	від К до М	від М до К	від М до К і навпаки	від К до ЗБ	від ЗБ до К	від ЗБ до К і навпаки
Швидкість балансу- вання v _{бал} , с	465	1489	1531	929	1535	1486	913
Приріст v _{бал} відносно найповільнішого ме- тоду, %	230,1	3,08	0,26	65,2	0	3,29	68,1

Порівняння швидкості балансування методів балансування



ня в електричних літальних апаратах завдяки надійності, простоті конструкції акумуляторної батареї через її модульність, що дозволяє зменшити кількість і довжину дротів.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Leippi A., Fleschutz M., Murphy M. D. A review of ev battery utilization in demand response considering battery degradation in non-residential vehicle-to-grid scenarios, *Energies (Basel)*, 2022, vol. 15, no. 9, 3227. https://doi.org/10.3390/en15093227

2. Lipko D., Manzhelii A., Yamnenko I., Bondarenko O. Possibilities and challenges of partially using a charge-discharge cycle of battery to increase its resource. 2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPI Week). Kharkiv, Ukraine, 2023, pp. 1–5, https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312983

3. Ayuso P., Beltran H., Segarra-Tamarit J., Pérez E. Optimized profitability of LFP and NMC Li-ion batteries in residential PV applications. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2021, vol. 183, pp. 97–115. https://doi.org/10.1016/j.matcom.2020.02.011

4. Nikolian A., Jaguemont J., de Hoog J. et al. Complete celllevel lithium-ion electrical ECM model for different chemistries (NMC, LFP, LTO) and temperatures (-5 °C to 45 °C) – Optimized modelling techniques. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 98, pp. 133–146, 2018. https://doi.org/10.1016/j. ijepes.2017.11.031

5. Miao Y., Hynan P., Von Jouanne A., Yokochi A. Current Liion battery technologies in electric vehicles and opportunities for advancements. *Energies*, 2019, vol. 12, no. 6, 1074. https://doi. org/10.3390/en12061074

6. Rastegarpanah A., Ahmeid M., Marturi N. et al. Towards robotizing the processes of testing lithium-ion batteries. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2021, vol. 235, no. 8, pp. 1309–1325. https://doi.org/10.1177/0959651821998599

7. Pedro L. Comparison of different EV batteries in 2020. *PushEVs.com* [Electronic resource], April 4, 2020, Regime of access: http://surl.li/tqich

8. Kryvosheiev S., Styslo B., Makarov V. et al. Cell equalizer for series-connected lithium batteries. 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), 2018, vol. 732–733, pp. 145–150. https://doi.org/10.1109/IEPS.2018.8559537

9. Caspar M., Eiler T., Hohmann S. Comparison of active battery balancing systems. 2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Coimbra, Portugal, 2014, pp. 1–8. https://doi.org/10.1109/VPPC.2014.7007027

10. Jiang B., Liu Y., Huang X., Prakash R. R. R. A new battery active balancing method with supercapacitor considering regeneration process. *IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Singapore, 2020, pp. 2364–2369, https://doi.org/10.1109/IECON43393.2020.9254839

11. Qi J., Lu D. D.-C. Review of battery cell balancing techniques. 2014 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Perth, WA, Australia, 2014, pp. 1–6, https://doi.org/10.1109/AUPEC.2014.6966514

12. Daowd M., Omar N., Van Den Bossche P., Van Mierlo J. Passive and active battery balancing comparison based on MATLAB simulation. 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Chicago, IL, USA, 2011, pp. 1–7. https://doi.org/10.1109/ VPPC.2011.6043010

13. Ghaeminezhad N., Ouyang Q., Hu X. et al. Active cell equalization topologies analysis for battery packs: A systematic review. *IEEE Trans Power Electron*, 2021, vol. 36, no. 8, pp. 9119–9135. https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3052163

14. Kim C.-H., Kim M.-Y., Park H.-S., Moon G.-W. A modularized two-stage charge equalizer with cell selection switches for series-connected lithium-ion battery string in an HEV. *IEEE Trans Power Electron*, 2012, vol. 27, no. 8, pp. 3764–3774. https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2185248

15. Cao J., Schofield N., Emadi A. Battery balancing methods: A comprehensive review. *2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Harbin, China, 2008, pp. 1–6. https://doi.org/10.1109/ VPPC.2008.4677669

16. Ceylan M., Balikci A. An intermodular active balancing topology for efficient operation of high voltage battery packs in Li-ion based energy storage systems: Switched (flying) DC/DC converter. *Energies (Basel)*, 2023, vol. 16, no. 15. https://doi.org/10.3390/ en16155608

17. Zhang F., Rehman M. M. U., Zane R., Maksimovic D. Hybrid balancing in a modular battery management system for electric-drive vehicles. 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2017, vol. 27, no. 8, pp. 578–583. https://doi.org/10.1109/ ECCE.2017.8095835

18. Ziegler A., Oeser D., Hein T., Ackva A. Development and application of an active balancing system for lithium-ion cells. 2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Hanoi, Vietnam, 2019, pp. 1–6. https://doi.org/10.1109/ VPPC46532.2019.8952317

19. Kim C.-H., Kim Y.-D., Moon G.-W., Park H. Individual cell voltage equalizer using selective two current paths for series connected li-ion battery strings. 2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, San Jose, CA, USA, 2009, pp. 1812–1817. https://doi. org/10.1109/ECCE.2009.5316213

20. Lee S. W., Lee K. M., Choi Y. G., Kang B. Modularized design of active charge equalizer for Li-ion battery pack. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, vol. 65, no. 11, pp. 8697–8706. https:// doi.org/10.1109/TIE.2018.2813997

21. Elvira D. G., Blaví H. V., Moncusí J. M. B. et al. Active battery balancing via a switched DC/DC converter: Description and performance analysis. 2019 16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), Varna, Bulgaria, 2019, pp. 1–6, https://doi.org/10.1109/ELMA.2019.8771697

22. Pham V.-L., Duong V.-T., Choi W. High-efficiency active cell-to-cell balancing circuit for lithium-ion battery modules using LLC resonant converter. *Journal of Power Electronics*, 2020, vol. 20, pp. 1037–1046. https://doi.org/ 10.1007/s43236-020-00088-6

Дата надходження рукопису до редакції 13.05 2024 р.

Опис статті для цитування:

Ліпко Д. О., Бондаренко О. Ф. Модифікований активний балансир для застосування в багатомодульних акумуляторних батареях. Технологія та конструювання в електронній апаратурі, 2024, № 1–2, с. 11–23. http://dx.doi.org/10.15222/ ТКЕА2024.1-2.11

Cite the article as:

Lipko D. O., Bondarenko O. F. Modified active balancer for use in multi-module batteries. Technology and design in electronic equipment, 2024, no. 1–2, pp. 11–23. http://dx.doi.org/10.15222/ TKEA2024.1-2.11 DOI: 10.15222/TKEA2024.1-2.11 UDC 621.355:621.311.61

D. O. LIPKO, O. F. BONDARENKO

Ukraine, Kyiv, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" E-mail: bondarenkoaf@gmail.com

MODIFIED ACTIVE BALANCER FOR USE IN MULTI-MODULE BATTERIES

The study considers the structure of multimodular batteries (on the example of electric vehicle batteries), cell configuration, chemical composition and capacity of the elements that form the cells. The authors compare the battery characteristics of most models of electric cars. Based on the analysis of the topologies of active balancers, it was proposed to additionally classify active balancers by a new classification feature, namely by the way energy flows between cells. The improved topology of the active balancer proposed in this study provides additional balancing at the module level and allows flexible change of the balancing method to speed it up and increase reliability. Modeling of the balancing speed for different active balancer topologies helped to confirm the effectiveness of the proposed topology.

Keywords: electric vehicle, cell, multi-module battery, active balancing, passive balancing, battery management system.

REFERENCES

1. Leippi A., Fleschutz M., Murphy M. D. A review of ev battery utilization in demand response considering battery degradation in non-residential vehicle-to-grid scenarios, *Energies (Basel)*, 2022, vol. 15, no. 9, 3227. https://doi.org/10.3390/en15093227

2. Lipko D., Manzhelii A., Yamnenko I., Bondarenko O. Possibilities and challenges of partially using a charge-discharge cycle of battery to increase its resource. 2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPI Week). Kharkiv, Ukraine, 2023, pp. 1–5, https://doi.org/10.1109/ KhPIWeek61412.2023.10312983

3. Ayuso P., Beltran H., Segarra-Tamarit J., Pérez E. Optimized profitability of LFP and NMC Li-ion batteries in residential PV applications. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2021, vol. 183, pp. 97–115. https://doi.org/10.1016/j.matcom.2020.02.011

4. Nikolian A., Jaguemont J., de Hoog J. et al. Complete cell-level lithium-ion electrical ECM model for different chemistries (NMC, LFP, LTO) and temperatures (-5 °C to 45 °C) – Optimized modelling techniques. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 98, pp. 133–146, 2018. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.11.031

5. Miao Y., Hynan P., Von Jouanne A., Yokochi A. Current Liion battery technologies in electric vehicles and opportunities for advancements. *Energies*, 2019, vol. 12, no. 6, 1074. https://doi.org/10.3390/ en12061074

6. Rastegarpanah A., Ahmeid M., Marturi N. et al. Towards robotizing the processes of testing lithium-ion batteries. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2021, vol. 235, no. 8, pp. 1309–1325. https://doi.org/10.1177/0959651821998599

7. Pedro L. Comparison of different EV batteries in 2020. *PushEVs. com* [Electronic resource], April 4, 2020, Regime of access: http://surl. li/tqich

8. Kryvosheiev S., Styslo B., Makarov V. et al. Cell equalizer for series-connected lithium batteries. 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), 2018, vol. 732–733, pp. 145–150. https://doi.org/10.1109/IEPS.2018.8559537

9. Caspar M., Eiler T., Hohmann S. Comparison of active battery balancing systems. 2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Coimbra, Portugal, 2014, pp. 1–8. https://doi.org/10.1109/ VPPC.2014.7007027

10. Jiang B., Liu Y., Huang X., Prakash R. R. R. A new battery active balancing method with supercapacitor considering regeneration process. *IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Singapore, 2020, pp. 2364–2369, https://doi.org/10.1109/IECON43393.2020.9254839

11. Qi J., Lu D. D.-C. Review of battery cell balancing techniques. 2014 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Perth, WA, Australia, 2014, pp. 1–6, https://doi.org/10.1109/AUPEC.2014.6966514

12. Daowd M., Omar N., Van Den Bossche P., Van Mierlo J. Passive and active battery balancing comparison based on MATLAB simulation. 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Chicago, IL, USA, 2011, pp. 1–7. https://doi.org/10.1109/VPPC.2011.6043010

13. Ghaeminezhad N., Ouyang Q., Hu X. et al. Active cell equalization topologies analysis for battery packs: A systematic review. *IEEE Trans Power Electron*, 2021, vol. 36, no. 8, pp. 9119–9135. https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3052163

14. Kim C.-H., Kim M.-Y., Park H.-S., Moon G.-W. A modularized two-stage charge equalizer with cell selection switches for series-connected lithium-ion battery string in an HEV. *IEEE Trans Power Electron*, 2012, vol. 27, no. 8, pp. 3764–3774. https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2185248

15. Cao J., Schofield N., Emadi A. Battery balancing methods: A comprehensive review. 2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Harbin, China, 2008, pp. 1–6. https://doi.org/10.1109/VPPC.2008.4677669

16. Ceylan M., Balikci A. An intermodular active balancing topology for efficient operation of high voltage battery packs in Li-ion based energy storage systems: Switched (flying) DC/DC converter. *Energies (Basel)*, 2023, vol. 16, no. 15. https://doi.org/10.3390/en16155608

17. Zhang F., Rehman M. M. U., Zane R., Maksimovic D. Hybrid balancing in a modular battery management system for electric-drive vehicles. 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2017, vol. 27, no. 8, pp. 578–583. https://doi.org/10.1109/ECCE.2017.8095835

18. Ziegler A., Oeser D., Hein T., Ackva A. Development and application of an active balancing system for lithium-ion cells. *2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Hanoi, Vietnam, 2019, pp. 1–6. https://doi.org/10.1109/VPPC46532.2019.8952317

19. Kim C.-H., Kim Y.-D., Moon G.-W., Park H. Individual cell voltage equalizer using selective two current paths for series connected li-ion battery strings. 2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, San Jose, CA, USA, 2009, pp. 1812–1817. https://doi. org/10.1109/ECCE.2009.5316213

20. Lee S. W., Lee K. M., Choi Y. G., Kang B. Modularized design of active charge equalizer for Li-ion battery pack. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, vol. 65, no. 11, pp. 8697–8706. https:// doi.org/10.1109/TIE.2018.2813997

21. Elvira D. G., Blaví H. V., Moncusí J. M. B. et al. Active battery balancing via a switched DC/DC converter: Description and performance analysis. 2019 16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), Varna, Bulgaria, 2019, pp. 1–6, https://doi.org/10.1109/ELMA.2019.8771697

22. Pham V.-L., Duong V.-T., Choi W. High-efficiency active cell-to-cell balancing circuit for lithium-ion battery modules using LLC resonant converter. *Journal of Power Electronics*, 2020, vol. 20, pp. 1037–1046. https://doi.org/ 10.1007/s43236-020-00088-6

УДК 681.513

DOI: 10.15222/TKEA2024.1-2.24

К. т. н. А. В. САДЧЕНКО, О. А. КУШНІРЕНКО, к. т. н. О. В. ТРОЯНСЬКИЙ

Україна, Національний університет «Одеська політехніка» E-mail: koa@op.edu.ua

СИНХРОННЕ ОБРОБЛЕННЯ ОРТОГОНАЛЬНИХ ЦИКЛІЧНИХ АФМ-СИГНАЛІВ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ КОЕФІЦІЄНТА ПОСИЛЕННЯ ПРИЙМАЛЬНОГО ТРАКТУ

Запропоновано метод синхронізації модемів, які для передачі інформації використовують систему циклічних амплітудно-фазоманіпульованих (АФМ) сигналів, що кодуються багаторівневими числовими послідовностями з ідеальною періодичною автокореляційною функцією. Метод дозволяє виявляти сигнал синхронізації на основі аналізу фазової структури сигналу на виході фазового детектора та здійснювати швидке автоматичне регулювання посилення приймача в умовах невідомої початкової амплітуди АФМ-сигналу. Для розрізнення ортогональних циклічних сигналів у системі, що містить N сигналів, використовується один узгоджений фільтр, число помножувачів якого дорівнює числу дискретних варіацій амплітуди.

Ключові слова: циклічний АФМ-сигнал, ортогональність, багаторівнева числова послідовність, підсилення приймача, кадрова синхронізація, циклічна згортка, цифровий узгоджений фільтр.

Наявність вимог до ефективного використання радіочастот, які є особливо актуальними для неліцензованих ISM- (industrial, scientific and medical) діапазонів [1-3], призводить до ситуації, коли в загальній смузі частот доводиться одночасно передавати шумоподібні сигнали від багатьох довільно орієнтованих джерел. В цьому випадку виникає необхідність побудови такого ансамблю сигналів, усі сигнали якого максимально різняться між собою [4]. Одним з рішень, яке забезпечує ортогональність в умовах невисокої складності технічної реалізації, є застосування системи ортогональних циклічних сигналів [5, 6], що дозволяє використовувати для їх розрізнення лише один узгоджений фільтр. Якщо в умовах однакової довжини *N* періодичних дискретних сигналів (ПДС) вважати будь-які часові зсуви рівноможливими, мінімізація взаємних завад зведеться до мінімізації подібності кожної з кодових послідовностей з усіма циклічними зсувами інших. Крім цього, традиційно небажаною є й помітна схожість будь-якої кодової послідовності з власними циклічними зсувами на тозицій ($m \neq 0 \mod N$), оскільки це ускладнює виділення ПДС на фоні багатопроменевих завад і збільшує ризик прийняття бічної пелюстки за основну. Таким чином, серед ансамблів заданого обсягу найкращим можна було б вважати той, в якому періодична взаємокореляційна функція (ПВКФ) будь-яких незбіжних послідовностей дорівнює нулю за всіх зсувів *m*, а періодична автокореляційна функція Z(k) (ПАКФ) будь-якої послідовності S(i) не має ненульових бічних пелюсток:

$$Z(k) = \sum_{i=0}^{N-1} S(i)S(k-i) \mod N = \begin{cases} N^2, \ k = 0; \\ 0, \ k \neq 0, \end{cases}$$
(1)
$$k = \overline{0, N-1}.$$

Синтез ПДС з ПАКФ, що задовольняє умові ортогональності (1), розглянуто у [7]. Властивості циклічних амплітудно-фазоманіпульованих (**АФМ**) сигналів визначаються в основному властивостями кодувальних багаторівневих числових послідовностей (**БЧП**), що мають цілочисельні значення елементів. Прикладом БЧП довжиною N=9 з цілочисельними елементами є така: {5, 2, 2, -4, 2, 2, -4, 2, 2}, при цьому ПАКФ буде мати вигляд, як показано на **рис. 1**.



Основними складностями у побудові оптимального приймача є визначення моменту початку чи закінчення блоку періодичних дискретних сигналів довжиною N та швидке коректне регулювання підсилення тракту проходження амплітудної складової сигналу. З огляду на це, метою представленої роботи було удосконалення схеми кадрової, символьної та блокової синхронізації та схеми швидкого регулювання підсилення приймача ортогональних циклічних АФМ-сигналів в умовах невизначеності амплітуди вхідного сигналу.

Метод формування ортогональних циклічних АФМ-сигналів

Аналітичний запис АФМ-сигналу має вигляд

$$S_{A\Phi M}(t) = A_0 \left(1 + m_A u_i(t) \right) \cos\left(\omega_0 t + \varphi_i(t) + \varphi_0\right), \quad (2)$$

- де A₀, ω₀, φ₀ амплітуда, частота та начальна фаза несного коливання відповідно;
 - *m*_A коефіцієнт амплітудної модуляції несного го коливання;

 $u_i(t), i = \overline{1, N}$ — дискретне нормоване повідомлення (амплітудне значення);

 $\phi_i(t), i = \overline{1, N}$ — дискретні значення фази повідомлення, що передається.

Схему формування АФМ-сигналів можна спростити, використовуючи властивість циклічності породжуючих БЧП. Для визначеності припустимо, що спеціалізований цифровий узгоджений фільтр (ЦУФ) має імпульсну характеристику $H_0 = \{h(i)\}, i = \overline{0, N-1},$ а прийнятий сигнал будується відповідно до послідовності $G_0 = \{g(i)\} = \{h(N-i-1)\}, i = \overline{0, N-1}$.

Пропонується такий метод формування ортогональних циклічних АФМ-сигналів. Кожному рівню квантування $L = \overline{0, N-1}$, де N=2k, або кожному пакету з числа N різних блоків двійкових інформаційних символів розміром k ставиться в однозначну відповідність номер циклічного зсуву БЧП: $G_0^{\tau}=D^{\tau}G_0$, де $\tau=L$ (через D^{τ} позначено оператор циклічного зсуву вліво на τ елементів подібно до [7]). На **рис. 2** наведено узагальнену схему формування циклічних АФМ-сигналів.

Позначимо амплітуду, фазу та запізнювання відносно початку координат *n*-го імпульсу, відповідно, через $U_n, \Theta_n, t_n = (n-1)\tau_0$, тривалість сигналу $T_c = N\tau_0$; $U_0(t) = 1, 1; 0 \le t \le \tau_0$. Тоді можемо записати: — перший елемент сигналу

$$U_1 u_0(t) \cos\left(\omega_0 t + \Theta_1\right),\tag{3}$$



Рис. 2. Схема формування циклічних АФМ-сигналів:

АЦП — аналого-цифровий перетворювач; $Abs(g_i)$ — обчислювач модуля елемента кодувальної послідовності; $Sign(g_i)$ — обчислювач знака (±1) кодувальної послідовності; СРП — схема розрахунку параметра τ при передачі пакетів цифрової інформації; КР — кільцевий регістр, де постійно зберігається заздалегідь розраховане базове кодове слово G_0^0



*— п-*й елемент

$$u(t) = \sum_{n=1}^{N} U_n u_0(t - t_n) \cos[\omega_0(t - t_n) + \Theta_n].$$
 (5)

Комплексна обвідна сформованого сигналу має вигляд

$$U(t) = \sum_{n=1}^{N} U_n u_0(t - t_n),$$
(6)

а комплексна амплітуда п-го елемента

$$U_n = u_n \exp(j\Theta_n - j\omega_0 t_n), \tag{7}$$

де доданок $\omega_0 t_n$ обумовлюється некратністю τ_0 періоду $2\pi/\omega_0$.

АФМ-сигнал можна отримати не тільки затримкою імпульсів однакової форми відносно один одного, а й "вирізанням" з безперервного коливання $\cos \omega_0 t$ імпульсу з подальшою амплітудною та фазовою модуляціями, тоді

$$u(t) = \sum_{n=1}^{N} U_n u_0(t - t_n) \cos \omega_0 t,$$
 (8)

а комплексна амплітуда п-го елемента

$$U_n = U \exp j\Theta_n. \tag{9}$$

Комплексні обвідні, відповідно, *n*-го елемента та сигналу

$$U_{n}(t) = U_{n}u_{0}(t - t_{n});$$
(10)

$$U(t) = \sum_{n=1}^{N} U_n(t).$$
 (11)

Розглянемо приклад.

Нехай задано послідовність

$$\mathbf{\overline{54\Pi}} = \{5, 2, 2, -4, 2, 2, -4, 2, 2\}.$$
 (12)

Відліки БЧП можна представити у вигляді набору дискретних амплітуд $u_i(t)$ та фаз $\varphi_i(t)$ (амплітудна та фазова модуляція відповідно):

 $u_i(t) = \{5, 2, 2, 4, 2, 2, 4, 2, 2\};$ (13)

$$\varphi_i(t) = \{0, 0, 0, \pi, 0, 0, \pi, 0, 0\}.$$
(14)

Часову діаграму, що демонструє етапи формування АФМ-сигналу для цього прикладу, та схеми формування циклічних АФМ-сигналів, представлено на **рис. 3**.

Слід зазначити, що кодувальні багаторівневі числові послідовності з цілочисельними елементами, що мають ідеальну періодичну АК Φ , існують для значень довжини N=4, 8, 9, 12, 16 і т. д.

Метод оброблення АФМ-сигналів

АФМ-сигнали являють собою нормальну систему обсягом J=N ортогональних циклічних сигналів із заданими структурними властивостями, тому для вирішення завдання з їх розрізнення доцільно перейти до методу ковзних згорток, заснованому на врахуванні структурних властивостей сигналів, що згортаються [8]. Сутність цього методу щодо систем ортогональних циклічних сигналів полягає в тому, що для реалізації ковзного режиму оброблення (розрізнення) сигналів прийнята БЧП подвоюється, тобто формуються два її періоди. В такому разі всі сигнали цієї системи можна отримати як послідовні сегменти довжиною N на відрізку, що дорівнює двом періодам довільного сигналу цієї системи.

Отже, для стиснення нормальної системи циклічних сигналів замість *N*-канального узгодженого фільтра достатньо побудувати тільки один одноканальний фільтр, узгоджений з будь-яким із переданих циклічних сигналів системи (наприклад, з сигналом нульового зсуву). Нехай $\{g(i+\tau)\}$ — передана БЧП, а $\{y(i)\} = \{g(i+\tau)+n(i)\}$ — прийнята послідовність на фоні білого гаусівського шуму.

Розглянемо покроково процедуру розрізнення циклічних АФМ-сигналів за методом ковзних згорток.

Крок 1. Сформувати на базі прийнятої послідовності $\{y(i)\} = y(0), y(1), ..., y(N-1)\}$ подвоєну послідовність за правилом

$$\{y2(i)\} = \{y(0), y(1), \dots, y(N-1), y(0), y(1), \dots, y(N-2\} = \{y(i \mod N)\}, i = \overline{0, 2N-2}.$$
(15)

Крок 2. Знайти значення k_{\max} , за якого аперіодична змінна згортка z(k) між $\{g(N-i-1)\}$ та $\{y2(i)\}$ має максимальне значення:

$$Z(k) = \sum_{i=0}^{N-1} g(N-i-1)y_2(k-i),$$
(16)

 $k=\overline{0,2N-2},$

де $\{g(N-i-1)\} = h(i)$ — відліки імпульсної характеристики фільтра, узгодженого з БЧП $\{g(i)\}$, при цьому вхідні відліки $y_2(k-i) \equiv 0$, якщо (k-i) < 0, а всі значення аргументів послідовностей, що згортаються, редукуються за mod N. Оскільки вихід ЦУФ відкривається строб-імпульсом на (N-1)-му такті від моменту приходу сигналу (нульового такту), k_{max} приймає значення з діапазону k = N - 1, 2N - 2.

Крок 3. За знайденим на кроці 2 значенням k_{max} , для якого $Z(k) = Z_{\text{max}}$, визначити максимально правдоподібне значення $\hat{\tau}$ номера циклічного зсуву переданої БЧП. З метою отримання виразу, який міститиме номер циклічного зсуву τ в явному вигляді, запишемо вираз (16) з урахуванням (15):

$$Z(k) = \sum_{i=0}^{N-1} g(N-i-1)y_2(k-i-\tau),$$

$$k = \overline{0, 2N-2}, \ \tau = \overline{0, N-1}.$$
(17)

Беручи до уваги відсутність шумів ($n(t) \equiv 0$), знайдемо значення $k = k_{max}$, за якого виконується рівність

$$g(N-i-1) = g(k_{\max} - i - \tau),$$
(18)

$$k_{\max} = \overline{N-1, 2N-2},$$

$$\tau = \overline{0, N-1}.$$

З аналізу (18) витікає, що з урахуванням шумів максимально правдоподібна оцінка номера переданого циклічного зсуву

$$\hat{\tau} = (N - 1 - k_{\max}) \mod N,$$

$$k_{\max} = \overline{N - 1, 2N - 2}.$$
(19)

Наприклад, нехай отримане на кроці 2 значення $k_{\text{max}} = 12$ для ЦУФ, узгодженого з БЧП довжиною $N = 3^2 = 9$, тоді $\hat{\tau} = (9 - 1 - 12) \mod 9 = 5$.

Функціональна схема пристрою, що реалізує принцип розрізнення циклічних сигналів за методом ковзних згорток, наведена на **рис. 4**, де вирішальний пристрій відкривається стробом через N-1 тактів

роботи ЦУФ, тобто коли прийнятий сигнал повністю війде до ЦУФ.

Епюри в контрольних точках детектора наведено на рис. 5, де як приклад розглянуто АФМ-сигнал для БЧП довжиною N=3²=9. Схема працює таким чином. АФМ-сигнал (епюра 1) надходить до входів амплітудного та фазового детекторів, після детектування (епюри 2, 3) проводиться множення сигналів на виході детекторів і в результаті отримується кодувальна послідовність БЧП (епюра 4), відліки якої після оцифрування в АЦП накопичуються в буферному регістрі (БР). Після приходу *N*-го відліку сигналу вміст БР пересилається протягом 1-го такту в кільцевий регістр (КР), на виході якого формуються два періоди прийнятої послідовності, далі подвоєна послідовність подається на вхід ЦУФ, узгоджений з нульовим циклічним зсувом БЧП. Вирішальний пристрій приймає рішення щодо номера переданого ци-







Рис. 6. Схема обчислення циклічної згортки в ковзному вікні (f_{вх} — сигнал після АЦП на рис.4)



Рис. 7. Економічна схема одноканального ЦУФ для стиснення сигналу в режимі ковзної згортки: *T* — пристрій затримки на 1 такт; ⊕ — суматор (віднімач) двох чисел

клічного зсуву $\hat{\tau}$ на базі аналізу часу появи максимального відгуку на виході ЦУФ.

В деяких випадках для підвищення швидкодії приймача, що особливо актуально у разі пошуку синхропослідовності, можна побудувати схему подвоєння вхідної послідовності без використання кільцевого регістру, як показано на **рис. 6**.

Такий підхід дозволяє виконати обчислення циклічної згортки в ковзному вікні завдяки послідовному завантаженню регістра зсуву на N позицій з одночасним перевантаженням за один такт у паралельному вигляді до регістру зсуву на 2N позицій. Блок ЦУФ працює так само, як і в схемі на рис. 4.

Як зазначалося раніше, розглянутий клас БЧП має надмірність, що дозволяє мінімізувати число арифметичних пристроїв одноканального ЦУФ. Основна ідея усунення надлишкових операцій у регулярній формі полягає у можливості подання одновимірних масивів чисел у вигляді двовимірних масивів з максимальним числом співпадаючих стовпців [9]. Так, наприклад, БЧП довжиною $N=3^2=9$ з ідеальною ПАКФ $\{h(i)\} = \{5, 2, 2, -4, 2, 2, -4, 2, 2\}$ (20)

представимо у вигляді двовимірного масиву, стовпці якого збігаються з точністю до першого елемента:

$$H_{3X3} = \begin{bmatrix} 5 & -4 & -4 \\ 2 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 2 \end{bmatrix}.$$
 (21)

Економічна схема одноканального ЦУФ, побудована з урахуванням властивостей масиву (21), представлена на **рис.** 7.

Неважко переконатися безпосередньо, що імпульсна характеристика $\{h(i)\}$ ЦУФ (рис. 7) збігається з БЧП (20).

Алгоритм синхронізації циклічних АФМ-сигналів

Передавання інформації за допомогою циклічних АФМ-сигналів зручно здійснювати у вигляді кадрової структури, яка містить у кожному початку інверсну до нульового циклічного зсуву БЧП, а далі передаються БЧП з інформаційними циклічними зсувами.

Запропонована структура кадру на базі циклічних АФМ, що містить синхросигнал, показана на **рис. 8**.



Рис. 8. Структура кадру на базі циклічних АФМ-сигналів на прикладі БЧП (20)

На початку кадру передається інверсна до S_0 послідовність

$$\overline{S}_0 = \{-5, -2, -2, 4, -2, -2, 4, -2, -2\}.$$
 (22)

Виконаємо зворотне дискретне перетворення Фур'є від послідовностей (20) та (22):

$$W_0 = IFFT\{h_0\} = \{1, 1, 1, -1, 1, 1, -1, 1, 1\},$$
(23)

$$\overline{W}_0 = IFFT\{\overline{S}_0\} = \{-1, -1, -1, 1, -1, -1, 1, -1, -1\}.$$
(24)

У виразах (23) та (24) *IFFT* означає зворотне швидке перетворення Фур'є (ШП Φ) [10, 11].

Поелементне порівняння БЧП (22) з її спектром (24) демонструє повний збіг фазової структури, що дозволяє реалізувати завадостійкий виявник БЧП з нульовим чи інверсним нульовим циклічним зсувом при використанні тільки фазової структури АФМсигналу. Схема виявника нульових циклічних зсувів БЧП показана на **рис. 9**.

Схема працює таким чином. Фазовий детектор перетворює високочастотний сигнал у відеопослідовність, яка після фільтра низької частоти (**ФНЧ**) та компаратора перетину нуля перетворюється у бінарну послідовність (+1, -1). Блок зворотного перетворення Фур'є відновлює послідовність (20) чи (22), яка проходить узгоджений фільтр з отриманням відгуку амплітудою N^2 або $-N^2$. Далі вирішальний пристрій порівнює відгук з порогами та приймає рішення щодо того, який саме сигнал було прийнято. Схема може працювати в умовах початкової невизначеності коефіцієнта підсилення приймального тракту та дозволяє розкрити цю невизначеність завдяки розпізнаванню моменту надходження синхросигналу.

Проведемо моделювання роботи схеми виявника синхросигналу (рис. 9) в умовах зміни амплітуди сигналу на вході приймача для наведеної на рис. 8 структури кадру.

На **рис.** 10 показано виявлені моменти передавання послідовності (22) на фоні інформаційного потоку даних в умовах випадкової зміни амплітуди сигналу з нормальним розподілом імовірності. Як можна побачити, схема надійно виявляє початок кожного кадру, що містить послідовність (22).



Припустимо, що коефіцієнт посилення приймача змінюється за гармонічним законом $G(t) = G_0 \cos(\Omega t + \varphi_0)$, де G_0 — початкове значення коефіцієнта посилення, Ω — частота гармонічного сигналу, φ_0 — початкова фаза. При цьому амплітуда вхідного сигналу змінюється за випадковим законом n(t). Амплітуда обвідної прийнятого сигналу: $y(t) = A(t) \cdot (G(t) + n(t))$,

де A(t) — амплітуда вихідного сигналу, n(t) — закон зміни амплітуди сигналу при розповсюдженні.

На **рис.** 11 наведено результати моделювання роботи схеми виявника синхросигналу в умовах наявності водночас регулярної та випадкової складових амплітуди сигналу на вході приймача. Тут видно, що пропусків сигналу синхронізації немає, а схема, як і







для випадку на рис. 10, надійно виявляє початок кожного інформаційного кадру.

Розглянемо загальну схему приймання циклічних АФМ-сигналів з урахуванням схеми синхронізації, представлену на рис. 12. Та її частина, що виявляє номер циклічного зсуву інформаційної послідовності, працює аналогічно розглянутій више схемі пристрою оптимального розрізнення циклічних АФМ-сигналів (див. рис. 4). Особливістю цієї схеми є те, що у разі виявлення послідовності (22) строб з вирішального пристрою надходить на електронний комутатор ключової схеми швидкого автоматичного регулювання підсилення (ШАРП), що дозволяє швидко, протягом довжини одного символу, налаштувати коефіцієнт підсилення відносно опорного рівня. Також строб з вирішального пристрою схеми синхронізації нав'язує фазу автогенератора синхроімпульсів, що мають символьну, блокову та кадрову частоти.

Висновки

Врахування структурних властивостей кодуючих систему циклічних АФМ-сигналів багаторівневих числових послідовностей з ідеальною періодичною автокореляційною функцією, таких як повна ідентичність фазової структури сигналу до та після швидкого перетворення Фур'є, дозволило забезпечити розрізнення нульового циклічного зсуву чи його інверсію, виходячи з аналізу лише фазової структури прийнятого сигналу. Швидке підстроювання коефіцієнта посилення приймача здійснюється в момент синхронізації, що дозволяє підвищити надійність роботи модема в умовах випадкової амплітуди прийнятого АФМ-сигналу.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Recommendation ITU-R SM.1056-1: *Limitation of radiation from industrial, scientific and medical (ISM) equipment.* https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/sm/R-REC-SM.1056-1-200704-I!!PDF-E.pdf

2. Ma S., Li X., Zou D. A CCSK based navigation and communication integrated satellite signal. 2021 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC), Harbin City, China, 2021, pp. 1079–1082, https://doi.org/10.1109/IWCMC51323.2021.9498883

3. Recommendation ITU-R SM.1046-3: Definition of spectrum use and efficiency of a radio system. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/ rec/sm/R-REC-SM.1046-3-201709-I!!PDF-E.pdf

4. Gepko I. Individual correlation properties and structural features of periodic complementary sequences. 2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Madrid, Spain, 2021, pp. 1–6, https://doi.org/10.1109/GLOBECOM46510.2021.9685585

5. Handbook on National Spectrum Management. Geneva, ITU, 2015, 326 p. https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-21-2015-PDF-E.pdf

6. Гепко И. А. Ортогональная ССЅК-модуляция на основе комплементарных кодовых последовательностей. *Вісті вищих учбових закладів. Радіоелектроніка*, 2022, т. 65, № 2, с. 71–83, https://doi.org/10.20535/S0021347022020017

7. Sadchenko A., Kushnirenko O. QPSK-modulation modem invariant to the rotation of the signal constellation plane. *Electrical, Control and Communication Engineering*, 2018, vol. 14, iss. 2, pp. 149–156, https://doi.org/10.2478/ecce-2018-0018

8. Коханов А.Б. Автоматический синхронизатор цифровых сигналов и телекоммуникационных потоков: *Bicmi вищих учбових закладів. Радіоелектроніка*, 2019, т. 62, вип. 4, с. 225–233, https://doi.org/10.20535/S0021347019040046

9. Sadchenko A., Kushnirenko O. The spectral method for the synthesis of integral H-sequences with an ideal periodic autocorrelation function. *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering*, 2020, vol. 12, no. 1, pp. 69–75, https://jtec.utem.edu. my/jtec/article/view/5781/

10. Гепко, І. О. Прийом ортогональних М-ичних сигналів з маніпуляцією негациклічним зсувом на основі непарного дискретного перетворення Фур'є. *Вісті вищих учбових закладів. Радіоелектроніка*, 2022, т. 65, № 8, с. 459–473, https://doi. org/10.20535/S0021347022110024

11. Гепко И.А. М-ичная схема CDMA с CCSK-модуляцией и параллельной компенсацией системных помех. *Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології*, 2021, № 2, с. 51–63, https://doi.org/10.36994/2788-5518-2021-02-02-04

Дата надходження рукопису до редакції 03.02 2024 р.

DOI: 10.15222/TKEA2024.1-2.24 UDC 681.513 A. V. SADCHENKO, O. A. KUSHNIRENKO, O. V. TROYANSKIY

Ukraine, Odessa, Odessa Polytechnic National University E-mail: koa@opu.edu.ua

SYNCHRONOUS PROCESSING OF ORTHOGONAL CYCLIC AFM SIGNALS UNDER CONDITIONS OF RECEPTION GAIN COEFFICIENT UNCERTAINTY

A method has been proposed for synchronizing modems that use a system of cyclic amplitude-phase keyed signals encoded by multi-level numerical sequences with an ideal periodic autocorrelation function to transmit information. The method is based on the invariance of the phase structure of the zero cyclic shift and the inverse zero cyclic shift of the coding sequence to the fast discrete Fourier transform. This makes it possible to detect a synchronization signal based on the analysis of only the phase structure of the signal at the output of the phase detector and to carry out fast automatic adjustment of the receiver gain under conditions of an unknown initial amplitude of the amplitude-phase manipulated signal. The amplitude structure of the clock signal is restored using a special case of the fast discrete Fourier transform — the fast discrete cosine transform. Due to the integer values of the amplitudes, the symmetry around the center, and taking into account the cyclicity property, a single matched filter is used to distinguish orthogonal cyclic signals in a system containing N signals with the number of multipliers equal to the number of discrete amplitude variations, less than N/2 for even N or N/2–1 for odd N.

Keywords: cyclic AFM signal, orthogonality, multilevel number sequence, receiver gain, frame synchronization, cyclic convolution, digital matched filter.

REFERENCES

1. Recommendation ITU-R SM.1056-1: Limitation of radiation from industrial, scientific and medical (ISM) equipment. https:// www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/sm/R-REC-SM.1056-1-200704-I!!PDF-E.pdf

2. Ma S., Li X., Zou D. A CCSK based navigation and communication integrated satellite signal. 2021 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC), Harbin City, China, 2021, pp. 1079-1082, https://doi.org/10.1109/ IWCMC51323.2021.9498883

3. Recommendation ITU-R SM.1046-3: Definition of spectrum use and efficiency of a radio system. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/ rec/sm/R-REC-SM.1046-3-201709-I!!PDF-E.pdf

4. Gepko I. Individual correlation properties and structural features of periodic complementary sequences. 2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Madrid, Spain, 2021, pp. 1–6, https://doi.org/10.1109/GLOBECOM46510.2021.9685585

5. Handbook on National Spectrum Management. Geneva, ITU, 2015, 326 p. https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-21-2015-PDF-E.pdf

6. Gepko I. A. Orthogonal CCSK based on complementary code sequences. *Radioelectronics and Communications Systems*, 2022, vol. 65, no. 2, pp. 61–71, https://doi.org/10.20535/S0021347022020017

7. Sadchenko A., Kushnirenko O. QPSK-modulation modem invariant to the rotation of the signal constellation plane. *Electrical, Control and Communication Engineering*, 2018, vol. 14, iss. 2, pp. 149–156, https://doi.org/10.2478/ecce-2018-0018

8. Kokhanov A. B. Automatic synchronizer of digital signals and telecommunication streams. *Radioelectronics and Communications Systems*, 2019, vol. 62, no. 4, pp. 181–188, https://doi.org/10.3103/S0735272719040046

9. Sadchenko A., Kushnirenko O. The spectral method for the synthesis of integral H-sequences with an ideal periodic autocorrelation function. *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering*, 2020, vol. 12, no. 1, pp. 69–75, https://jtec.utem.edu. my/jtec/article/view/5781/

10. Gepko, I. Reception of M-ary orthogonal negacyclic code shift keying signals based on odd discrete Fourier transform. *Radioelectronics and Communications Systems*, 2022, vol. 65, no. 8, pp. 459–473, https://doi.org/10.20535/S0021347022110024

11. Gepko I. M-ary CDMA scheme with CCSK modulation and parallel interference cancellation technique M-ary CDMA scheme with CCSK modulation and parallel interference cancellation technique. *Infocommunication and Computer Technologies*, 2021, no. 2, pp. 51–63, https://doi.org/10.36994/2788-5518-2021-02-02-04

Опис статті для цитування:

Садченко А. В., Кушніренко О. А., Троянський О. В. Синхронне оброблення ортогональних циклічних АФМ-сигналів в умовах невизначеності коефіцієнта посилення приймального тракту. Технологія та конструювання в електронній апаратурі, 2024, № 1–2, с. 24–32. http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2024.1-2.24

Cite the article as:

Sadchenko A. V., Kushnirenko O. A., Troyanskiy O. V. Synchronous processing of orthogonal cyclic AFM signals under conditions of reception gain coefficient uncertainty. Technology and design in electronic equipment, 2024, no. 1–2, pp. 24–32. http://dx.doi. org/10.15222/TKEA2024.1-2.24

УДК 004.056.55

DOI: 10.15222/TKEA2024.1-2.33

К. т. н. А. В. САДЧЕНКО, О. А. КУШНІРЕНКО

Україна, Національний університет «Одеська політехніка» E-mail: koa@op.edu.ua

НЕСПОТВОРЮЮЧИЙ АЛГОРИТМ ВБУДОВУВАННЯ ЦИФРОВОГО ВОДЯНОГО ЗНАКУ У МЕДИЧНІ ЗОБРАЖЕННЯ

Запропоновано адаптивний до впливу шумів та спотворень найменших значущих бітів алгоритм вбудовування цифрового водяного знаку в зображення, яке зберігатиметься на паперовому носії, без спотворень його вихідних параметрів. Водяним знаком може бути як графічна, так і текстова інформація, наприклад опис медичного зображення. Вбудовування цифрового водяного знаку здійснюється шляхом масштабування простору, що займає медичне зображення, та модифікації значень додаткових пікселів, утворених в процесі масштабування.

Ключові слова: зображення, цифровий водяний знак, паперовий носій, адаптивний алгоритм, масштабування простору, шум, спотворення інформації.

При зберіганні або передаванні через третіх осіб роздрукованих медичних зображень, таких як томограми, рентгенограми тощо, виникає необхідність забезпечення захисту додаткової інформації, такої як персональні дані пацієнта та скорочений анамнез, від несанкціонованого доступу. Можливий процес проходження медичного зображення — від його отримання, додавання цифрового водяного знаку (ЦВЗ, англійською DWM — digital watermark), друкування і до подальшого витягнення ЦВЗ — показано на рис. 1. До отриманого в процесі діагностики медичного зображення (будемо називати його контейнером) додається необхідна супутня інформація у вигляді ЦВЗ, яка при друкуванні залишається невидимою та не спотворює вихідне зображення. На такій роздруківці конфіденційної інформації візуально немає, але за потреби її можна звідти отримати. Для цього необхідно отримати цифрову копію паперового носія (шляхом його сканування або фотографування з необхідною роздільною здатністю), після чого розділити отримане зображення на контейнер та ЦВЗ з використанням відповідного програмного забезпечення.

Зазначимо основні властивості [1, 2], яким має відповідати ЦВЗ, що вбудовується у медичне зображення:

• непримітність: ЦВЗ має бути невидимим для ока люлини:

• можливість виявлення: повідомлення з водяним знаком має бути доступним для отримання інформації відповідним фахівцем;

• надійність: ЦВЗ має бути стійким до шуму задля забезпечення можливості відновлення закладеної в ньому інформації навіть після дії на паперовий носій зовнішніх негативних факторів, що впливають на цілісність зображення;



Технологія та конструювання в електронній апаратурі, 2024, № 1-2

• мінімізація спотворення вихідного зображення в процесі вбудовування ЦВЗ або ж навіть зведення його до нуля у випадках, коли будь-які зміни медичного зображення можуть призвести до постанови хибного діагнозу.

Очевидно, що такі вимоги передбачають пошук компромісного рішення між видимістю ЦВЗ та його яскравістю.

Існують різні методи розпізнавання зображення з оптичних сканерів, наприклад:

• метод фонтанної подібності, закладений в алгоритмі FineReader;

 кореляційний метод, в основі якого лежить порівняння отриманого зображення з існуючими шаблонами;

• методи, засновані на дискретному перетворенні Фур'є та дискретному вейвлет-перетворенні.

Всі ці методи вимагають наявності набору певних шаблонів з текстовими символами чи графічними об'єктами. Так, наприклад, для алгоритмів, заснованих на методі фонтанної подібності FineReader та кореляційних методах, дисперсія шуму не має перевищувати значення 0,001 для розпізнавання текстових символів з імовірністю не менше 0,9 [3, 4].

Існують методи вбудовування цифрових водяних знаків [5–8] у просторову та частотну область зображення. Для алгоритмів, які працюють з просторовою областю, найпростішим і найчастіше використовуваним є метод модифікації найменших значущих бітів — LSB (*least significant bit*) [9].

До алгоритмів, що використовують частотну область, належать метоли молифікації високочастотних чи низькоамплітудних коефіцієнтів дискретного вейвлет-перетворення [10-12]. При цьому вбудовування цифрових водяних знаків у графічні об'єкти як у просторовій, так і в частотній областях призводить, як правило, до певних спотворень зображення. Але не завжди це може бути припустимим — наприклад, у медичних зображеннях спотворення можуть призвести до поставлення помилкового діагнозу. Крім того, алгоритми, що працюють з частотною областю, мають підвищену складність технічної реалізації [13, 14]. Також слід зазначити, що перелічені вище підходи до вбудовування ЦВЗ були запропоновані для оброблення зображень, що формуються та зберігаються виключно в електронному вигляді. А от у роздрукованих документах, які можуть піддаватися різного роду дії зовнішніх факторів під час зберігання, а потім скануватися, можливі спотворення контейнера та ЦВЗ. Результатами впливу зовнішніх факторів на роздруківку можуть бути такі:

 вицвітання або зменшення динамічного діапазону яскравості пікселів;

• певні спотворення в процесі друку через неідеальність як структури паперового носія, так і елементів друкувального пристрою внаслідок завад в мережі живлення;

• можливе забруднення роздруківки внаслідок недбалого зберігання.

Метою цієї роботи було розроблення стійкого до спотворень та шумів алгоритму вбудовування ЦВЗ у просторову область медичного зображення, призначеного для зберігання на паперовому носії у вигляді роздруківки.

Аналіз LSB-методу вбудовування ЦВЗ

Оскільки найбільш близьким до ідеології цієї роботи є вбудовування ЦВЗ за допомогою методу LSB, проведемо аналіз його стійкості до впливу зовнішніх факторів. Основа методу LSB полягає в модифікації молодших бітів, що продемонстровано на **рис. 2**. Слід зазначити, що яскравість окремих пікселів ЦВЗ може займати від одного до кількох бітів байту.

Розглянемо залежність видимості вбудованого у контейнер ЦВЗ від його яскравості при застосуванні LSB-методу. ЦВЗ буде представлено у вигляді монохромного зображення на тлі монохромного та кольорового контейнера. Вихідні зображення наведено на **рис. 3**.

Еволюцію зображення контейнера з ЦВЗ при збільшенні відносної яскравості ЦВЗ від 0,5 до 20% від максимальної яскравості контейнера І_{тах} представлено на рис. 4. Тут видно, що максимальна яскравість ЦВЗ, яка гарантує його непомітність на тлі монохромного зображення контейнера, знаходиться на рівні 1-2%, а для кольорового зображення контейнера яскравість ЦВЗ може бути збільшена приблизно до 6%. Таку різницю у граничних рівнях яскравості ЦВЗ можна пояснити додатковим ефектом маскування каналів, наприклад, синього і зеленого кольорів при вбудовуванні у канал червоного кольору. На рис. 4 можна побачити, що монохромне ЦВЗ на тлі монохромного зображення контейнера стає все більш помітним після досягнення відносної яскравості 6%, а на тлі кольорового зображення контейнера — після 10%.





Рис. 4. Отримані за допомогою методу LSB кольорове (*a*) та монохромне (червоний канал; б) зображення контейнера (томограма) з вбудованим ЦВЗ різної яскравості (у відсотках від максимальної яскравості зображення контейнера)



Рис. 7. Вигляд витягненого ЦВЗ для методу LSB при збільшенні дисперсії білого шуму

Проведемо моделювання впливу шуму на якість витягненого ЦВЗ. На **рис. 5, 6** показані зображення з вбудованим ЦВЗ, що має якравість 1% від I_{max} , в умовах наявності білого шуму з різним рівнем дисперсії σ^2 , а також витягнені ЦВЗ.

Для оцінки стійкості ЦВЗ до впливу шуму використаємо критерій максимуму коефіцієнта кореляції *r* яскравості пікселів зображення до та після впливу білого шуму [15–18]:

$$r = \frac{\sum_{m} \sum_{n} (A_{mn} - \overline{A})(B_{mn} - \overline{B})}{\sqrt{\left(\sum_{m} \sum_{n} (A_{mn} - \overline{A})^{2}\right) \left(\sum_{m} \sum_{n} (B_{mn} - \overline{B})^{2}\right)}}; (1)$$

$$\overline{A} = \frac{1}{MN} \sum_{m} \sum_{n} (A_{mn});$$

$$\overline{B} = \frac{1}{MN} \sum_{m} \sum_{n} (B_{mn})$$

UP $A \to B \longrightarrow$ ELEMENTIA MACHIB A i B posmipom $m \times n$. Into

- (в *A_{mn}*, *B_{mn}* елементи масивів *А* і *В* розміром *m* × *n*, що описують зображення (контейнера або ЦВЗ) до та після впливу білого шуму відповідно;
 - $\overline{A}, \overline{B}$ усереднені по двомірним масивам A і B значення яскравості пікселів;
 - *M*, *N* розміри зображень *A* і *B* по горизонталі та вертикалі у пікселях відповідно.

З рис. 5, *а* можна побачити, що шум впливає на зображення контейнера менше, ніж на зображення ЦВЗ: у випадку наявності білого шуму з дисперсією 0,0001 візуально зображення контейнера залишається без змін, на відміну від спотвореного зображення

ЦВЗ. При збільшенні дисперсії до 0,005 (рис. 5, б) шум стає помітним також і на зображенні контейнера, а ЦВЗ спотворюється ще більше.

На рис. 6 наведено граничний випадок, коли на зображення впливає шум з дисперсією $\sigma^2 = 0,001$, на тлі якого витягнений ЦВЗ стає практично нерозбірливим, а зображення контейнера завдяки істотно більшій яскравісті має цілком прийнятний вигляд.

На **рис.** 7 наведено низку зображень витягненого ЦВЗ з відносною яскравістю 1% від яскравості контейнера $I_{\rm max}$ при збільшенні дисперсії білого шуму, які демонструють залежність коефіцієнта кореляції r між витягненим та вихідним ЦВЗ від дисперсії σ^2 . З аналізу цих даних можна зробити висновок, що для отримання коефіцієнта кореляції 0,9 максимальна дисперсія шуму не повинна перевищувати 4·10⁻⁴.

Завадостійкий алгоритм вбудовування ЦВЗ у просторову область

У разі використання розглянутого алгоритму на основі LSB-методу після вилучення ЦВЗ відбувається деяке спотворення вихідного зображення контейнера навіть за повної відсутності шуму, причому спотворення тим помітніше, чим вище яскравість вбудованого ЦВЗ. Спотворення можуть проявитися, наприклад, у вигляді плям, які при подальшому розшифруванні медичних зображень можуть призвести до постанови хибного діагнозу. Нами пропонується завадостійкий алгоритм (*noise immune algorithm*, **NIA**) вбудовування ЦВЗ у субпікселі основного зображення, які після вилучення ЦВЗ не використовуються для побудови зображення контейнера. У разі відсутності

шуму отримане зображення буде повністю відповідати вихідному, тобто не матиме спотворень.

Розглянемо випадок вбудовування монохромного ЦВЗ, що являє собою двовимірний масив такого ж розміру, як і масив I, що описує контейнер: $m \times n$, де кожен піксель має свою яскравість. Для визначеності приймемо, що зображення контейнера має 256 градацій яскравості, тобто кожний елемент масиву I є числом з діапазону 0...255. Також визначимо граничне значення яскравості ЦВЗ. При його вбудовуванні у контейнер потрібно буде забезпечити результуючий рівень яскравості зображення в тому самому динамічному діапазоні, тобто від 0 до 255, при цьому максимальне значення яскравості елемента не має перевищувати 255. Тобто, якщо максимальна яскравість контейнер
а $I_{\rm max}$ складає 240 з діапазону 0...255, тоді яскравість ЦВЗ не може перевищувати 255-240=15.

Крок 1.

На основі масиву для вихідного зображення І формуємо у 4 рази більший новий масив У, використовуючи правило

$$Y(i,j) = I\left[\operatorname{int}\left(\frac{i+1}{2}\right), \operatorname{int}\left(\frac{j+1}{2}\right)\right](i+j-1) \operatorname{mod} 2, \quad (2)$$

 $i = \overline{1, 2n}, j = 1, 2m$.

r . _

Для прикладу представимо вихідне зображення у вигляді двовимірного масиву $I[m \times n] = I[3 \times 3]$:

$$I_{3\times3} = \begin{bmatrix} 45 & 15 & 120 \\ 240 & 22 & 155 \\ 7 & 140 & 90 \end{bmatrix}.$$
 (3)

Згідно з (2), новий масив У матиме вигляд $Y[2m \times 2n] = Y[6 \times 6]:$

$$Y_{6\times6} = \begin{bmatrix} 45 & 0 & 15 & 0 & 120 & 0 \\ 0 & 45 & 0 & 15 & 0 & 120 \\ 240 & 0 & 22 & 0 & 155 & 0 \\ 0 & 240 & 0 & 22 & 0 & 155 \\ 7 & 0 & 140 & 0 & 90 & 0 \\ 0 & 7 & 0 & 140 & 0 & 90 \end{bmatrix}$$
(4)

Крок 2.

Замінюємо отримані на попередньому кроці нульові елементи масиву У на середнє аріфметичне сусідніх з ними у рядку елементів, поділене на коефіцієнт запасу $K_3 = 1$, фізичний зміст якого полягає в можливості зміни яскравості вбудованого ЦВЗ (тобто коефіцієнт запасу $K_3 = 1$ означає, що яскравість ЦВЗ дорівнює вихідному значенню):

$$Y_{6\times6} = \begin{bmatrix} 45 & \frac{30}{K_3} & 15 & \frac{67}{K_3} & 120 & \frac{120}{K_3} \\ \frac{45}{K_3} & 45 & \frac{30}{K_3} & 15 & \frac{67}{K_3} & 120 \\ 240 & \frac{131}{K_3} & 22 & \frac{89}{K_3} & 155 & \frac{155}{K_3} \\ \frac{240}{K_3} & 240 & \frac{131}{K_3} & 22 & \frac{89}{K_3} & 155 \\ 7 & \frac{73}{K_3} & 140 & \frac{115}{K_3} & 90 & \frac{90}{K_3} \\ \frac{7}{K_3} & 7 & \frac{73}{K_3} & 140 & \frac{115}{K_3} & 90 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 45 & 30 & 15 & 67 & 120 & 120 \\ 45 & 45 & 30 & 15 & 67 & 120 & 120 \\ 45 & 45 & 30 & 15 & 67 & 120 & 20 \\ 240 & 131 & 22 & 89 & 155 & 155 \\ 240 & 240 & 131 & 22 & 89 & 155 \\ 7 & 73 & 140 & 115 & 90 & 90 \\ 7 & 7 & 73 & 140 & 115 & 90 \end{bmatrix}$$
(5)

Крок 3.

Для визначеності представимо ЦВЗ у вигляді двовимірного масиву такої ж розмірності: DWM $[m \times n]$ = DWM $[3 \times 3]$ і коефіцієнтом запасу K₃=1. Для прикладу розглянемо ЦВЗ з бінарними елементами масиву DWM_{3×3}=[1 0 1, 0 1 0, 1 1 1]:

$$DWM_{3\times3} = K_3 \cdot \begin{bmatrix} DWM_{1,1} & DWM_{1,2} & DWM_{1,3} \\ DWM_{2,1} & DWM_{2,2} & DWM_{2,3} \\ DWM_{3,1} & DWM_{3,2} & DWM_{3,3} \end{bmatrix} = \\ = 1 \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$
(6)

Додаємо ЦВЗ шляхом поелементного підсумовування яскравости пікселів зображення, що знаходяться на додаткових позиціях, з масивом яскравостей пікселів ЦВЗ згідно з виразом

$$I_{\text{DWM}}(i, j) =$$

$$= Y(i, j) + \text{DWM}\left[\text{int}\left(\frac{i+1}{2}\right), \text{int}\left(\frac{j+1}{2}\right) \right] (i+j) \mod 2, \quad (7)$$

$$i = \overline{1, 2n}, j = \overline{1, 2m}.$$
Виконаємо додавання ЦВЗ згідно з (5) та (6):

Технологія та конструювання в електронній апаратурі, 2024, № 1–2

$$I_{DWM6X6} = \begin{bmatrix} 45 & \frac{30}{K_3} + DWM_{1,1} & 15 & \frac{67}{K_3} + DWM_{1,2} & 120 & \frac{120}{K_3} + DWM_{1,3} \\ \frac{45}{K_3} + DWM_{1,1} & 45 & \frac{30}{K_3} + DWM_{1,2} & 15 & \frac{67}{K_3} + DWM_{1,3} & 120 \\ 240 & \frac{131}{K_3} + DWM_{2,1} & 22 & \frac{89}{K_3} + DWM_{2,2} & 155 & \frac{155}{K_3} + DWM_{2,3} \\ \frac{240}{K_3} + DWM_{2,1} & 240 & \frac{131}{K_3} + DWM_{2,2} & 22 & \frac{89}{K_3} + DWM_{2,3} & 155 \\ 7 & \frac{73}{K_3} + DWM_{3,1} & 140 & \frac{115}{K_3} + DWM_{3,2} & 90 & \frac{90}{K_3} + DWM_{3,3} \\ \frac{7}{K_3} + DWM_{3,1} & 7 & \frac{73}{K_3} + DWM_{3,2} & 140 & \frac{115}{K_3} + DWM_{3,3} & 90 \end{bmatrix} = \\ = \begin{bmatrix} 45 & 30 + 1 & 15 & 67 + 0 & 120 & 120 + 1 \\ 45 + 1 & 45 & 30 + 0 & 15 & 67 + 1 & 120 \\ 240 & 131 + 0 & 22 & 89 + 1 & 155 & 155 + 0 \\ 240 + 0 & 240 & 131 + 1 & 22 & 89 + 0 & 155 \\ 7 & 73 + 1 & 140 & 115 + 1 & 90 & 90 + 1 \\ 7 & 73 + 1 & 140 & 115 + 1 & 90 & 90 + 1 \\ 7 & 74 & 140 & 116 & 90 & 91 \\ 8 & 7 & 74 & 140 & 116 & 90 \end{bmatrix} + .$$
(8)

Зазначимо, що у разі роботи з кольоровими зображеннями ЦВЗ може бути вбудований як в один, так і у всі три колірні канали.

Приклад роботи алгоритму за відсутності впливу шуму, тобто при $K_3 = 1$, наведено на **рис. 8, 9**.

Як можна побачити з приведених результатів моделювання, вбудовування ЦВЗ відбулося без візуальних змін зображення контейнера, а після відновлення в умовах відсутності шуму зображення як контейнера, так і ЦВЗ залишилися не спотвореними.





Крок 2





Рис. 8. Зображення розміром 512×512 пікселів після масштабування за алгоритмом NIA (*крок 1*), після заміни нульових значень масиву усередненими значеннями (*крок 2*) і після додавання ЦВЗ (*крок 3*)



Рис. 9. Відновлені зображення контейнера (*a* — кольорове, *б* — монохромне в червоному каналі) та ЦВЗ (*в*) розміром 256×256 пікселів при використанні алгоритму NIA

Проведемо моделювання зображення контейнера з вбудованим ЦВЗ при різних значеннях його яскравості (коефіцієнті запасу).

На рис. 10 показано візуальні зміни зображення томограми при збільшенні відносної яскравості ЦВЗ від 1 до 20% від $I_{\rm max}.$ Як і для методу LSB (див.



Рис. 10. Отримані за допомогою алгоритму NIA кольорове (a) та монохромне (червоний канал; б) зображення контейнера (томограма) з вбудованим ЦВЗ різної яскравості (у відсотках від максимальної яскравості зображення контейнера)

рис. 4), ЦВЗ у випадку кольорового зображення додавали до каналу червоного кольору. Для цього алгоритму максимальна яскравість ЦВЗ, що гарантує його непомітність на тлі монохромного зображення контейнера, становить приблизно 5%, а для кольорового зображення — 15%, що суттєво перевищує відповідні значення (1-2 та 6%), отримані при застосуванні алгоритму, заснованому на LSB-методі. Такий результат пояснюється маскувальним ефектом немодифікованих пікселів зображення контейнера при загальному збільшенні розміру зображення в чотири рази при використанні NIA.



 $r=0,89; \sigma^2=4.10^{-6}$



 $r=0.98; \sigma^2=1.10^{-6}$



 $r=0,12; \sigma^2=10^{-3}$

 $r = 0.94; \sigma^2 = 2 \cdot 10^{-6}$



 $r=0,99; \sigma^2=5\cdot 10^{-7}$

Рис. 11. Вигляд витягненого ЦВЗ для алгоритму NIA при збільшенні дисперсії білого шуму

Дослідимо стійкість пропонованого алгоритму NIA вбудовування ЦВЗ до впливу шуму.

На рис. 11 продемонстровано залежність коефіцієнта кореляції r між витягненим та вихідним ЦВЗ при збільшенні дисперсії білого шуму. Відносна яскравість ЦВЗ складає 10% від яскравості контейнера $I_{\rm max}$. У цьому випадку при дисперсії шуму $\sigma^2 = 1 \cdot 10^{-4}$ значення коефіцієнта кореляції складає r = 0.95 проти r = 0.9 при $\sigma^2 = 4 \cdot 10^{-4}$ для методу LSB.

Порівняння характеристик методів LSB та NIA вбудовування ЦВЗ

Результати порівняльного аналізу завадостійкості методів LSB та NIA, що використовувалися в алгоритмах вбудовування ЦВЗ — монохромного зображення розміром 256×256 пікселів, наведено у **таблиці**. Значення коефіцієнтів кореляції обчислювалися за однакових значень дисперсії білого шуму.

Дисперсія білого праву σ^2	Коефіцієнт кореляції <i>r</i>				
опого шуму о	LSB	NIA			
1.10-2	0,04	0,32			
1.10-3	0,12	0,76			
1.10^{-4}	0,36	0,95			
3.10-5	0,57	0,97			
8.10-6	0,82	0,975			
4.10-6	0,89	0,975			
1.10-6	0,98	0,9761			
5.10-7	0,99	0,9763			

Аналіз наведених у таблиці даних вказує на те, що за відсутності або досить малих значеннях дисперсії шуму є сенс використовувати алгоритм, заснований на методі LSB, через високий коефіцієнт кореляції та меншу обчислювальну складність, при цьому отримані закодовані зображення при роздрукуванні дозволяють економніше використовувати тонер. Однак вже при незначному зростанні дисперсії шуму, навіть до значення $\sigma^2 = 4 \cdot 10^{-6}$, метод LSB використовувати вже не можна, оскільки коефіцієнт кореляції падає нижче 0,9. Натомість алгоритм NIA демонструє завадостійкість аж до значення дисперсії шуму $\sigma^2 = 5 \cdot 10^{-3}$.

Висновки

Таким чином, в результаті моделювання було встановлено, що при використанні широко розповсюдженого для вбудовування ЦВЗ в просторову область зображення методу LSB для забезпечення невидимості ЦВЗ максимальна яскравість монохромного водяного знаку на тлі монохромного контейнера не повинна перевищувати 2% від яскравості останнього і 6% у випадку кольорового зображення контейнера. При використанні ж запропонованого алгоритму NIA значення відносної яскравості складають, відповідно, 5 та 15%. Щодо завадостійкості ЦВЗ до впливу білого шуму, то дисперсія шуму, за якої коефіцієнт кореляції знаходиться на рівні 0,9, для NIA виявилася вищою на два порядки, ніж для LSB, завдяки вищій відносній яскравості ЦВЗ.

Таким чином, запропонований алгоритм дозволяє адаптувати зображення ЦВЗ до впливу шумів та забезпечити його неушкоджений вигляд, при цьому сам процес вбудовування додаткової інформації в контейнер не призводить до змін його параметрів після витягнення ЦВЗ.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Mohanty S. P., Sengupta A., Guturu P., Kougianos E. Everything you want to know about watermarking: from paper marks to hardware protection. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 2017, vol. 6, no. 3, pp. 83–91, https://doi.org/10.1109/MCE.2017.2684980

2. Chandramouli R., Memon N., Rabbani M. Digital watermarking. *Encyclopedia of Imaging Science and Technology*. Ed. by J. P. Hornak. Hoboken, NJ, Wiley, 2002.

3. Наріманова О.В., Семенченко Д.М. Метод захисту QR-коду з використанням цифрового водяного знаку. *Інформатика та мат. методи в моделюванні*, 2013, т. 3, № 4, с. 361–368.

4. Кушниренко О.А., Садченко А.В., Троянский А.В. Повышение помехоустойчивости "скользящего" корреляционного алгоритма распознавания печатных символов. Восточно-Европейский журнал передовых технологий, 2014, vol. 4, no. 2 (70), с. 32–36. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.26303 (Rus)

5. Wang X., Zhang S., Wang L. et al. Locally optimum image watermark decoder by modeling NSCT domain difference coefficients with vector based Cauchy distribution. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2019, vol. 62, pp. 309–329, https://doi.org/10.1016/j.jvcir.2019.05.012

6. Li H., Guo X. Embedding and extracting digital watermark based on DCT algorithm. *Journal of Computer and Communications*, vol. 6, no.11, pp. 287–298. https://doi.org/10.4236/jcc.2018.611026

7. Niu P., Wang X., Yang H. et al. A blind watermark algorithm in SWT domain using bivariate generalized Gaussian distributions. *Multimedia Tools and Applications*, 2020, vol. 79, pp. 13351–13377, https://doi.org/10.1007/s11042-019-08504-1

8. Садченко А. В, Кушніренко О. А., Кушніренко Н. П. та ін. Модифікований адитивний метод вбудови цифрового водяного знаку. *Труди XXI МНПК «Сучасні інформаційні та електронні технології»*, Україна, м. Одеса, 2020, с. 21–23.

9. Sinha Roy S., Basu A., Chattopadhyay A. et al. Hardware execution of a saliency map based digital image watermarking framework. *Multimedia Tools and Applications*, 2021, vol. 80, pp. 27245–27258, https://doi.org/10.1007/s11042-021-11046-0

10. Яремчук Ю. Є., Карпінець В. В., Зоря І. С., Козак Д. О. Підвищення стійкості цифрових водяних знаків у потокових відеозаписах на основі диференціального вбудовування енергії (DEW). Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2023, № 1, с. 55-64. https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-166-1-55-64

11. Yongqiang Ma, Wei Sun, Jing Bian et al. Embedding and extraction of color image digital watermark based on quaternion fourier transform. *International Journal of Frontiers in Sociology*, 2021, vol. 3, iss. 17, pp. 1–7. https://doi.org/10.25236/IJFS.2021.031701

12. Wang H. Research on digital image blind watermarking algorithm based on DCT domain. *Modern Vocational Education*, 2016, no. 14, pp. 76–77.

13. Sadchenko A., Kushnirenko O., Plachinda O. Fast lossy compression algorithm for medical images. *Proc. of the 2016 International Conference on Electronics and Infor-mation Technology*

(*EIT 2016*). Ukraine, Odesa, 2016, https://doi.org/10.1109/ ICEAIT.2016.7500995

14. Gonzalez-Lee M., Vazquez-Leal H., Gomez-Aguilar J.F. et al. Exploring the cross-correlation as a means for detecting digital watermarks and its reformulation into the fractional calculus framework. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 71699–71718, https://doi. org/10.1109/ACCESS.2018.2882405

15 Садченко А. В., Кушниренко О. А., Троянский А. В., Савчук Ю. А. Адаптивный алгоритм снижения уровня импульсного шума на изображениях с камер видеонаблюдения. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2021, № 1–2, с. 21–27. https://doi.org/10.15222/TKEA2021.1-2.21

16. Hemdan E. E.-D. An efficient and robust watermarking approach based on single value decompression, multi-level DWT, and wavelet fusion with scrambled medical images. *Multimedia Tools*

DOI: 10.15222/TKEA2024.1-2.33 UDC 004.056.55 and Applications, 2021, vol. 80, no. 2, pp. 1749-1777. https://doi. org/10.1007/s11042-020-09769-7

17. Veni M., Meyyappan T. Digital image watermark embedding and extraction using oppositional fruit fly algorithm. *Multimedia Tools and Applications*, 2019, vol. 78, no. 19, pp. 27491–27510. https://doi. org/10.1007/s11042-019-7650-0

18. Sharma S. S., Chandrasekaran V. A robust hybrid digital watermarking technique against a powerful CNN-based adversarial attack. *Multimedia Tools and Applications*, 2020, vol. 79, no. 43, pp. 32769–32790. https://doi.org/10.1007/s11042-020-09555-5

Дата надходження рукопису до редакції 15.05 2024 р.

A. V. SADCHENKO, O. A. KUSHNIRENKO

Ukraine, Odessa, Odessa Polytechnic National University E-mail: koa@opu.edu.ua

NOISE IMMUNITY ALGORITHM FOR EMBEDDING A DIGITAL WATERMARK IN MEDICAL IMAGES

When storing and transferring printed medical materials, such as tomograms or radiographs, there is a need to protect additional information from unauthorized access. This information includes personal data of the patient and a summary of the medical history, and it can be added to the medical image (container) in the form of a watermark. Existing algorithms for embedding digital watermarks (DWM) in graphic objects distort the initial characteristics of the container image, which in the case of medical images can lead to a misdiagnosis. This study aimed to develop a distortion- and noise-resistant algorithm for embedding the DWM in the spatial domain of a medical image intended for storage on paper (as a printout).

The article initially considered the possibilities of using the method of modifying the least significant bits of image pixel brightness or the LSB algorithm. Mathematical modeling in Matlab showed that the maximum brightness of the DWM guaranteeing its invisibility cannot exceed 2% of the maximum brightness of the container image for monochrome images, and 6% for color images. The maximum value of the white noise dispersion, at which it is possible to single out a DWM with a correlation coefficient of at least 0.9 was 0.0001.

We prorose a new noise immune algorithm (NIA) for embedding the DWM in the subpixels of the main image, which, after extracting the DWM, are not used to build the container image. In the absence of noise, there are no distortions of the original medical image whatsoever. The essence of the NIA is as follows. The size of the original image in the form of a two-dimensional array is quadrupled by adding a subpixel in each row and column with a brightness equal to the average arithmetic brightness of neighboring pixels. A DWM with the same size as the original image is added to the resulting subpixels. Matlab modeling showed that the DWM would remain invisible at a relative brightness of approximately 5% for monochrome container images and 15% for color images. For the NIA algorithm, the maximum value of the white noise dispersion to obtain a correlation coefficient of 0.9 is 0.005, which means that the noise immunity of the proposed method is significantly higher than that of the LSB-based algorithm.

Keywords: digital watermark, paper carrier, image, adaptive algorithm, space scaling, noise, information distortion.

REFERENCES

1. Mohanty S. P., Sengupta A., Guturu P., Kougianos E. Everything you want to know about watermarking: from paper marks to hardware protection. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 2017, vol. 6, no. 3, pp. 83–91, https://doi.org/10.1109/MCE.2017.2684980

2. Chandramouli R., Memon N., Rabbani M. Digital watermarking. *Encyclopedia of Imaging Science and Technology*. Ed. by J. P. Hornak. Hoboken, NJ, Wiley, 2002.

3. Narimanova O.V., Semenchenko D.M. Digital water marking approach for QR-code protection Informatics and Mathematical Methods in Simulation, 2013, vol. 3, iss. 4, pp. 361–368. (Ukr)

4. Kushnirenko O.A., Sadchenko A.V., Trojanskij A.V. Improving noise immunity of "sliding" correlation algorithm for printable characters recognition. *Eastern-European Journal of Enterprise* *Technologies*, 2014, vol. 4, no. 2 (70), pp. 32–36. https://doi. org/10.15587/1729-4061.2014.26303 (Rus)

5. Wang X., Zhang S., Wang L. et al. Locally optimum image watermark decoder by modeling NSCT domain difference coefficients with vector based Cauchy distribution. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2019, vol. 62, pp. 309–329, https://doi.org/10.1016/j.jvcir.2019.05.012

6. Li H., Guo X. Embedding and extracting digital watermark based on DCT algorithm. *Journal of Computer and Communications*, vol. 6, no.11, pp. 287–298. https://doi.org/10.4236/jcc.2018.611026

7. Niu P., Wang X., Yang H. et al. A blind watermark algorithm in SWT domain using bivariate generalized Gaussian distributions. *Multimedia Tools and Applications*, 2020, vol . 79, pp. 13351–13377, https://doi.org/10.1007/s11042-019-08504-1

8. Sadchenko A. V., Kushnirenko O. A., Kushnirenko N. P. et al. Modified additive method of embedding a digital watermark. *Proc. of the XXI International scientific-practical conference "Modern information and electronic technologies"*, Ukraine, Odesa, 2020, pp. 21–23. (Ukr)

9. Sinha Roy S., Basu A., Chattopadhyay A. et al. Hardware execution of a saliency map based digital image watermarking framework. *Multimedia Tools and Applications*, 2021, vol. 80, pp. 27245–27258, https://doi.org/10.1007/s11042-021-11046-0

10. Yaremchuk Y. Y., Karpinets V. V., Zoria I. S., Kozak D. O. Improving the resistance of digital watermarks in streaming videos based on differential energy watermarking (DEW), *Visnyk of Vinnytsia Polytechnical Institute, 2023*, no. 1, pp. 55–64, https://doi. org/10.31649/1997-9266-2023-166-1-55-64 (Ukr)

11. Yongqiang Ma, Wei Sun, Jing Bian et al. Embedding and extraction of color image digital watermark based on quaternion fourier transform. *International Journal of Frontiers in Sociology*, 2021, vol. 3, iss. 17, pp. 1–7. https://doi.org/10.25236/IJFS.2021.031701

12. Wang H. Research on digital image blind watermarking algorithm based on DCT domain. *Modern Vocational Education*, 2016, no. 14, pp. 76–77.

13. Sadchenko A., Kushnirenko O., Plachinda O. Fast lossy compression algorithm for medical images. *Proc. of the 2016 International Conference on Electronics and Infor-mation Technology*

(EIT 2016). Ukraine, Odesa, 2016, https://doi.org/10.1109/ ICEAIT.2016.7500995

14. Gonzalez-Lee M., Vazquez-Leal H., Gomez-Aguilar J.F. et al. Exploring the cross-correlation as a means for detecting digital watermarks and its reformulation into the fractional calculus framework. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 71699–71718, https://doi.org/10.1109/ ACCESS.2018.2882405

15. Sadchenko A. V., Kushnirenko O. A., Troyanskiy A. V., Savchuk Yu. A. Adaptive algorithm for reducing pulse noise level in images from CCTV cameras. *Tekhnologiya i Konstruirovanie v Elektronnoi Apparature*, 2021, no. 1–2, pp. 21–27. https://doi. org/10.15222/TKEA2021.1-2.21 (Rus)

16. Hemdan E. E.-D. An efficient and robust watermarking approach based on single value decompression, multi-level DWT, and wavelet fusion with scrambled medical images. *Multimedia Tools and Applications*, 2021, vol. 80, no. 2, pp. 1749–1777. https://doi. org/10.1007/s11042-020-09769-7

17. Veni M., Meyyappan T. Digital image watermark embedding and extraction using oppositional fruit fly algorithm. *Multimedia Tools* and Applications, 2019, vol. 78, no. 19, pp. 27491–27510. https:// doi.org/10.1007/s11042-019-7650-0

18. Sharma S. S., Chandrasekaran V. A robust hybrid digital watermarking technique against a powerful CNN-based adversarial attack. *Multimedia Tools and Applications*, 2020, vol. 79, no. 43, pp. 32769–32790. https://doi.org/10.1007/s11042-020-09555-5

Опис статті для цитування:

Садченко А. В., Кушніренко О. А. Неспотворюючий алгоритм вбудовування цифрового водяного знаку у медичні зображення. Технологія та конструювання в електронній апаратурі, 2024, № 1–2, с. 33–42. http://dx.doi.org/10.15222/ ТКЕА2024.1-2.33

Sadchenko A. V., Kushnirenko O. A. Noise immunity algorithm for embedding a digital watermark in medical images. Technology and

Cite the article as:

embedding a digital watermark in medical images. Technology and design in electronic equipment, 2024, no. 1–2, pp. 33–42. http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2024.1-2.33

Пархомей І., Козловський В., Гнатюк С., Рябий М. Методи безпечної обробки інформації у багатопозиційних системах радіолокації. — Київ : Видавництво «Центр навчальної літератури», 2018. 232 с.

У монографії розглянуто проблеми формування, обробки та захисту радіолокаційної інформації в системах радіобачення авіаційно-наземного базування зі змінною відносною просторовою конфігурацією при дистанційному зондуванні радіопомітних об'єктів та об'єктів спостереження з радіопоглинальною поверхнею. Матеріал враховує останні досягнення в галузі радіолокації та безпечних телекомунікаційних технологій.

Розрахована на широке коло читачів: наукових працівників, докторантів, аспірантів, магістрантів та інженерів.

ор Парисијан алери) Исстанскичи српи) Бизток Мерослав Ребич)

МЕТОДИ БЕЗПЕЧНОЇ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ У БАГАТОПОЗИЦІЙНИХ СИСТЕМАХ РАДІОЛОКАЦІЇ

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

УДК 536.248.2

Д. т. н. В. Ю. КРАВЕЦЬ¹, Г. С. ШЕПЕЛЬ¹, PhD Д. І. ГУРОВ¹, А. О. ДАНИЛОВИЧ²

Україна, м. Київ, ¹КПІ ім. Ігоря Сікорського; ²ІСТЕ СБУ E-mail: kravetz_kpi@ukr.net

ВПЛИВ ГЕОМЕТРИЧНИХ ФАКТОРІВ НА ТЕПЛОПЕРЕДАВАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВОФАЗНИХ ТЕРМОСИФОНІВ

Наведено експериментально отримані теплопередавальні характеристики двофазних термосифонів різної довжини, заправлених водою. Дослідження проводилося при вертикальній орієнтації у просторі. Довжина зони конденсації не змінювалася. Показано вплив коефіцієнта заповнення та ефективної довжини термосифонів на мінімальний термічний опір, максимальний тепловий потік, еквівалентну теплопровідність та інтенсивність тепловіддачі в зоні нагрівання.

Ключові слова: термосифон, ефективна довжина, термічний опір, тепловий потік, еквівалентна теплопровідність, орієнтація у просторі.

Багаторічне використання пасивного способу транспортування тепла за допомогою двофазних пристроїв, таких як теплові труби (TT) та закриті двофазні термосифони (3ДT), довело його ефективність і призвело до величезної популярності.

Закриті двофазні термосифони є різновидом теплових труб, в яких відсутня капілярна структура [1]. Вони знайшли широке застосування у багатьох галузях техніки, наприклад у хімічній і нафтовій промисловості, електроніці, телекомунікаційних пристроях, системах зберігання енергії, нагрівальних системах, які видобувають тепло з ґрунту, тощо.

Особливістю роботи ЗДТ є те, що повернення сконденсованого теплоносія із зони конденсації (ЗК) до зони нагрівання (ЗН) здійснюється за допомогою сил тяжіння, тому передача теплоти в них може відбуватися тільки в умовах дії гравітації [2]. Такого виду термосифони можна використовувати в набагато ширших теплових і температурних діапазонах, ніж ТТ з капілярною структурою, оскільки вони мають низьке значення опору руху як парорідинної суміші від ЗН до ЗК, так і конденсату у зворотному напрямку. Проте ЗДТ, як і теплові труби, мають обмеження за величиною максимального теплового потоку, яка пов'язана з низкою таких визначних факторів, як теплофізичні властивості теплоносія (в'язкість, теплота пароутворення, теплоємність, густина, коефіцієнт поверхневого натягу рідини) і геометричні характеристики термосифонів (внутрішній діаметр, довжина зон нагріву та конденсації, кількість теплоносія) [3-5].

У [6] при використанні геотермальної теплоти було показано, що температура ґрунту відіграє вирішальну роль у впливі на теплові характеристики термосифона. При цьому збільшення довжини його зони нагріву від 150 до 250 метрів призводить до збільшення вихідної теплової потужності приблизно на 45%. Таке використання термосифонів для виробництва екологічно чистої енергії зменшує вплив наслідків зміни клімату.

Двофазні закриті термосифони широко використовуються і в регіонах вічної мерзлоти завдяки їхньому гарному охолоджувальному ефекту [7]. Застосування заправленого аміаком сталевого термосифона показало, що зміна кута нахилу суттєво впливає на процес теплопередачі та розподіл температури всередині ЗДТ. При цьому найкращі теплопередавальні характеристики спостерігалися при куті нахилу 10°.

Одним з критеріїв ефективної роботи термосифонів є низький термічний опір *R* при максимальній потужності, що передається Q_{\max} . Величина термічного опору залежить від інтенсивності тепловіддачі в зонах нагріву і конденсації. У роботі [8] було проведено дослідження термічного опору мідного двофазного термосифона довжиною 0,2 м з внутрішним діаметром $d_{\rm BH} = 6 \cdot 10^{-3}$ м. Випробування прово-дилися при зміні коефіцієнта заповнення K_3 від 30 до 100%, як теплоносій використовувалася дистильована вода та фторорганічні діелектричні рідини (FC-84, FC-77, FC-3283). У роботі вказується, що при малому тепловому потоку діелектричні рідини мають нижчий термічний опір порівняно з водою, а при збільшенні теплового потоку — навпаки. Також було показано, що величини R в зоні випаровування і конденсації практично однакові. Однак в [9] зазначається, що основний внесок в сумарний термічний опір вносить зона нагріву, де відбувається процес бульбашкового кипіння, а також впливає кількість заповненого теплоносія та довжина зон теплообміну.

Так, в [10] проводилися дослідження впливу довжини зони нагріву (випаровування) і величини заправки теплоносієм на теплопередавальні характеристики термосифона довжиною 980 мм і внутрішнім діаметром 32 мм. Було показано, що істотний вплив має ступінь заповнення. Однак порівняння коефіцієнтів тепловіддачі в зоні випаровування з отриманими за відомою формулою Ітига [11] показало значне розходження. Причому однозначності щодо впливу ступеня заповнення на інтенсивність тепловіддачі виявлено не було. Але очевидно, що на неї також впливають і внутрішній діаметр парового простору термосифона, і його довжина. Хоча процес бульбашкового кипіння в зоні випаровування відбувається при високих значеннях коефіцієнта тепловіддачі, зміна *d*_{ви} призводить до зміни умов виникнення парових бульбашок. При цьому, якщо враховувати періодичні викиди теплоносія до зони конденсації [12], коефіцієнт тепловіддачі буде змінюватися також і в часі, що своєю чергою впливатиме на значення сумарного термічного опору.

Зауважимо, що більшість опублікованих досліджень присвячено визначенню термічного опору і максимального теплового потоку для конкретних конструкцій двофазних термосифонів, і вкрай мало публікацій — вивченню впливу конструктивних особливостей (довжини зон нагріву і конденсації, а також ефективної довжини термосифонів) на їхні теплопередавальні характеристики.

Метою цієї роботи було дослідження особливостей процесу теплообміну у випарно-конденсаційних апаратах (термосифонах) при зміні геометричних параметрів. Для досягнення поставленої мети проводилося вивчення впливу ефективної довжини та коефіцієнта заповнення термосифонів на їхні теплопередавальні характеристики.

Об'єкт досліджень

Об'єктом дослідження були три мідні термосифони різної довжини, заповнені однаковою кількістю теплоносія — дистильованою водою. Кількість рідини була однаковою для всіх термосифонів. Вона контролювалася ваговим методом і визначалася коефіцієнтом заповнення K_3 , що являє собою відношення об'єму рідини V_p до внутрішнього об'єму зони на-

Характеристики досліджуваних термосифонів

Внутрішній діаметр, <i>d</i> _{вн} ,мм	9,0
Загальна довжина, l_{Σ} , мм	500; 700; 1000
Довжина зони нагріву, І _{зн} , мм	50; 100; 150; 200
Довжина зони конденсації, l _{3K} , мм	200
d _{3H} /l _{3H}	0,18; 0,09; 0,06; 0,045
Коефіцієнт заповнення, <i>К</i> ₃	1,2; 0,6; 0,4; 0,3

гріву $V_{3\rm H}$ термосифона ($K_3 = V_p/V_{3\rm H}$), а при однаковому внутрішньому діаметрі $d_{\rm BH}$ розраховується як відношення висоти заповнення теплоносієм L_p до довжини зони нагріву $L_{3\rm H}$: $K_3 = L_p/L_{3\rm H}$. Величина K_3 змінювалася варіацією довжини зони нагріву при однаковій L_p , яка дорівнювала 60 мм.

Характеристики експериментальних зразків досліджуваних мініатюрних термосифонів, наведено у **таблиці**.

Експериментальна установка

Теплопередавальні характеристики термосифонів досліджували на експериментальній установці, схему якої представлено на **рис. 1**. Орієнтація термосифона в просторі — вертикальна. Теплоту до зони нагріву підводили за допомогою електричного нагрівача 2, який намотувався на корпус термосифона поверх термостійкої діелектричної плівки товщиною 0,1·10⁻³ м. Для зменшення втрат теплоти в навколишнє середовище термосифон теплоізолювали базальтовим волокном.

Теплота від зони конденсації відводилася проточною водою через конденсатор типу "труба в трубі" 3, витрата контролювалася за показаннями ротаметра 8. Температура в основних зонах термосифонів визначалася за допомогою мідь-константанових термопар 11 (діаметр електродів 0,16·10⁻³ м). Гарячі спаї термопар припаювалися до корпусу термосифона 1. Сигнал від термопар через аналого-цифровий перетворювач 9 передавався на персональний комп'ютер 10.



Рис. 1. Схема експериментальної установки з дослідження теплопередавальних характеристик термосифонів:

1 — двофазний закритий термосифон; 2 — омічний нагрівач зони випаровування; 3 — конденсатор типу "труба в трубі"; 4 — ватметр; 5 — лабораторний автотрансформатор;
 6 — стабілізатор напруги; 7 — напірний бак; 8 — ротаметр РМ 025Ж; 9 — аналогово-цифровий перетворювач; 10 — персональний комп'ютер; 11 — мідь-константанові термопари (8 шт.); 12 — мідь-константанові термопари для контролю температури охолоджувальної води (по одній на вході та виході конденсатора)

Абсолютна похибка вимірювання термопар не перевищувала 0,1°С. Підвод теплоти до зони нагріву термосифона контролювався за допомогою лабораторного автотрансформатора 5 за показаннями ватметра 4.

Методика проведення експерименту

Дослідження проводилися при ступінчастому підводі теплоти. Експеримент закінчувався тоді, коли температура в зоні нагріву починала некеровано різко підвищуватися (через виникнення плівкового режиму кипіння). Перехід на наступний крок виконувався після встановлення сталого режиму, коли температури всіх зон теплообміну вже не змінювалися з часом.

Термічний опір термосифонів визначався як відношення різниці між зовнішніми середніми температурами зон нагріву \overline{t}_{3H} і конденсації \overline{t}_{3K} до теплового потоку, що передається пристроєм $Q_{\text{від}}$:

$$R = \frac{\overline{t_{3H}} - \overline{t_{3K}}}{\mathcal{Q}_{\text{Bin}}}.$$
(1)

Тепловий потік, що відводився від термосифона, розраховувався як

$$Q_{\rm Big} = GC_p \left(t_{\rm BHX} - t_{\rm BX} \right), \tag{2}$$

де G — витрата води, що охолоджувала зону конденсації;

 C_p — питома теплоємність; $t_{\rm bxx}, t_{\rm bux}$ — температура води до та після входу в конден-

Відносну похибку визначення теплового потоку $\delta Q_{\rm Bin}$, який відводиться від зони конденсації за допомогою охолоджувальної рідини, та термічного опору δR розраховували за залежностями

$$\delta Q_{\rm Big} = \sqrt{\delta \Delta t^2 + \delta G^2 + \delta C_p^2} \cdot 100; \tag{3}$$

$$\delta R = \sqrt{\delta \Delta t^2 + \delta Q_{\text{від}}^2} \cdot 100.$$
(4)

Похибка визначення $Q_{\rm від}$ не перевищувала 5%, а термічного опору R - 7 %.

Розрахунок еквівалентного коефіцієнта теплопровідності термосифонів проводився за формулою

$$\lambda_{\rm eKB} = \frac{Q_{\rm Big} l_{\rm edp}}{F_{\rm TC}(\overline{t}_{\rm 3H} - \overline{t}_{\rm 3K})},\tag{5}$$

де $F_{\rm TC}$ — зовнішня площа перерізу термосифону;

- відстань між серединами зон нагріву і конденl_{eф} санії.

Результати дослідження

Зміна довжини термосифона при збереженні довжини зон нагріву (l_{3H}) і конденсації (l_{3K}) й однаковій кількості теплоносія впливає на їхню теплопередавальну здатність. При цьому основним фактором, від якого це залежить, є ефективна довжина термосифона $l_{e\phi}$ (рис. 2).



Рис. 2. Схема передачі теплоти в термосифонах різної довжини l_{тс} при однаковій довжині зон нагріву та конденсації ($K_2 = 0,3$)

Збільшення l_{еф}, що відповідає також зростанню адіабатної зони термосифона, впливає на гідродинамічну картину передачі теплоти від зони нагріву до зони конденсації. При цьому втрата тиску в паровому каналі підвищується.

Швидкість руху пару в термосифоні змінюється залежно від теплового потоку і, відповідно, внутрішнього тиску. Без урахування захвату деякої частини рідини та товщини плівки конденсату швидкість пару в зоні транспорту можна розрахувати як

$$W_{\rm n} = \frac{Q_{\rm Big}}{r\rho'' F_{\rm nn}},\tag{6}$$

де *r* — теплота пароутворення;

 ρ'' — густина пару;

F_{пп} — площа поперечного перерізу внутрішньої частини термосифона.

Розрахунок швидкості руху парорідинної суміші у зоні транспорту показав, що при збільшенні l_{eb} швидкість трохи підвищується (рис. 3).

Розрахунок числа Рейнольдса під час руху парорідинної суміші показав, що воно не переви-





щувало 2000 для всіх досліджуваних термосифонів. Тобто можна вважати, що характер течії пару в зоні транспорту є ламінарним, а коефіцієнт тертя визначити як

$$\varsigma'' = \frac{64}{Re}.\tag{7}$$

Залежно від теплового потоку, що відводиться термосифоном, коефіцієнт тертя змінюється від 0,03 до 0,3, причому малим значенням $Q_{\rm від}$ відповідають максимальні коефіцієнти тертя. При максимальних теплових потоках для $l_{\rm eq}$ =300 мм коефіцієнт тертя складав 0,03, при $l_{\rm eq}$ =500 мм він збільшувався до 0,06, а при $l_{\rm eq}$ =800 мм дорівнював 0,07. Однак розрахунок втрати тиску $\Delta P''$ в зоні транспорту за залежністю [13]

$$\Delta P'' = \frac{\varsigma'' l_{\rm eq} Q_{\rm Big}^2}{2d_{\rm BH} r^2 F_{nn}^2 \rho''} \tag{8}$$

показав значно більший вплив на неї ефективної довжини, ніж характер течії парорідинної суміші. Так, при $Q_{\rm Bid}$ = 150 Вт збільшення $l_{\rm eq}$ з 300 до 800 мм призводить до зростання швидкості приблизно у 1,5 раза, тоді як втрати тиску в зоні транспорту зростають приблизно у 5 разів (**рис. 4**). Такі втрати тиску впливають на максимальний тепловий потік, який суттєво зменшується при зростанні $l_{\rm eq}$, а ось термічний опір знаходиться приблизно на одному рівні (**рис. 5**).

Свій внесок у величину термічного опору робить і коефіцієнт заповнення. Його зміна відповідає різним значенням довжини зони нагріву за однакової кількості теплоносія. Зменшення довжини зони нагріву l_{3H} (збільшення K_3) призводить до зростання термічного опору у всьому діапазоні досліджених теплових потоків (**рис. 6**).

З рис. 6 видно, що при збільшенні теплового потоку спостерігається монотонне зниження термічного опору, але його величина залежить від довжи-





Рис. 5. Залежність термічного опору термосифонів з різною ефективною довжиною l_{eb} від теплового потоку ($K_3 = 0,3$)



Рис. 6. Залежність термічного опору термосифона довжиною 700 мм ($l_{e\varphi}$ =500 мм) від теплового потоку при різних значеннях коефіцієнта заповнення K_{z}

ни зони нагріву і, відповідно, від коефіцієнта заповнення. При $K_3 = 1,2$ ($l_{3H} = 50$ мм) теплоносій повністю розташовується у зоні нагріву. При $K_3 = 0,3$ ($l_{3H} = 200$ мм) тільки 30% зони нагріву зайнято теплоносієм, а 70% поверхні вкрито плівкою конденсату, що повертається із зони конденсації. Інтенсивність тепловіддачі цієї поверхні значно вища ніж поверхні, повністю заповненої рідиною, тому відведена теплота в цьому випадку підвищується, а термічний опір зменшується.

Коефіцієнт еквівалентної теплопровідності $\lambda_{\text{екв}}$, розрахований за формулою (5), також залежить від K_3 . Як видно з **рис. 7**, для окремого термосифона при зміні K_3 максимальні значення $\lambda_{\text{екв}}$ спостерігаються при $K_3 = 0,3$. При збільшенні $l_{\text{еф}}$ еквівалентна теплопровідність зменшується, в цьому випадку основним фактором впливу є коефіцієнт заповнення K_3 .

Зворотна картина спостерігається при фіксованому K_3 і різній довжині термосифонів l_{TC} . При збільшенні l_{TC} , коли, відповідно, підвищується й ефективна довжина $l_{e\phi}$, еквівалентна теплопровідність також зростає. Вплив довжини термосифона на неї можна побачити на **рис. 8**. Тут видно, що при збільшенні довжини термосифона удвічі (від 0,5 до 1,0 м) величина λ_{exp} зростає приблизно у п'ять разів. При цьому, од-



Рис. 7. Залежність еквівалентної теплопровідності λ_{екв} термосифона довжиною 700 мм від теплового потоку при різних коефіцієнтах заповнення K₃



Рис. 8. Залежність еквівалентної теплопровідності $\lambda_{e_{KB}}$ термосифонів різної довжини l_{TC} від теплового потоку $(K_3=0,3)$

нак, для термосифонів більшої довжини суттєво зменшується величина максимального теплового потоку.

Висновки

Таким чином, проведене дослідження показало вплив різних факторів на теплопередавальні властивості термосифонів. Так, зі збільшенням довжини зони транспорту й, відповідно, ефективної довжини $l_{\rm e\phi}$ суттєво зростають втрати тиску, еквівалентна теплопровідність, максимальні теплові потоки зменшу-

ються. При цьому термічний опір майже не залежить від $l_{e\varphi}$, а ось підвищення коефіцієнта заповнення призводить до його зростання і до зменшення коефіцієнта еквівалентної теплопровідності.

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕПЛОВИХ РЕЖИМІВ

Визначені особливості процесу теплообміну у термосифонах при зміні геометричних параметрів можуть стати у пригоді при пошуку їхньої оптимальної конструкції.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Reay D., Kew P., Mcglen R. *Heat pipes theory, design and applications*. USA, Published by Elsevier LTD, 2014, 251 p.

2. Faghri A. *Heat pipe science and technology*. Philadelphia, PA: Taylor & Francis, 1995, 849 p.

3. Franco A., Filippeschi S. Closed loop two-phase thermosyphon of small dimensions: a review of the experimental results. *Microgravity Sci. Technol.*, 2012, vol. 24, pp. 65–79.

4. Di Marco P., Filippeschi S., Franco A., Jafari D. Theoretical analysis of screened heat pipes for medium and high temperature solar applications. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, 547:012010. https://doi.org/10.1088/1742-6596/547/1/012010

5. Peterson G. P. An Introduction to Heat Pipes: Modeling, Testing and Applications, John Wiley & Sons, New York, NY, September 1994, 356 p.

6. Zolfagharroshan M., Zueter A. F., Tareen M. S.K. et al. Twophase closed thermosyphons (TPCT) for geothermal energy extraction: A computationally efficient framework. *Applied Thermal Engineering*, 2024, vol. 248, part B, art. 123205. https://doi.org/10.1016/j. applthermaleng.2024.123205

7. Wang Yi., Wang Xi, Wang Ju. Heat transfer performance of a two-phase closed thermosiphon with different inclination angles based on the core-tube monitoring, *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, vol. 42, art. 102738. https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102738

8. Jouhara H., Robinson A. J. Experimental investigation of small diameter two-phase closed thermosyphons charged with water, FC-84, FC-77 and FC-3283. *Applied Thermal Engineering*, 2010, vol. 30(2-3), pp. 201-211. https://doi.org/10.1016/j. applthermaleng.2009.08.007

9. Безродный М. К., Пиоро И. Л., Костюк Т. О. Процессы переноса в двухфазных термосифонных системах. Теория и практика. Киев, Факт, 2005, 704 с.

10. Kannan M., Senthil R., Baskaran R., Deepanraj B. An experimental study on heat transport capability of a two phase thermosyphon charged with different working fluids. *American Journal of Applied Sciences*, 2014, vol. 11, no. 4, pp. 584–591. https://doi. org/10.3844/ajassp.2014.584.591

11. Imura H., Sasaguchi K., Kozai H. Critical heat flux in a closed two phase thermosyphon, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1983, vol. 26, iss. 8, pp. 1181–1188.

12. Кравец В. Ю., Письменный Е. Н., Коньшин В. И. Пульсационные явления в закрытых двухфазных термосифонах. Збірник наук. праць СНУЯЕ та П, 2009, вип. 4(32), с. 39–46.

13. Кравець В.Ю. Процеси теплообміну у мініатюрних випарно-конденсаційних системах охолодження. Харьків, ФОП Бровін О.В., 2018, 288 с.

> Дата надходження рукопису до редакції 20.05 2024 р.

DOI: 10.15222/TKEA2024.1-2.43 UDC 536.248.2 V. Yu. KRAVETS¹, A. S. SHEPEL¹, D. I. HUROV¹, A. O. DANYLOVICH²

Ukraine, Kyiv, ¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"; ²ISEE SSU E-mail: romakobylianskyi@ukr.net

INFLUENCE OF GEOMETRIC FACTORS ON THE HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF TWO-PHASE THERMOSYPHONS

Thermosyphons are two-phase closed heat exchange systems that contain a certain amount of liquid and utilize the latent heat of vaporization and condensation to transfer heat between the heat source and the heat sink without any external devices. They are a type of heat pipe that lacks a capillary structure, so the return of the condensed coolant from the condensation zone to the heating zone is driven by gravitational forces. Due to the absence of a capillary structure, thermosyphons exhibit lower resistance to the movement of the vapor-liquid mixture from the heating zone to the condensation zone, as well as to the return flow of the condensate.

A distinctive feature of such systems is their high equivalent thermal conductivity, which is several orders of magnitude greater than that of natural metals (such as copper or silver). Because of their superior heat transfer characteristics, thermosyphons are widely used in various technical fields, including the chemical and petroleum industries, electronics, telecommunications devices, energy storage systems, and geothermal heating systems, among others.

This paper presents experimental data on the heat transfer characteristics of two-phase thermosyphons with an internal diameter of 9 mm and lengths of 500, 700, and 1000 mm, using water as the coolant. The filling ratio (Fr) varied from 0.3 to 1.2. The length of the condensation zone was the same for all thermosyphons. The study was conducted with the thermosyphons oriented vertically at an angle of 90° relative to the horizontal. The influence of the filling ratio and the effective length of the thermosyphons on the minimum thermal resistance, the maximum heat flux, and the equivalent thermal conductivity is analyzed.

Keywords: thermosyphon, effective length, thermal resistance, heat flux, equivalent thermal conductivity, spatial orientation.

REFERENCES

1. Reay D., Kew P., Mcglen R. *Heat pipes theory, design and applications*. USA, Published by Elsevier LTD, 2014, 251 p.

2. Faghri A. *Heat pipe science and technology*. Philadelphia, PA: Taylor & Francis, 1995, 849 p.

3. Franco A., Filippeschi S. Closed loop two-phase thermosyphon of small dimensions: a review of the experimental results. *Microgravity Sci. Technol.*, 2012, vol. 24, pp. 65–79.

4. Di Marco P., Filippeschi S., Franco A., Jafari D. Theoretical analysis of screened heat pipes for medium and high temperature solar applications. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, 547:012010. https://doi.org/10.1088/1742-6596/547/1/012010

5. Peterson G. P. An Introduction to Heat Pipes: Modeling, Testing and Applications, John Wiley & Sons, New York, NY, September 1994, 356 p.

6. Zolfagharroshan M., Zueter A. F., Tareen M. S.K. et al. Twophase closed thermosyphons (TPCT) for geothermal energy extraction: A computationally efficient framework. *Applied Thermal Engineering*, 2024, vol. 248, part B, art. 123205. https://doi.org/10.1016/j. applthermaleng.2024.123205

7. Wang Yi., Wang Xi, Wang Ju. Heat transfer performance of a two-phase closed thermosiphon with different inclination angles based on the core-tube monitoring, *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, vol. 42, art. 102738. https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102738

8. Jouhara H., Robinson A. J. Experimental investigation of small diameter two-phase closed thermosyphons charged with water, FC-84, FC-77 and FC-3283. *Applied Thermal Engineering*, 2010, vol. 30(2-3), pp. 201-211. https://doi.org/10.1016/j. applthermaleng.2009.08.007

9. Bezrodnyy M. K., Pioro I. L., Kostyuk T. O. *Protsessy perenosa* v dvukhfaznykh termosifonnykh sistemakh. Teoriya i praktika [Transfer processes in two-phase thermosiphon systems. Theory and practice]. Kyiv, Fakt, 2005, 704 p. (Rus)

10. Kannan M., Senthil R., Baskaran R., Deepanraj B. An experimental study on heat transport capability of a two phase thermosyphon charged with different working fluids. *American Journal of Applied Sciences*, 2014, vol. 11, no. 4, pp. 584–591. https://doi. org/10.3844/ajassp.2014.584.591

11. Imura H., Sasaguchi K., Kozai H. Critical heat flux in a closed two phase thermosyphon, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1983, vol. 26, iss. 8, pp. 1181–1188.

12. Kravets V. Yu., Pysmennyi E. N., Konshin V. I. [Pulsation phenomena in closed two-phase thermosyphons], *Zbirnyk nauk. prats' SNUYAE ta P*, 2009, iss. 4(32), pp. 39–46. (Rus)

13. Kravets V. Yu. *Protsesy teploobminu u miniatyurnykh vyparno-kondensatsiynykh systemakh okholodzhennya* [Heat exchange processes in miniature evaporative-condensation cooling systems]. Kharkiv, FOP Brovin O.V., 2018, 288 p. (Ukr).

Опис статті для цитування:

Кравець В. Ю., Шепель Г. С., Гуров Д. І., Данилович А. О. Вплив геометричних факторів на теплопередавальні характеристики двофазних термосифонів. Технологія та конструювання в електронній апаратурі, 2024, № 1–2, с. 43–48. http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2024.1-2.43

Cite the article as:

Kravets V. Yu., Shepel A. S., Hurov D. I., Danylovich A. O. Influence of geometric factors on the heat transfer characteristics of two-phase thermosyphons. Technology and design in electronic equipment, 2024, no. 1–2, pp. 43–48. http://dx.doi.org/10.15222/ TKEA2024.1-2.43

УДК 621.385:536.2

Д. т. н. Л. Д. ПИСАРЕНКО, І. Л. ЦИБУЛЬСЬКИЙ

Україна, м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського E-mail: i.l.tsybulskyi@gmail.com

ТЕПЛОФІЗИЧНА МОДЕЛЬ ТЕРМОКАТОДА З ІНДУКЦІЙНИМ НАГРІВАННЯМ

Побудовано теплофізичну модель та розраховано температурне поле циліндричного термокатода з індукційним нагріванням з урахуванням початкових і граничних умов на основі прийняття припущень для спрощення математичної моделі. При індукційному нагріванні катода встановлюється нестаціонарний процес теплопровідності, який описується диференціальним рівнянням теплопровідності. Просторова симетрія циліндричної конструкції індуктивного термокатода дозволяє скоротити кількість просторових змінних, значно спростити функціональні залежності, обмежити алгоритм розв'язання задачі. Проведена оцінка отриманих наближених рішень на коректність прийнятих спрощень. Відображено перепад між температурами зовнішньої та внутрішньої поверхонь катода, який визначає вибір його геометричних розмірів.

Ключові слова: термокатод, індукційне нагрівання, теплофізична модель, математична модель, наближене рішення.

Попит на прилади потужної вакуумної електроніки, функціонування яких засноване на генерації потужних енергетичних потоків вільних електронів та управлінні ними, залишається стабільно високим [1, 2]. Електронні лампи стали основою енергосистем, передавачів та інших систем генерації радіочастот. Потреба в нових високочастотних та мікрохвильових енергетичних вакуумних лампах задовольняється за допомогою нових технологій та матеріалів [3]. Електронні лампи продовжують виконувати цінні функції на високому рівні потужності й, особливо, на високих частотах. Велика потужність вакуумної лампи зумовлена здатністю електродних систем у вакуумі підтримувати високу густину потужності, яка зазвичай становить декілька кіловатів на квадратний сантиметр і може досягати 10 MBт/см² [1]. При такому значенні густини потужності жоден діелектричний матеріал не здатен забезпечити стабільність характеристик.

Основу конструкції електронних ламп та електровакуумних пристроїв різного призначення, таких як, наприклад, пристрої зв'язку, іонні двигуни, термоелектронні перетворювачі енергії, лазери на вільних електронах тощо [4–6], складають якісні термоемісійні катоди — джерела електронів. Останні 50 років більшість комерційних термоемісійних катодів складають катоди В-, S- та М-типу [7].

Судячи з нинішніх тенденцій, можна стверджувати, що в досяжному майбутньому електронновакуумні пристрої не матимуть конкурентів для енергетичних перетворень високої потужності. У зв'язку з необхідністю генерації струмів високої потужності у приладах енергетичного, комунікаційного та технологічного призначень виникла низка теоретичних та практичних завдань [8], і серед першочергових доцільно визначити такі:

 термодинамічні та електродинамічні задачі формування, регулювання, управління та транспортування потужних електронних потоків та процесів [9–15];

— задачі моделювання, аналізу, синтезу, оптимізації та конструювання електронних пристроїв і систем, відповідних технічним завданням [16, 17].

Продуктивність будь-якого електронно-вакуумного приладу визначається точністю проєктування та виготовлення внутрішніх елементів. Серед вимог до оптимальної конструкції лампи є необхідність працювати в умовах високої температури та витримувати механічні навантаження. Звісно, що кожен елемент вакуумного приладу відіграє в цьому свою роль, але базовим тут є термоелектронний катод, а його розроблення — ключовим завданням процесу конструювання вакуумних ламп.

Джерелом електронів термокатодів можуть бути різні матеріали, однак певні їх комбінації є переважними з міркувань продуктивності, надійності та економічності [3, 8]. Необхідну для емісії електронів енергію термокатод в електронній лампі отримує від перетворення електричної енергії на теплову. Катод може нагріватися безпосередньо електричним струмом (пряме розжарювання) [3] або теплообміном з додатковим елементом (непряме розжарювання), а також індукційним [18], лазерним [19] методом. Традиційно нагрівання катода здійснюється високотемпературним резистивним підігрівачем у вигляді спіралі, але в такому випадку конструкція катодно-підігрівального вузла є доволі складною, а надійність та термін служби термокатода напряму

залежать від настання моменту перегоряння підігрівача. Усунути зазначені недоліки дозволяє застосування індукційного підігріву катода. Прикладом вакуумного приладу з катодом, що нагрівається методом індукції, є рентгенівська трубка [2].

Для проєктування ефективних енергетичних вакуумних приладів потрібне розроблення фізикотопологічних моделей, що описують електродинамічні та теплофізичні процеси, пов'язані з властивостями матеріалів та геометрією приладів. Розглянуті у літературі процеси індукційного нагрівання переважно мають відношення до термообробки матеріалів та інших технологічних застосувань [20, 21]. Щодо вакуумних електронних приладів, індукційне нагрівання катода розглянуто для системи зі спіральним індуктором у [22] і катодом у вигляді суцільного циліндра на осі в статті [2].

Метою цієї роботи є побудова теплофізичної математичної моделі та аналіз теплофізичних процесів термокатода з індукційним нагріванням у вигляді циліндричного кільця, коли електромагнітна енергія передається, як у трансформаторі, для якого катод є вторинною короткозамкненою обмоткою.

Математична модель температурного поля термокатода з індукційним нагріванням

Індукційне нагрівання пов'язане з виникненням у провіднику розподілених потоків енергії внаслідок джоулевого тепла, генерованого індукованим струмом. При цьому встановлюється нестаціонарний процес теплопровідності, який описується диференціальним рівнянням теплопровідності з параметрами, залежними від температури:

$$c\gamma \frac{dt}{d\tau} = \operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad} t) + w,$$
 (1)

де *с* — питома теплоємність;

γ — щільність;

- t температура, $t = t(x_1, x_2, x_3, \tau);$
- τ—час;
- λ коефіцієнт теплопровідності;
- w питома потужність, $w = w(x_1, x_2, x_3, \tau);$
- x_i координати, i = 1, 2, 3.

Це рівняння має нескінченну кількість рішень, з яких за допомогою початкових (часових та просторових) умов з'ясовується відповідне до конструкції приладу рішення. Часові крайові умови зазвичай мають вигляд

$$t(x_1, x_2, x_3, 0) = t_0 = \text{const},$$
 (2)

що визначає поле значень температури у початковий момент розрахунку параметрів процесу теплопровідності.

Просторові початкові умови визначають розподіл значень температури на контурних поверхнях області, у якій протікає досліджуваний процес. Умови теплообміну між контурною поверхнею тіла й навколишнім середовищем визначаються завданням розподілу значень змінних на них. Початкова просторова умова описується загальним рівнянням

$$\left[\lambda \frac{\partial t}{\partial w}\right]_{\text{nob}} = f(T_{\text{nob}}, T_{\text{cep}}), \qquad (3)$$

де $T_{\rm cep}, T_{\rm пов}$ — значення температури навколишнього середовища та поверхні тіла відповідно.

Аналітичне розв'язання задачі про теплообмін між тілами в середовищі, описаної виразами (1) — (3), полягає у пошуку інтеграла рівняння, що описує поширення тепла, тобто у знаходженні функції, яка задовольняє самому рівнянню і крайовим умовам. Ця функція відбиває поле температури системи тіл у визначеному середовищі. Знайти точне значення функції розподілу температури (температурного поля) неможливо через відсутність точних аналітичних методів рішення загальних диференціальних рівнянь теплопровідності [22]. Для розв'язання таких задач застосовують припущення, які спрощують математичну модель, і в результаті отримують наближене рішення, достовірність якого визначається коректністю прийнятих припущень.

Просторова симетрія циліндричної конструкції індуктивного термокатода дозволяє скоротити кількість просторових змінних, значно спростити функціональні залежності, обмежити розв'язання задачі знаходженням розподілу температурного поля з забезпеченням достатнього ступеня точності. Розглянемо припущення, які приймаються в нашому випадку.

1. В циліндричній системі координат розподіл температури в термокатоді в момент часу $\tau \in \phi$ ункцією полярних координат: $t=t(r, \phi, z)$.

2. В конструкції приладу струм нагрівання катода генерується трансформатором. Цей струм створює потоки тепла в катоді, який відіграє роль вторинної обмотки трансформатора. Розподіл струму дозволяє знайти розподіл тепла в об'ємі катода. Якщо H — висота вікна трансформатора, h — висота кільця катода, то при h << H можна прийняти, що е.р.с., яка наводиться в катоді, є постійною величиною для будь-якого його елементарного кільцевого сегмента. Відповідно до закону Джоуля — Ленца кількість тепла, що виділяється в такому сегменті катода на момент τ , дорівнює

$$Q_{\rm e} = \frac{U_R^2}{R_{\rm e}} \tau, \tag{4}$$

де U_{R} — е.р.с. у кільцевому сегменті катода (активна складова);

R_e — опір елементарного кільцевого сегмента катода.

Оскільки е.р.с. всіх кільцевих сегментів є сталою у часі (U_R = const), з цієї формули видно, що розподіл тепла всередині сегмента визначається зміною його

опору $R_{\rm e}$. З фізичних уявлень, $R_{\rm e}$ залежить від матеріалу катода та є функцією радіуса r елементарного кільцевого сегмента і температури:

$$R_{\rm e} = \rho_0 (1 + \alpha t) \frac{l_{\rm e}}{S_{\rm e}},\tag{5}$$

де ρ, α — питомий опір та температурний коефіцієнт опору матеріалу катода відповідно;

l_e, *S_e* — довжина середньої лінії елементарного кільцевого сегмента катода та площа його радіального перерізу відповідно.

Використовуючи рівняння (4) та (5), отримаємо

$$Q_{\rm e} = \frac{U_R^2 S_{\rm e} \tau}{\rho_0 (1 + \alpha t) l_{\rm e}}.$$
(6)

З урахуванням довжини лінії $l_e = 2\pi r$ та об'єму $V_e = 2\pi r S_e$ кільцевого сегмента катода кількість тепла, що виділяється в одиниці його об'єму, складе

$$Q_{\rm e}' = \frac{Q_{\rm e}}{V_{\rm e}} = \frac{0.25U_R^2 \tau}{\pi^2 \rho_0 (1 + \alpha t) r^2}.$$
(7)

3. Температура в точці кільцевого сегмента, що змінюється під впливом створюваного струмом потоку теплоти, визначається виразом

$$t_{\tau} = \frac{Q_{\rm e}'}{c(t)\gamma(t)} = \frac{0.25U_R^2 \tau}{\pi^2 \rho_0 (1+\alpha t)c(t)\gamma(t)r^2},$$
(8)

де c(t), $\gamma(t)$ — теплоємність та щільність матеріалу катода як функції температури відповідно.

4. Умови теплообміну на поверхнях катода з навколишнім середовищем можна вважати незалежними від кута φ (**рис. 1**), що математично визначається як $\frac{\partial t}{\partial \varphi} = 0.$ (9)

5. Нехтуючи тепловіддачею з торцевих поверхонь катода порівняно з бічними (торці теплоізольовані — $q_{\tau 1} \approx 0, q_{\tau 2} \approx 0$, див. рис. 1), у першому наближенні отримаємо граничну умову

$$\frac{\partial t}{\partial z} = 0. \tag{10}$$



6. Нагрівання термокатода призводить до динамічних змін його фізичних параметрів: збільшення температури спричиняє збільшення питомого електричного опору і теплоємності, змінюється коефіцієнт теплопровідності та щільність матеріалу. Все це викликає зміну величини електричної потужності, що поглинається катодом, та її розподілу по перерізу катода. При цьому, однак, можна прийняти, що протягом певних проміжків часу процесу нагрівання фізичні параметри зберігають деякі середні значення, які змінюються лише за певних значень температури.

В результаті застосування наведених спрощень рівняння (1) перетворюється у диференційне рівняння з розподіленими змінними

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right) + w';$$
(11)
$$\text{de } \alpha = \frac{\lambda_{\text{cp}}}{c_{\text{cp}} \gamma_{\text{cp}}} = \alpha_{\text{cp}} \neq f(t);$$

$$w' = \frac{Q_e'}{c\gamma} = f(t);$$

f(*t*) — функція, що залежить від температури.

Для повноти визначення задачі необхідно рівняння (11) доповнити початковими умовами. Початкова умова для процесу індуктивного нагрівання катода має вигляд

$$t(r,0) = T_0 = \text{const},\tag{12}$$

де T_0 — температура середовища оточення та катода в початковий момент дії джоулевих джерел тепла (в момент часу $\tau_0 = 0$).

Застосування математичної моделі

Існує широкий клас джерел електронів вакуумних систем з різною температурою катодів, обмежимо розгляд значенням 850°С — середньою температурою оксидних катодів.

У задачі індуктивного нагрівання термокатода у вакуумі теплообмін його поверхні з навколишнім середовищем відбувається шляхом випромінювання за законом Стефана — Больцмана. Математичне вираження таких граничних умов (3-го роду) являє собою нелінійне співвідношення між похідною та функцією:

$$\lambda \frac{\partial t}{\partial r}\Big|_{W} = S\varepsilon\sigma(T_{\text{nob}}^{4} - T_{\text{cep}}^{4}), \qquad (13)$$

де S — площа граничної поверхні катода;

ε — ступінь чорноти поверхні катода;

σ — постійна Стефана — Больцмана.

Враховуючи малі розміри електричних вводів і кріплення катода, їхньою теплопровідністю можна знехтувати.

Для катода, що знаходиться у вакуумі, коли $T_{\text{пов}} >> T_{\text{сер}}$, граничні умови для внутрішньої (індекс

i=1) та зовнішньої (індекс *i*=2) поверхонь з урахуванням теплоізольованих торців можна записати у вигляді

$$\begin{cases} \left| \lambda \frac{\partial t}{\partial r} \right|_{r_{1}} = S_{1} \varepsilon_{1} \sigma T_{1}^{4}; \\ \left| -\lambda \frac{\partial t}{\partial r} \right|_{r_{2}} = S_{2} \varepsilon_{2} \sigma T_{2}^{4}. \end{cases}$$
(14)

де r_i, S_i — радіус та площа поверхні відповідно;

 $\boldsymbol{\varepsilon}_{i}$ — ступінь чорноти поверхні;

T_i — температура поверхні.

Рівняння (11), (12), (14) описують нестаціонарне поле температури термокатода з розподілом тепла за законом (7) з теплоізольованими торцями і теплообміном випромінюванням на бічних поверхнях.

Аналітичне рішення рівняння (11) за граничними умовами (12), (14) пов'язане зі зміною розподілу тепла та нелінійністю граничних умов теплообміну з навколишнім середовищем. Аналітичних методів точного розв'язання такої задачі не існує. Для його знаходження введемо додаткове обмеження у задачу: будемо шукати температурне поле катода в радіальному перерізі у фіксований момент часу т регулярного режиму, коли температура внутрішньої стінки дорівнює $t=T_1$.

В регулярному режимі при однакових видах теплообміну на поверхнях катода різниця температур ΔT на його зовнішній і внутрішній поверхнях при виконанні умови $\Delta T << T_1$ мало залежить від виду теплообміну й визначається розподілом тепла, теплофізичними властивостями матеріалу катода та його геометричними розмірами. Таке спрощення дозволяє перейти від граничних умов із нелінійною залежністю теплообміну до граничних умов другого роду. Похибка рішення при такій зміні граничних умов залежить від різниці температур ΔT , значення середньої температури та геометричних розмірів катода. На **рис. 2** представлено результати розрахунку похибки η при такій заміні, які показують, що в перед-



бачуваному інтервалі значень $\Delta T (\Delta T << 20^{\circ} C)$ максимальна похибка η_{max} не перевищує 10,2%, що відповідає 2 К. Вплив геометричних розмірів катода на відносну похибку розрахунків представлено на **рис. 3**.

З врахуванням зазначеного задача набуває такого вигляду:

$$\alpha(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial t}{\partial r}) + w'(r) = 0;$$

$$\begin{cases} t = T_1, \ r = r_1; \\ \lambda \frac{\partial t}{\partial r} = 0, \ r = r_2. \end{cases}$$
(15)

Далі наведемо послідовність рішення для стаціонарного процесу

$$w' = \frac{Q_{\rm e}'}{c\gamma} \neq f(t)$$

Перепишемо вираз (15) у вигляді

$$\frac{1}{r}\frac{\partial t}{\partial r}(r\frac{\partial t}{\partial r}) = -\frac{w'}{\alpha}$$

й підставимо в нього значення w'(r) з використанням рівняння (7) та урахуванням $\tau = 1$ (стаціонарний процес):

$$\frac{\partial t}{\partial r}(r\frac{\partial t}{\partial r}) = -\frac{0,25U_R^2}{\lambda \pi^2 \rho_0 (1+at)r},$$

або
$$\frac{\partial t}{\partial r}(r\frac{\partial t}{\partial r}) = -\frac{K}{r}$$
,
де $K = \frac{0,25U_R^2}{\pi^2 \rho_0 (1+at)\lambda}$ — коефіцієнт розподілу вну-

трішніх теплових потоків.

Після інтегрування отримаємо

$$r\frac{\partial t}{\partial r} = -K\ln r + C_1,$$

afo $\frac{\partial t}{\partial r} = -K\frac{\ln r}{r} + C_1$

abo
$$\frac{\partial l}{\partial r} = -K \frac{\mathrm{III} r}{r} + \frac{\mathrm{C}_1}{r}.$$



них розмірів катода

Після другого інтегрування отримаємо

$$t = -K\frac{\ln^2 r}{2} + C_1 \ln r + C_2.$$

Підставимо граничні умови для знаходження постійних інтегрування:

$$\frac{\partial t}{\partial r} = 0 = -K \ln r + C_1, \to C_1 = K \ln r_2;$$

$$C_2 = T_1 + K \frac{\ln^2 r_1}{2} - K \ln r_1 \ln r_2.$$

Тоді вираз для розподілу температури по радіусу катода виглядатиме так:

$$t = T_1 + K \frac{\ln^2 r_1}{2} - K \ln r_1 \ln r_2 - K \frac{\ln^2 r}{2} + K \ln r_2 \ln r.$$

Тепер знайдемо різницю температур на бічних поверхнях:

$$T_{2} = -K \frac{\ln^{2} r_{2}}{2} + K \ln r_{2} \ln r_{2} + T_{1} + K \frac{\ln^{2} r_{1}}{2} - K \ln r_{1} \ln r_{2}, \rightarrow$$

$$T_{2} - T_{1} = \frac{K}{2} (\ln^{2} r_{2} - 2 \ln r_{1} \ln r_{2} + \ln^{2} r_{1}) = \frac{K}{2} (\ln r_{2} - \ln r_{1})^{2}.$$

Остаточно отримуємо:

$$\Delta T = \frac{K}{2} \ln^2 N, \qquad (16)$$

де $N = r_2/r_1$ — відношення зовнішнього та внутрішнього радіусів катода.

На **рис.** 4 відображено залежність перепада між температурами поверхонь катода від е.р.с. у його кільцевому сегменті U_R для різних співвідношень розмірів катода. Тут видно, що при однаковому поперечному перерізі перевагу мають катоди з меншим відношенням радіусів зовнішньої та внутрішньої поверхні. Перепад температур в циліндричному індукційному термокатоді найбільше позначається на торцевих (кільцевих) поверхнях, тому емітуючі покриття краще наносити на бічні поверхні.





Висновки

Таким чином, результати розрахунку показали, що при індуктивному нагріванні попри високу теплопровідність матеріалу катода різниця між температурами його зовнішньої та внутрішньої поверхонь може бути суттєвою. Вирівняти температуру емітуючої поверхні термокатода з індукційним нагріванням можна за допомогою теплових екранів.

Аналітичне рішення диференціальних рівнянь для температурного поля, визначення температурних характеристик катода можливе лише в окремих випадках спрощеної задачі, що характеризуються стаціонарністю чи регулярністю режиму нагрівання. Для детального та повного аналізу температурного поля катода з індукційним нагріванням у разі його складної форми та застосування екранів доцільно використовувати чисельний розрахунок комп'ютерних моделей приладів та їхніх вузлів, що планується зробити в наступних дослідженнях.

Отримані результати можуть бути використані в подальшому як тестові дані для аналізу вирішення більш складних задач розрахунку теплових режимів катодного вузла з тепловим екраном і елементами фокусування термоелектронних потоків.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Whitaker J. C. *Power Vacuum Tubes Handbook*. USA, New York, Springer New York, 2013, 609 p. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-9987-2

2. Maikut S., Kuzmichev A., Tsybulskyi L., Shynkarenko N. The physico-topological simulation of a transmission X-ray tube with induction heating of the cathode. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2023, no. 4, pp. 190–195. https://doi.org/10.46813/2023-146-190

3. Лушкін О. Є. Про ефективні термоелектронні катоди. Український фізичний журнал, 2015, т. 60, № 1, с. 76–92. https:// doi.org/10.15407/ujpe60.01

4. Barcellan L., Berto E., Carugno G. et al. A battery-operated, stabilized, high-energy pulsed electron gun for the production of rare gas excimers. *Review of Scientific Instruments*, 2011, vol. 82, iss. 8, 095103. http://doi.org/10.1063/1.3636078

5. Lin X. W., Hu J. G., Seidman D. N., Morikawa H. A miniature electron-beam evaporator for an ultrahigh- vacuum atom-probe field-ion microscope. *Review of Scientific Instruments*, 1990, vol. 61, iss. 12, pp. 3745–3749. http://doi.org/10.1063/1.1141547

6. Sikora J., Kania B., Mroczka J. Thermionic electron beam current and accelerating voltage controller for gas ion sources. *Sensors*, 2021, vol. 21, iss. 8, 2878. http://doi.org/10.3390/s21082878

7. Chen D., Jacobs R., Petillo J. et al. Physics-based model for nonuniform thermionic electron emission from polycrystalline cathodes. *Phys. Rev. Applied*, 2022, vol. 18, 054010. https://doi. org/10.1103/PhysRevApplied.18.054010

8. Gao J.-Y., Yang Y.-F., Zhang X.-K. et al. A review on recent progress of thermionic cathode. *Tungsten*, 2020, vol. 2, pp.289–300. https://doi.org/10.1007/s42864-020-00059-1

9. Sitek A., Torfason K., Manolescu A., Valfells A. Space-charge effects in the field-assisted thermionic emission from nonuniform cathodes. *Physical Review Applied*, 2021, vol. 15, iss. 1, 014040, https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.15.014040

10. Liu X., Zhou Q., Maxwell T. L. et al. Scandate cathode surface characterization: Emission testing, elemental analysis and morphological evaluation. *Materials Characterization*, 2019, vol. 148, pp. 188–200. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.12.013

11. Wang J., Yang Y., Wang Y. et al. A review on scandia doped tungsten matrix scandate cathode. *Tungsten*, 2019, vol. 1, pp. 91–100. https://doi.org/10.1007/s42864-019-00007-8

12. Sitek A., Torfason K., Manolescu A., Valfells Á. Edge effect on the current-temperature characteristic of finite-area thermionic cathodes. *Physical Review Applied*, 2021, vol. 16, iss. 3, 034043. https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.16.034043

13. Jassem A., Chernin D., Petillo J. J. et al. Analysis of anode current from a thermionic cathode with a 2-D work function distribution. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2021, vol. 49, no. 2, pp. 749–755. https://doi.org/10.1109/TPS.2020.3048097

14. Chernin D., Lau Y. Y., Petillo J. J. et al. Effect of nonuniform emission on miram curves. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2020, vol. 48, no. 1, pp. 146–155. https://doi.org/10.1109/TPS.2019.2959755

15. Kania B. Digital approach to thermionic emission current to voltage conversion for high-voltage sources of electrons. *Informatyka, Automatyka, Pomiary W Gospodarce I Ochronie Środowiska*, 2022, vol. 12, no. 4, pp.78–81. https://doi.org/10.35784/iapgos.3255

16. Chen D., Jacobs R., Vlahos V. et al. Statistical model of nonuniform emission/rom polycrystalline tungsten cathodes. *International Vacuum Electronics Conference (IVEC)*. 2019, IEEE, 2019, pp. 1–2. https://doi.org/10.1109/IVEC.2019.8745051

17. Chen D., Jacobs R., Morgan D., Booske J. Impact of nonuniform thermionic emission on the transition behavior between

Опис статті для цитування:

Писаренко Л. Д., Цибульський І. Л. Теплофізична модель термокатода з індукційним нагріванням. Технологія та конструювання в електронній апаратурі, 2024, № 1–2, с. 49–55. http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2024.1-2.49

DOI: 10.15222/TKEA2024.1-2.49 UDC 621.385:536.2 temperature- and space-charge-limited Emission. *IEEE Transactions* on *Electron Devices*, 2021, vol. 68, no. 7, pp. 3576–3581. https://doi. org/10.1109/TED.2021.3079876

18. Zhenhua W., Min Hu, Zelong Li et al. *The method of heating the cathode using electromagnetic induction*. Pat. China, no. 111613495B, 2021. https://patents.google.com/patent/CN111613495B/en

19. Andrews H. L., Alexander A., Beckman D. T.et al. A laser heated thermionic cathode. *15th International Particle Accelerator Conference*, Nashville, TN, 2024. https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2024-WEPC55

20. Цыбульский Л.Ю. Пути улучшения характеристик индукционных испарителей. Электроника и связь, 2003, № 20, с. 157–160.

21. Kuzmichev A, Tsybulsky L. Evaporators with Induction Heating and Their Applications. Chapter 13. In book: *Advances in Induction and Microwave Heating of Mineral and Organic Materials*, Ed. by S. Grundas, InTech Open, Rijeka, 2011, pp. 269–302. https:// doi.org/10.5772/13934

22. Bergman T. L., Lavine A. S., Incropera F. P., DeWitt D. P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. USA, Wiley, 2020, 992 p.

Дата надходження рукопису до редакції 20.05 2024 р.

Cite the article as:

Pysarenko L. D., Tsybulskyi I. L. Thermophysical model of a thermonic cathode with induction heating. Technology and design in electronic equipment, 2024, no. 1–2, pp. 49–55. http://dx.doi. org/10.15222/TKEA2024.1-2.49

L. D. PYSARENKO, I. L. TSYBULSKYI

Ukraine, Kyiv, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" E-mail: i.l.tsybulskyi@gmail.com

THERMOPHYSICAL MODEL OF A THERMIONIC CATHODE WITH INDUCTION HEATING

A thermophysical model was built and the temperature field of a cylindrical thermionic cathode with induction heating was calculated, taking into account the initial and boundary conditions, based on the adoption of assumptions to simplify the mathematical model. During the induction heating of the cathode, a non-stationary heat conduction process is established, which is described by the differential equation of heat conduction with internal sources of Joule heat. The distribution of internal heat sources in the volume of the cathode is determined by the distribution of the ring induced current. The cylindrical design of the inductive thermionic cathode, due to spatial symmetry, allows to reduce the number of spatial variables, significantly simplify functional dependencies, and limit the algorithm for solving the problem. The problem was solved in the cylindrical coordinate system.

The obtained approximate solutions were assessed for the correctness of the accepted simplifications when finding the distribution of the temperature field with a sufficient degree of accuracy. Despite the high thermal conductivity of the cathode material, when the cathode is inductively heated, there can be a significant temperature difference between its outer and inner surfaces. The article shows the permissible temperature difference on the surface of the cathode, which limits the choice of geometric dimensions of the cathode. The temperature difference on the surfaces of the induction thermionic cathode is most affected on the end (annular) surfaces of the cathode, so it is better to apply emitting coatings to the side surfaces of the cylindrical cathode, thus complicating the design of the cathode.

The application of induction heating of the thermionic cathode allows to simplify the heating unit, increase the reliability and service life of powerful electronic devices. The obtained results are planned to be used in further research as test data for the analysis of more complex problems of numerical calculation of the thermal regimes of the cathode unit with heat shields and focusing elements of thermoelectron flows.

Keywords: thermionic cathode, induction heating, mathematical model, approximate solution, electronic devices.

REFERENCES

1. Whitaker J. C. *Power Vacuum Tubes Handbook*. USA, New York, Springer New York, 2013, 609 p. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-9987-2

2. Maikut S., Kuzmichev A., Tsybulskyi L., Shynkarenko N. The physico-topological simulation of a transmission X-ray tube with induction heating of the cathode. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2023, no. 4, pp. 190–195. https://doi.org/10.46813/2023-146-190

3. Lushkin O.Ye. On efficient thermionic cathodes. *Ukrainian Journal of Physics*, 2015, vol. 60, no. 1, pp. 76–92. https://doi. org/10.15407/ujpe60.01

4. Barcellan L., Berto E., Carugno G. et al. A battery-operated, stabilized, high-energy pulsed electron gun for the production of rare gas excimers. Review of Scientific Instruments, 2011, vol. 82, iss. 8, 095103. http://doi.org/10.1063/1.3636078

5. Lin X. W., Hu J. G., Seidman D. N., Morikawa H. A miniature electron-beam evaporator for an ultrahigh- vacuum atom-probe field-ion microscope. *Review of Scientific Instruments*, 1990, vol. 61, iss. 12, pp. 3745–3749. http://doi.org/10.1063/1.1141547

 Sikora J., Kania B., Mroczka J. thermionic electron beam current and accelerating voltage controller for gas ion sources. *Sensors*, 2021, vol. 21, iss. 8, 2878. http://doi.org/10.3390/s21082878

7. Chen D., Jacobs R., Petillo J. et al. Physics-based model for nonuniform thermionic electron emission from polycrystalline cathodes. *Phys. Rev. Applied*, 2022, vol. 18, 054010. https://doi.org/10.1103/ PhysRevApplied.18.054010

8. Gao J.-Y., Yang Y.-F., Zhang X.-K. et al. A review on recent progress of thermionic cathode. *Tungsten*, 2020, vol. 2, pp.289–300. https://doi.org/10.1007/s42864-020-00059-1

9. Sitek A., Torfason K., Manolescu A., Valfells A. Space-charge effects in the field-assisted thermionic emission from nonuniform cathodes. *Physical Review Applied*, 2021, vol. 15, iss. 1, 014040, https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.15.014040

10. Liu X., Zhou Q., Maxwell T. L. et al. Scandate cathode surface characterization: Emission testing, elemental analysis and morphological evaluation. *Materials Characterization*, 2019, vol. 148, pp. 188–200. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.12.013

11. Wang J., Yang Y., Wang Y. et al. A review on scandia doped tungsten matrix scandate cathode. *Tungsten*, 2019, vol. 1, pp. 91–100. https://doi.org/10.1007/s42864-019-00007-8

12. Sitek A., Torfason K., Manolescu A., Valfells Á. Edge effect on the current-temperature characteristic of finite-area thermionic cathodes. *Physical Review Applied*, 2021, vol. 16, iss. 3, 034043. https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.16.034043

13. Jassem A., Chernin D., Petillo J. J. et al. Analysis of anode current from a thermionic cathode with a 2-D work function distribution. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2021, vol. 49, no. 2, pp. 749–755. https://doi.org/10.1109/TPS.2020.3048097

14. Chernin D., Lau Y. Y., Petillo J. J. et al. Effect of nonuniform emission on miram curves. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2020, vol. 48, no. 1, pp. 146–155. https://doi.org/10.1109/ TPS.2019.2959755

15. Kania B. Digital approach to thermionic emission current to voltage conversion for high-voltage sources of electrons. *Informatyka, Automatyka, Pomiary W Gospodarce I Ochronie Środowiska*, 2022, vol. 12, no. 4, pp.78–81. https://doi.org/10.35784/iapgos.3255

16. Chen D., Jacobs R., Vlahos V. et al. Statistical model of nonuniform emission/rom polycrystalline tungsten cathodes. *International Vacuum Electronics Conference (IVEC)*. 2019, IEEE, 2019, pp. 1–2. https://doi.org/10.1109/IVEC.2019.8745051

17. Chen D., Jacobs R., Morgan D., Booske J. Impact of nonuniform thermionic emission on the transition behavior between temperature- and space-charge-limited Emission. *IEEE Transactions* on *Electron Devices*, 2021, vol. 68, no. 7, pp. 3576–3581. https://doi. org/10.1109/TED.2021.3079876

18. Zhenhua W., Min Hu, Zelong Li et al. *The method of heating the cathode using electromagnetic induction*. Pat. China, no. 111613495B, 2021. https://patents.google.com/patent/CN111613495B/en

19. Andrews H. L., Alexander A., Beckman D. T.et al. A laser heated thermionic cathode. *15th International Particle Accelerator Conference, Nashville*, TN, 2024. https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2024-WEPC55

20. Tsybulsky L. Yu. [Ways to improve the characteristics of induction evaporators]. *Electronika i svyaz*, 2003, no. 20, pp. 157–160 (Rus)

21. Kuzmichev A, Tsybulsky L. Evaporators with Induction Heating and Their Applications. Chapter 13. In book: *Advances in Induction and Microwave Heating of Mineral and Organic Materials*, InTech Open, Rijeka, 2011, pp. 269–302. https://doi. org/10.5772/13934

22. Bergman T. L., Lavine A. S., Incropera F. P., DeWitt D. P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. USA, Wiley, 2020, 992 p.

РЕЦЕНЗЕНТИ НОМЕРА

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

Должиков Володимир Васильович, докт. фіз.-мат. наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків

Римар Сергій Володимирович, докт. техн. наук, провідний науковий співробітник, Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, м. Київ

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

Шабашкевич Борис Григорович, директор, НВФ «ТЕНЗОР», м. Чернівці

Ямненко Юлія Сергіївна, докт. техн. наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

БІБЛІОГРАФІЯ

ПОКАЖЧИК СТАТЕЙ, ОПУБЛІКОВАНИХ У ЖУРНАЛІ У 2023 РОЦІ

Технічна політика

Відновлення працездатності радіоелектронних пристроїв шляхом реінжинірингу. *Лаврич* Ю. М., Бистров М. І., Плаксін С. В. та ін.

Сучасні електронні технології

Вольт-амперні характеристики діодів Шотткі на основі гетероструктури графен/n-Si. Козярський І. П., Ілащук М. І., Орлецький І. Г. та ін.

Системи передавання та обробки сигналів

Показник поліпшення нелінійних одноканаль-
них систем обробки сигналу в умовах гаусових
завад. Цевух І. В., Сакович А. А., Цевух В. І.

Енергетична електроніка

Гібридний накопичувач електроенергії типу «акумуляторна батарея — суперконденсатор» для мікромобільного електротранспорту. *Манжелій А. Ю., Бондаренко О. Ф.*

Використання часткового зарядно-розрядного циклу акумуляторної батареї для збільшення її ресурсу. Ліпко Д. О., Бондаренко О. Ф.

Захист сонячних батарей від перегрівів за допомогою критичних терморезисторів на основі діоксиду ванадію. *Колбунов В. Р., Тонкошкур О. С., Мазурик С. В. та ін.*

Концентраторний фотоенергетичний модуль на основі кремнієвих фотоперетворювачів. Черненко В. В., Костильов В. П., Коркішко Р. М. та ін.

Моделі та алгоритми оптимізації розташування сонячних батарей. *Єфіменко А. А., Присяжнюк Л. І.*

Сенсоелектроніка

Збільшення чутливості та радіаційної стійкості сенсорів-перетворювачів температури на основі генераторів на одноперехідних транзисторах. Вікулін І. М., Вікуліна Л. Ф., Марколенко П. Ю., Назаренко О. А.

Біомедична електроніка

Використання НВЧ-радіометрії у побудові медичних приладів для неінвазивної діагностики. Гаєвський В. С., Глушеченко Е. М., Лабунський В. В., Туз О. Д.

Забезпечення теплових режимів Вплив форми гравітаційної теплової труби з різьбовим випарником на її теплопередавальні характеристики. Ліпніцький Л. В., Мельник 3-4 Р. С., Ніколаєнко Ю. Є. та ін. 1–2 Візуалізація процесів пароутворення та теплові характеристики тонкої плоскої гравітаційної теплової труби з різьбовим випарником. 1–2 Мельник Р. С., Ліпніцький Л. В., Ніколаєнко Ю. Є., Кравець В. Ю. 3-4 Теплопередавальні характеристики мініатюрних теплових труб для систем охолодження 1–2 електронної техніки. Кравець В. Ю., Хайрнасов С. М., Ромащенко М. Д., Данилович А. О. 3-4Технологічні процеси та обладнання Особливості застосування листової термоміграції трирозмірної рідкої зони AI+Si для 1–2 формування напівпровідникових силових 1–2 приладів. Полухін О. С., Кравчина В. В. Поліпшення зворотних характеристик 3-4 кремнієвого варикапа за допомогою низькотемпературного гетерування. Литвиненко В. М., Шутов С. В. 1-2 Утворення дефектів на поверхні Ѕі-підкладок 3-4 в процесі термічного напилення золота. Кукурудзяк М. С., Кукурудзяк А. М. 3-4 Матеріали електроніки 3-4 Вплив вмісту домішок та структурних дефектів на властивості детектора на основі Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te:V. Кондрик О. І., Солопіхін Д. О. 3-4 3-4 Чи деградують термоелектричні генераторні модулі внаслідок дифузії нікелю. Горський П. В. 3-4 Метрологія. Стандартизація Прилад для вимірювання сигналів конвеєрних ваг при завантаженні судна сипучими мате-3–4 ріалами. Завадський В. А., Харченко Р. Ю., Дранчук С. М. та ін. 1-2 Бібліографія

Покажчик статей, опублікованих у журналі

у 2022 році

3–4

1-2

Видавець і виготовлювач версії online ПП «Політехперіодика» (65044, м. Одеса, а/с 17) E-mail: tkea.journal@gmail.com Web-сайт: www.tkea.com.ua, тел. +38 099 444 63 52 Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3232 від 09.07.2008

Підписано до друку 28.06 2024 р. Формат 60×84 1/8. Друк. арк. 8,0. Тираж 100 прим. Зам. № 161/162 Оригінал-макет виготовлено у видавництві «Політехперіодика» (65044, м. Одеса, а/с 17) Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3232 від 09.07.2008 р.

> Надруковано ТОВ «Сімекс-прінт» з готового оригінал-макету (вул. Дальницька, 53, м. Одеса, 65005, тел. (048) 709 20 50) Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3807 від 22.06.2010

