

ТЕХНОЛОГІЯ ТА КОНСТРУЮВАННЯ В ЕЛЕКТРОННІЙ АПАРАТУРІ



XXIV Міжнародна науково-практична конференція
«Сучасні інформаційні та електронні технології»

«Modern information and electronic technologies»
XXIV International Scientific-Practical conference

29–31 травня 2023 року
Україна, м. Одеса

ТЕМАТИЧНІ НАПРЯМКИ КОНФЕРЕНЦІЇ

- Радіотехніка та телекомунікації. Захист інформації
- Проектування, конструювання, виробництво та контроль електронних засобів
- Функціональна електроніка. Мікро- та нанотехнології

Більше про конференцію:
<http://www.tkea.com.ua/siet/inf.html>

e-mail: tkea.journal@gmail.com
тел: +38 099 444 63 52

1–2 2023

СІЧЕНЬ — ЧЕРВЕНЬ

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. Беляев (м. Київ, Україна)
Д. т. н. М. М. Ваків (м. Львів, Україна)
Д. т. н. Г. О. Оборський (м. Одеса, Україна)
К. т. н. В. М. Чміль (м. Київ, Україна)
О. А. Тихонова (м. Одеса, Україна)

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

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

D. Eng. D. Morales (Granada, Spain)
Д. т. н. І. Ш. Невлюдов (м. Харків, Україна)
Dr. Sc. D. Nika (Chisinau, Moldova)
Д. т. н. Ю. Є. Ніколаєнко (м. Київ, Україна)
Prof. V. Pires (Setúbal, Portugal)
Д. ф.-м. н. С. В. Плаксін (м. Дніпро, Україна)
К. т. н. В. М. Проконець (м. Київ, Україна)
D. Eng. N. Rodriguez (Granada, Spain)
Prof. E. Romero-Cadaval (Badajoz, Spain)
К. ф.-м. н. О. В. Рибка (м. Харків, Україна)
К. т. н. А. В. Садченко (м. Одеса, Україна)
К. т. н. П. С. Сафронов (м. Київ, Україна)
Д. т. н. В. С. Ситніков (м. Одеса, Україна)
К. т. н. С. А. Степенко (м. Чернігів, Україна)
Dr. Sc. Z. Stević (Belgrade, Serbia)
Д. х. н. В. М. Томашик (м. Київ, Україна)
К. т. н. В. Є. Трофімов (м. Одеса, Україна)
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, а/с 17;
tkea.journal@gmail.com, www.tkea.com.ua,
+38 099 444 63 52.

Редакція

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

ТЕХНОЛОГІЯ
ТА
КОНСТРУЮВАННЯ
В
ЕЛЕКТРОННІЙ
АПАРАТУРІ

НАУКОВО-ВИРОБНИЧИЙ ЖУРНАЛ

2023 № 1–2

Рік видання 47-й

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

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

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

Схвалено до друку
Вченою радою
Національного університету
«Одеська політехніка»
(Протокол № 10 від 30.05 2023 р.)
Відп. за випуск: О. А. Тихонова

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

Свідоцтво про реєстрацію
№ КВ 25451-15491 ПР
від 03.02.2023 р.

ЗМІСТ

Сучасні електронні технології

Вольт-амперні характеристики діодів Шотткі на основі
гетероструктури графен/ n -Si. Козярьський І. П., Ілацук М. І.,
Орлецький І. Г., Козярьський Д. П., Миронюк Л. А., Миронюк Д. В.,
Євтушенко А. І., Даниленко І. М., Майстрок Е. В. 3

Системи передавання та обробки сигналів

Показник поліпшення нелінійних одноканальних систем оброб-
ки сигналу в умовах гаусових завад. Цевух І. В., Сакович А. А.,
Цевух В. І. 9

Енергетична електроніка

Гібридний накопичувач електроенергії типу «акумуляторна бата-
рея — суперконденсатор» для мікромобільного електротранспорту.
Манжелей А. Ю., Бондаренко О. Ф. 14

Забезпечення теплових режимів

Вплив форми гравітаційної теплової труби з різьбовим випар-
ником на її теплопередавальні характеристики. Ліпницький Л. В.,
Мельник Р. С., Ніколаєнко Ю. Є., Кравець В. Ю., Пекур Д. В. 27

Технологічні процеси та обладнання

Особливості застосування листової термоміграції рідкої зони
Al+Si з топологічно різною товщиною при формуванні напів-
провідникових силових приладів. Полухін О. С., Кравчина В. В. 34

Поліпшення зворотних характеристик кремнієвого варикапа за до-
помогою низькотемпературного гетерування. Литвиненко В. М.,
Шутов С. В. 43

Метрологія, стандартизація

Прилад для вимірювання сигналів конвеєрних ваг при завантаженні
судна сипучими матеріалами. Завадський В. А., Харченко Р. Ю.,
Дранчук С. М., Цацко В. І., Гаур Т. О. 50

Рецензенти номера 59

Показник статей, опублікованих у 2022 р. 60

CONTENTS

Modern electronic technologies

I–V-characteristics of Schottky diodes based on graphene/n-Si heterostructures. *Koziarskyi I. P., Ilashchuk M. I., Orletskyi I. G., Koziarskyi D. P., Myroniuk L. A., Myroniuk D. V., Ievtushenko A. I., Danylenko I. M., Maistruk E. V.* 3

Signals transfer and processing systems

Index of improvement of nonlinear single-channel signal detection systems under Gaussian noise. *Tsevuikh I. V., Sakovich A. A., Tsevuikh V. I.* 9

Semiconductor light engineering power electronics

Hybrid battery-supercapacitor energy storage system for micromobile electric vehicles. *Manzhelii A. Yu., Bondarenko O. F.* 14

Thermal management

Impact of changing the shape of gravity heat pipe with threaded evaporator on its heat transfer characteristics. *Lipnitskyi L. V., Melnyk R. S., Nikolaenko Yu. E., Kravets V. Yu., Pekur D. V.* 27

Production technology and equipment

Aspects of using sheet thermo-migration of the Al+Si liquid zone with topologically different thicknesses to form semiconductor power devices. *Polukhin O. S., Kravchina V. V.* 34

Improvement of inverse characteristics of silicon varicap by using low-temperature gettering. *Litvinenko V. N., Shutov S. V.* 43

Metrology, standardization

Device for measuring signals of conveyor weights when loading a vessel with bulk cargo. *Zavadsky V. A., Kharchenko R. Yu., Dranchuk S. M., Tsatsko V. I., Haur T. O.* 50

Reviewers 59

Index of articles published in the journal in 2022 60

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 10, 30.05 2023)

Editor in charge of the issue:
Olena Tykhonova

FOUNDERS:

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

Registration certificate
KB 25451-15491 IIP
of 03.02.2023

К. ф.-м. н. І. П. КОЗЯРСЬКИЙ¹, к. ф.-м. н. М. І. ПЛАЩУК¹, к. ф.-м. н. І. Г. ОРЛЕЦЬКИЙ¹,
к. ф.-м. н. Д. П. КОЗЯРСЬКИЙ¹, к. х. н. Л. А. МИРОНЮК², к. ф.-м. н. Д. В. МИРОНЮК²,
к. ф.-м. н. А. І. ЄВТУШЕНКО², І. М. ДАНИЛЕНКО³, д. ф.-м. н. Е. В. МАЙСТРУК¹

Україна, ¹Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича;
м. Київ, ²Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України,
³Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України

E-mail: i.kozarskyi@chnu.edu.ua

ВОЛЬТ-АМПЕРНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДІОДІВ ШОТТКІ НА ОСНОВІ ГЕТЕРОСТРУКТУРИ ГРАФЕН/*n*-Si

*Діоди Шотткі на основі гетероструктури графен/*n*-Si були отримані методом механічного відшарування графіту до кількашарового графену у водному розчині полівінілпіролідону внаслідок гідродинамічних явищ в розчині диспергованого графіту. Досліджувалися електричні властивості структур, які відрізнялися тривалістю нанесення плівок графену на пластини *n*-Si. Температура пластин не перевищувала 250°C. Утворення шарів графену підтверджено дослідженням спектрів комбінаційного розсіювання в діапазоні частот 1000–3250 см⁻¹, де проявляються смуги *G* і *2D* з особливостями, характерними для кількашарового графену. Встановлено залежність електричних властивостей досліджуваних поверхнево-бар'єрних структур графен/*n*-Si від тривалості напilenня плівок графену.*

Ключові слова: діоди Шотткі, гетероструктури, кількашаровий графен/*n*-Si, електричні властивості.

Графен — двовимірний матеріал, унікальні фізико-хімічні властивості якого зумовлюються його кристалічною структурою та π -електронами атомів вуглецю, з яких він утворений — є об'єктом наукових досліджень та широко використовується в багатьох галузях напівпровідникової нанoeлектроніки [1—11]. Через особливості енергетичного спектра носіїв заряду графен, на відміну від інших двовірних систем, проявляє специфічні електрофізичні властивості [1—5]. На зонній структурі графену відсутня заборонена зона, при цьому в точках дотику валентної зони та зони провідності (точки Дірака) енергетичний спектр електронів і дірок лінійно залежить від хвильового вектора. Електричні заряди в графені поведуть себе як релятивістські частинки (діраківські ферміони) з нульовою ефективною масою та мають ефективну “швидкість світла” приблизно 10⁶ м/с [2]. Нульова ефективна маса носіїв заряду зумовлює їхню виключно високу рухливість — параметр, який характеризує придатність матеріалу для застосування в приладах, де транспорт носіїв заряду визначає їхні основні характеристики. Граничне значення рухливості носіїв заряду μ в графені за кімнатної температури та їх концентрації 10¹² см⁻² становить 2·10⁵ см²/(В·с) [3]. Дещо нижчими є значення μ в графені, нанесеному на шар діоксиду кремнію SiO₂, який утворено на пластині Si, — воно становить 10⁴ см²/(В·с), що пояснюється наявністю заряджених домішок в діелектрику SiO₂ [3].

Графен є перспективним матеріалом для виготовлення польових транзисторів з графеновим каналом з амбіполярною провідністю [12], чутливих сенсорів для виявлення окремих молекул хімічних речовин,

приєднаних до поверхні плівки [13], електродів в іоністорах (суперконденсаторах) [14]. Дослідження останніх кількох років показали, що графен може утворювати контакти з різними напівпровідниковими матеріалами, які мають випрямні характеристики та проявляють властивості діодів Шотткі [8, 11, 15, 16]. Основною перевагою цих структур у порівнянні з випрямними контактами метал/напівпровідник є керована висота потенціального бар'єра, зумовлена можливістю контрольованої зміни положення рівня Фермі у графені, а відповідно, і величини термодинамічної роботи виходу [5, 8]. Унікальна можливість модуляції висоти потенціального бар'єра в системі графен/напівпровідник передбачає її практичне застосування у високопродуктивних і недорогих ІЧ-фотодетекторах, сонячних батареях, які вже досягли ефективності близько 15% та є конкурентоспроможними фотоперетворювачам на основі структур метал/напівпровідник та мікрокристалічних *p-n*-переходів [8]. Попри це, графен все ще є перспективним прозорим провідним електродом, який можна інтегрувати з існуючими фотоелектричними кремнієвими технологіями для заміни прозорого оксиду індію та олова або легованого фтором оксиду олова [8, 15]. Як хімічний датчик перехід графен/напівпровідник може перевершувати інші пристрої як за чутливістю, так і за енергоспоживанням [8].

Проведений аналіз таких параметрів, як висота потенціального бар'єра та коефіцієнт неідеальності, діодів Шотткі графен/напівпровідник, виготовлених на пластинках різних напівпровідників (*n*-Si, *p*-Si, *n*-GaAs, *n*-GaN, *n*-CdS, *n*-4H-SiC), показав їх значну розбіжність навіть для структур на основі

напівпровідників одного хімічного складу, що свідчить про сильну залежність їхніх властивостей від техніки виготовлення (методу отримання плівки графену, обробки поверхні напівпровідникової пластини, перенесення графену на пластину та техніки формування переходу) [8, 15].

Одним з найпростіших та недорогих методів отримання плівок графену відмінної кристалічної якості є механічне відшарування високоорієнтованого піролітичного графіту [3]. Однак один з перших механічних методів (відлущування за допомогою скотчу) не був пристосований для промислового виробництва через низький вихід графенових листів. У пізніших роботах [17—19] було показано, що відлущування кристалічного графіту до графену в органічних розчинниках може бути промислово масштабованим методом його виробництва з використанням звичайного кухонного блендера — з його допомогою можна створити велику кількість бездефектного багатшарового графену. Для успішного відлущування та стабілізації вивільнених нанолістів графену першорядну роль відіграє розчинник. До органічних розчинників, які використовуються для диспергування та відшарування графіту, таких як N-метилпіролідон (NMP), диметилформамід (DMF) і диметилсульфоксид (DMSO) [20, 21], можна віднести й полівінілпіролідон (C_6H_9NO)_n (PVP), який є нетоксичним матеріалом та приводив до поліпшення диспергування вуглецевих нанотрубок та їх орієнтації у водних розчинах у дослідженнях [22—24].

В цій роботі досліджувалися електричні властивості діодів Шотткі на основі гетероструктур графен/*n*-Si, які відрізнялися тривалістю нанесення плівок графену на пластини *n*-Si.

Методика експерименту

Для отримання плівок графену використовували методику механічного відлущування графіту в органічних розчинниках за допомогою кухонного блендера [17—19]. Вихідним матеріалом служував порошкоподібний кристалічний графіт (аналог ГЛ-1, ГОСТ 17022-81), який в основному (на 80%) складається з частинок розміром 20—60 мкм. Кристали графіту диспергували у водному розчині PVP з концентрацією 3 мг/мл, отримуючи 500 мл дисперсії графіту (15 мг/мл). Процес відлущування відбувався внаслідок гідродинамічних явищ в розчині диспергованого графіту під дією блендера, швидкість якого становила 8500—9000 об/хв. Подальше розділення рідкої та твердої фракції суміші, яке проводили для видалення нерозшарованих графітових пластинок, відбувалося протягом 5 хв з використанням центрифуги на швидкості 5000 об/хв. Отриманий осад розбавляли етиловим спиртом і наносили на пластини кристалічного *n*-Si за допомогою пневматичного пульверизатора. Повне видалення летучих компонентів розчину з нанесених плівок відбувалося

за температури пластин не вище 250°C. Для проведення досліджень структури графен/*n*-Si отримували за різної тривалості процесу розпорошування суміші: 5, 10 та 15 хвилин.

Мікроструктуру поверхні отриманих плівок графену вивчали за допомогою сканувального електронного мікроскопа (SEM) Tescan Mira 3 LMU SEM з потенціалом прискорення первинного пучка 20 кВ. Спектри комбінаційного розсіювання вихідного кристалічного графіту та отриманих плівок графену в діапазоні частот 1000—3250 см⁻¹, які відповідають коливанням вуглецевих *sp*²-зв'язків, вимірювали з використанням комбінаційного спектрометра Jobin Yvon t64000 при збудженні неполяризованим світлом з довжиною хвилі 532 нм.

Контакт до шарів графену та кремнієвої пластини формували за допомогою провідної пасти на основі срібла.

Вольт-амперні характеристики (ВАХ) досліджуваних діодів Шотткі вимірювали за допомогою апаратно-програмного комплексу, реалізованого на базі платформи Arduino, цифрового мультиметра Agilent 34410A та програмованого джерела живлення Siglent SPD3303X, які управлялись персональним комп'ютером з використанням програмного забезпечення, створеного авторами у середовищі LabView.

Експериментальні результати та їх обговорення

SEM-зображення плівки графена, нанесеної на поверхню *n*-Si, наведено на **рис. 1, а**. Тут спостерігаються окремі лусочки з площею поверхні в діапазоні 0,001—0,1 мкм². SEM-дослідження показує, що під час напилення графенові луски збираються в неперервну тонку плівку.

SEM-зображення плівки в перерізі (рис. 1, б, в) показують, що отримані тонкі плівки графену утворюють поверхню складної форми та містять велику кількість листів з кількшарового графену (few-layer

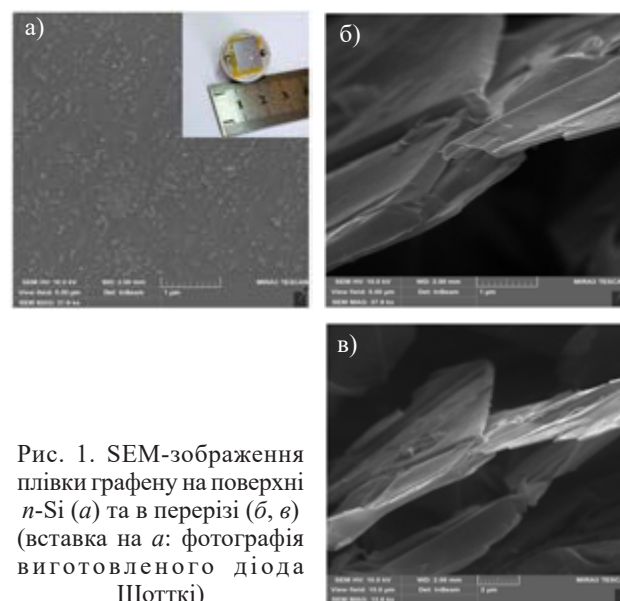


Рис. 1. SEM-зображення плівки графену на поверхні *n*-Si (а) та в перерізі (б, в) (вставка на а: фотографія виготовленого діода Шотткі)

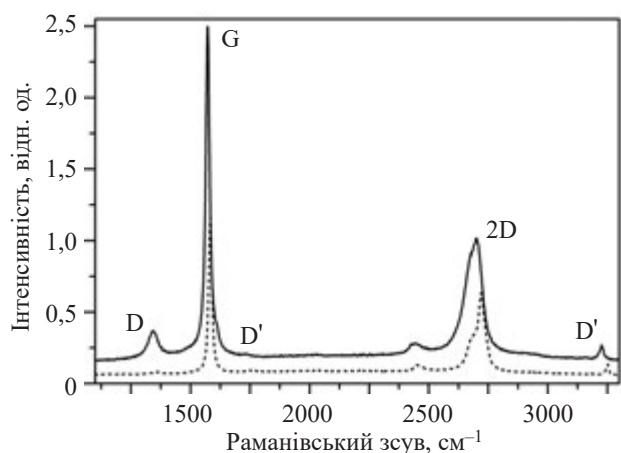


Рис. 2. Спектри комбінаційного розсіювання кристалічного графіту (пунктирна лінія) та кількішарового графену (суцільна лінія)

graphene, FLG). Окремі пластівці графену перекриваються. SEM-аналіз показав, що товщина графенових пластівців складає приблизно 4 нм.

Спектри комбінаційного розсіювання вихідного кристалічного графіту GL-1 та отриманого кількішарового графену представлені на **рис. 2**.

В спектрах раманівського розсіювання проявляються смуги G і 2D (з максимумом біля 1580 та 2700 см⁻¹ відповідно), які є основними в спектрах як об'ємного графіту, так і тонкоплівкового графену. Ці смуги змінюють форму, положення та відносну інтенсивність залежно від кількості шарів графену, що відображає еволюцію електронної структури та електрон-фононної взаємодії [25, 26]. Одношаровий графен характеризується одним інтенсивним, гострим і симетричним піком 2D-смуги. Якщо кількість графенових шарів збільшується до двох або більше, 2D-смуга стає суперпозицією чотирьох смуг різної інтенсивності, а її форма якісно відрізняється від форми 2D-моди графіту, як це видно на рис. 2. Деяка асиметрія 2D-смуги в спектрі графену та зміщення її максимуму в бік менших частот вказує на його

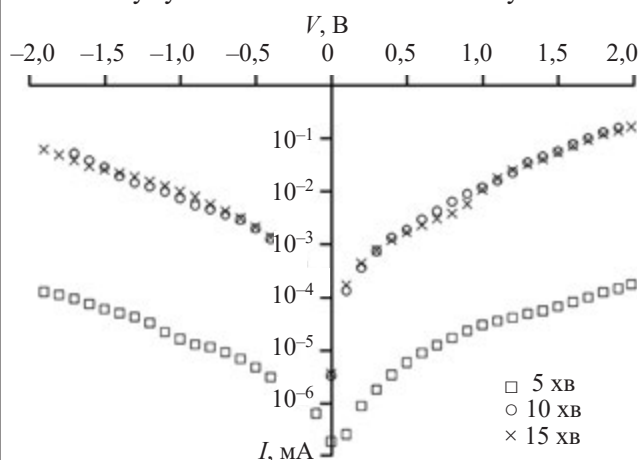


Рис. 3. ВАХ діодів Шотткі на основі структур графен/n-Si, виготовлених за різної тривалості нанесення шарів графену

багатошаровість [25, 26]. Можна очікувати, що спостережувана 2D-смуга у спектрі отриманих графенових пластівців ширша, ніж в одношарового графену. Це підтверджується порівнянням значень повної ширини на половині максимуму (FWHM) 2D-смуги у спектрах на рис. 2 та у спектрах окремих листів графену, яка становить 79,88 та ≈ 30 см⁻¹ [26] відповідно. Таким чином, можна стверджувати, що отримані дисперсії графену складаються з декількох його шарів.

Як видно з представлених на **рис. 3** ВАХ, які вимірювалися при прямих та зворотних напругах за кімнатної температури, досліджувані структури графен/n-Si мають слабкі випрямні властивості. Коефіцієнт випрямлення R_F , а також значення бар'єрної ємності діодів Шотткі, величина вбудованого потенціалу ϕ_k та послідовного опору R_S цих структур наведені в **таблиці**.

Параметри структур графен/n-Si, отриманих за різної тривалості нанесення шарів графену

Параметр	Час нанесення шарів графену, хв		
	5	10	15
Коефіцієнт випрямлення R_F (при $ V =2$ В)	1,2	1,9	2,2
Вбудований потенціал ϕ_k , В	1,35	1,32	1,27
Послідовний опір R_S , Ом	$3,4 \times 10^6$	$3,4 \times 10^3$	$3,7 \times 10^3$

Аналіз механізмів струмопереносу у разі прямих зміщень показав, що для структур графен/n-Si в області малих струмів при $3kT < V < 0,2$ В коефіцієнт неідеальності ВАХ A становить 3,3—5,0 та збільшується зі зростанням часу наплення. Як видно з **рис. 4, а**, при збільшенні прямої напруги кут нахилу залежностей $\ln I = f(V)$ для всіх досліджуваних структур графен/n-Si зменшується, а коефіцієнт A істотно зростає. Наведені значення A вказують на тунельний механізм прямого струму, який для різких поверхнево-бар'єрних структур визначається виразом [27]

$$I(V) = B N_t \exp[-\alpha(\phi_k - V)], \quad (1)$$

де B — постійна;

N_t — концентрація рівнів, які беруть участь у процесі тунелювання;

α — величина, що залежить від ефективної маси електронів у забороненій зоні, діелектричної проникності, рівноважної концентрації носіїв та форми бар'єра.

Лінійність прямих гілок ВАХ у координатах $\ln I = f(\phi_k - V)$ (рис. 4, б) підтверджує справедливості застосованої моделі.

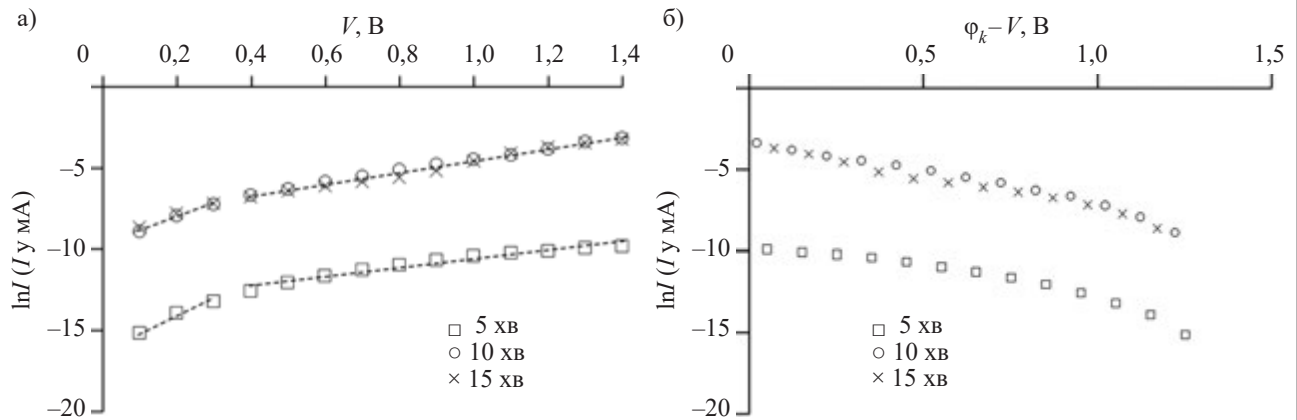


Рис. 4. Напівлогарифмічні залежності прямих гілок ВАХ діодів Шотткі на основі структур графен/*n*-Si, виготовлених за різної тривалості нанесення шарів графену, у різних координатах:

a — $\ln I = f(V)$; b — $\ln I = f(\phi_k - V)$

ВАХ досліджуваних діодів в області зворотних зміщень добре описуються виразом для тунельного струму [27]

$$I = a_0 \exp\left(-b_0 (\phi_k - V)^{-1/2}\right), \quad (2)$$

де a_0 — параметр, значення якого визначається ймовірністю заповнення енергетичних рівнів, з яких здійснюється тунелювання електронів; b_0 визначається швидкістю зміни струму при зміні напруги.

Лінійність ВАХ досліджуваних структур в координатах $\ln I = f((\phi_k - V)^{-1/2})$ (рис. 5) добре узгоджується з виразом (2).

За зворотної напруги в діапазоні $-0,5 < V < -2,0$ В спостерігається різке зростання величини струму, що пояснюється лавинним розмноженням носіїв заряду під дією сильного електричного поля.

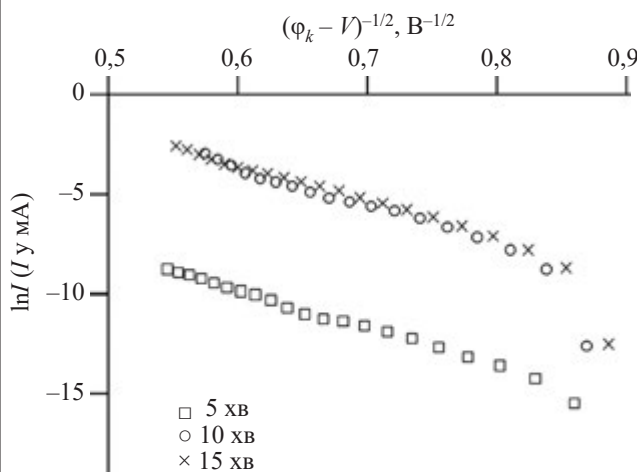


Рис. 5. Напівлогарифмічна залежність зворотних гілок ВАХ діодів Шотткі на основі структур графен/*n*-Si, виготовлених за різної тривалості нанесення шарів графену, для тунельного струму при зворотніх напругах

Висновки

Таким чином, досліджено електричні характеристики діодів Шотткі на основі структур графен/*n*-Si, виготовлених методом механічного відшарування графіту за різної тривалості процесу розпорошування суміші. Встановлено, що діоди характеризуються слабкими випрямними властивостями ($R_F \approx 2$). Сканувальна електронна мікроскопія показала складчасту морфологію графенових пластівців товщиною приблизно 4 нм. Асиметрія 2D-смуги в спектрі комбінаційного розсіювання графена, зміщення її максимуму в бік менших частот та ширина на половині максимуму (FWHM) вказують на його багат шаровість. Також встановлено, що у формуванні як прямого, так і зворотного струмів переважає тунелювання носіїв заряду крізь потенціальний бар'єр.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Morozov S. V., Novoselov K. S., Katsnelson M. I. et al. Giant intrinsic carrier mobilities in graphene and its bilayer. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, vol. 100, iss. 1, p. 016602. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.016602>
2. Novoselov K. S., Geim A. K., Morozov S. V. et al. Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene. *Nature*, 2005, vol. 438, pp. 197–200. <https://doi.org/10.1038/nature04233>
3. Novoselov K. S., Geim A. K., Morozov S. V. et al. Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 2004, vol. 306, iss. 5696, pp. 666–669. <https://doi.org/10.1126/science.1102896>
4. Katsnelson M. I. Graphene: carbon in two dimensions. *Materials Today*, 2007, vol. 10, pp. 20–27. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(06\)71788-6](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(06)71788-6)
5. Geim A. K., Novoselov K. S. The rise of graphene. *Nature Materials*, 2007, vol. 6, pp. 183–191. <https://doi.org/10.1038/nmat1849>
6. Soldano C., Mahmood A., Dujardin E. Production, properties and potential of graphene. *Carbon*, 2010, vol. 48, pp. 2127–2150. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.01.058>
7. Bonaccorso F., Sun Z., Hasan T., Ferrari A. C. Graphene photonics and optoelectronics. *Nature Photonics*, 2010, vol. 4, pp. 611–622. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2010.186>

8. Bartolomeo A. D. Graphene Schottky diodes: an experimental review of the rectifying graphene/semiconductor heterojunction. *Physics Reports*, 2016, vol. 606, pp. 1–58. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2015.10.003>
9. Bae S., Kim H., Lee Y. et al. Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes. *Nature Nanotechnology*, 2010, vol. 5, pp. 574–578. <https://doi.org/10.1038/nnano.2010.132>
10. Wang Y., Chen X., Zhong Y. et al. Large area, continuous, few-layered graphene as anodes in organic photovoltaic devices. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, vol. 95, p. 063302. <https://doi.org/10.1063/1.3204698>
11. Tongay S., Schumann T., Miao X. et al. Tuning Schottky diodes at the many-layer-graphene/semiconductor interface by doping. *Carbon*, 2011, vol. 49, pp. 2033–2038. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2011.01.029>
12. Schwierz F. Graphene transistors. *Nature Nanotechnology*, 2010, vol. 5, pp. 487–496. <https://doi.org/10.1038/nnano.2010.89>
13. Schedin F., Geim A. K., Morozov S. V., Hill E. Detection of individual gas molecules adsorbed on graphene. *Nature Materials*, 2007, vol. 6, pp. 652–655. <https://doi.org/10.1038/nmat1967>
14. Vivechand S. R. C., Rout C. S., Subrahmanyam K. S. et al. Graphene-based electrochemical supercapacitors. *J. Chem. Sci.*, 2008, vol. 120, iss. 1, pp. 9–13. <https://doi.org/10.1007/s12039-008-0002-7>
15. Tadjer M. J., Anderson T. J., Myers-Ward R. L. et al. Step edge influence on barrier height and contact area in vertical heterojunctions between epitaxial graphene and *n*-type 4H-SiC. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, vol. 104, p. 073508. <https://doi.org/10.1063/1.4866024>
16. Rehman M. A., Akhtar I., Choi W. et al. Influence of an Al₂O₃ interlayer in a directly grown graphene-silicon Schottky junction solar cell. *Carbon*, 2018, vol. 132, pp. 157–164. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.02.042>
17. Yi M., Shen Z., Zhang X., Ma S. Achieving concentrated graphene dispersions in water/acetone mixtures by the strategy of tailoring Hansen solubility parameters. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2013, vol. 46, p. 025301. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/46/2/025301>
18. Varrla E., Paton K. R., Backes C. et al. Turbulence-assisted shearexfoliation of graphene using household detergent and a kitchen blender. *Nanoscale*, 2014, vol. 6, p. 11810. <https://doi.org/10.1039/C4NR03560G>
19. Yi M., Shen Z. Kitchen blender for producing high-quality few-layer graphene. *Carbon*, 2014, vol. 78, pp. 622–626. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2014.07.035>
20. Nair R. R., Blake P., Grigorenko A. N. et al. Fine structure constant defines visual transparency of graphene. *Science*, 2008, vol. 320, p. 1308. <https://doi.org/10.1126/science.1156965>
21. Biswas R. Modeling the liquid phase exfoliation of graphene in polar and nonpolar solvents. *Bioint. Res. Appl. Chem.*, 2022, vol. 12, iss. 6, pp. 7404–7415. <https://doi.org/10.33263/BRIAC126.74047415>
22. O'Connell M. J., Boul P., Ericson L. M. et al. Reversible water-solubilization of single-walled carbon nanotubes by polymer wrapping. *Chem. Phys. Lett.*, 2001, vol. 342, pp. 265–271. [http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2614\(01\)00490-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2614(01)00490-0)
23. Mohamed M., Tripathy M., Majeed A. A. Studies on the thermodynamics and solute-solvent interaction of Polyvinylpyrrolidone wrapped single walled carbon nanotubes (PVP-SWNTs) in water over temperature range 298.15 — 313.15 K. *Arabian Journal of Chemistry*, 2013, vol. 10, iss. 2, pp. S1726–S1730. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.06.022>
24. Mohamed M., Shah S. A. A., Mohamed R. et al. Solute Solvent Interactions of Polyvinyl Pyrrolidone Wrapped Single Walled Carbon Nanotubes (PVP-SWNTs) in Water by Viscometric Studies. *Oriental Journal of Chemistry*, 2013, vol. 29, iss. 2, pp. 539–544. <http://dx.doi.org/10.13005/ojc/290221>
25. Ferrari A. C. Raman spectroscopy of graphene and graphite: Disorder, electron-phonon coupling, doping and nonadiabatic effects. *Solid State Communications*, 2007, vol. 143, pp. 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2007.03.052>
26. Ferrari A. C., Meyer J. C., Scardaci V. et al. Raman Spectrum of Graphene and Graphene Layers. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, vol. 97, p. 187401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.97.187401>
27. Sharma B. L., Purohit R. K. *Semiconductor heterojunctions*. Oxford, Pergamon Press, 1974, 216 p.

Дата надходження рукопису
до редакції 10.02 2023 р.

DOI: 10.15222/TKEA2023.1-2.03
UDC 621.315.592

I. P. KOZIARSKYI¹, M. I. ILASHCHUK¹, I. G. ORLETSKYI¹,
D. P. KOZIARSKYI¹, L. A. MYRONIUK², D. V. MYRONIUK²,
A. I. IEVTUSHENKO², I. M. DANYLENKO³, E. V. MAISTRUK¹

Ukraine, Chernivtsi, ¹Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University;
Kyiv, ²Institute for Problems of Materials Sciences, NAS of Ukraine,
³V. Ye. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, NAS of Ukraine

E-mail: i.koziarskyi@chnu.edu.ua

I–V-CHARACTERISTICS OF SCHOTTKY DIODES BASED ON GRAPHENE/*n*-Si HETEROSTRUCTURES

*The authors investigated the electrical properties of graphene/*n*-Si Schottky diode heterostructures obtained by mechanical exfoliation of graphite to thin-layer graphene in an aqueous solution of polyvinylpyrrolidone as a result of the dynamics of the dispersed graphite mixture under the action of a mechanical blender. The graphene/*n*-Si structures differed in terms of duration of applying graphene films on *n*-Si substrates: 5, 10 and 15 min. The temperature of the substrates did not exceed 250°C. The formation of graphene layers was confirmed by the study of Raman scattering spectra in the frequency range of 1000–3250 cm⁻¹, which show G and 2D bands with the features characteristic of low-layer graphene. The dependence of the electrical properties of the investigated surface-barrier graphene/*n*-Si structures on the duration of sputtering of graphene films was established. It was found that the value of the contact potential difference ϕ_k was 1.35, 1.32 and 1.27 V and the*

series resistance at room temperature was $3.4 \cdot 10^6$, $3.4 \cdot 10^3$ and $3.7 \cdot 10^3 \Omega$ for structures with the duration of graphene layer deposition 5, 10 and 15 min, respectively. The formation of both forward and reverse currents was dominated by the tunneling of charge carriers through the potential barrier.

Keywords: Schottky diodes, heterostructures, low-layer graphene/n-Si, electrical properties.

REFERENCES

1. Morozov S. V., Novoselov K. S., Katsnelson M. I. et al. Giant intrinsic carrier mobilities in graphene and its bilayer. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, vol. 100, iss. 1, p. 016602. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.016602>
2. Novoselov K. S., Geim A. K., Morozov S. V. et al. Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene. *Nature*, 2005, vol. 438, pp. 197–200. <https://doi.org/10.1038/nature04233>
3. Novoselov K. S., Geim A. K., Morozov S. V. et al. Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 2004, vol. 306, iss. 5696, pp. 666–669. <https://doi.org/10.1126/science.1102896>
4. Katsnelson M. I. Graphene: carbon in two dimensions. *Materials Today*, 2007, vol. 10, pp. 20–27. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(06\)71788-6](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(06)71788-6)
5. Geim A. K., Novoselov K. S. The rise of graphene. *Nature Materials*, 2007, vol. 6, pp. 183–191. <https://doi.org/10.1038/nmat1849>
6. Soldano C., Mahmood A., Dujardin E. Production, properties and potential of graphene. *Carbon*, 2010, vol. 48, pp. 2127–2150. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.01.058>
7. Bonaccorso F., Sun Z., Hasan T., Ferrari A. C. Graphene photonics and optoelectronics. *Nature Photonics*, 2010, vol. 4, pp. 611–622. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2010.186>
8. Bartolomeo A. D. Graphene Schottky diodes: an experimental review of the rectifying graphene/semiconductor heterojunction. *Physics Reports*, 2016, vol. 606, pp. 1–58. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2015.10.003>
9. Bae S., Kim H., Lee Y. et al. Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes. *Nature Nanotechnology*, 2010, vol. 5, pp. 574–578. <https://doi.org/10.1038/nnano.2010.132>
10. Wang Y., Chen X., Zhong Y. et al. Large area, continuous, few-layered graphene as anodes in organic photovoltaic devices. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, vol. 95, p. 063302. <https://doi.org/10.1063/1.3204698>
11. Tongay S., Schumann T., Miao X. et al. Tuning Schottky diodes at the many-layer-graphene/semiconductor interface by doping. *Carbon*, 2011, vol. 49, pp. 2033–2038. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2011.01.029>
12. Schwierz F. Graphene transistors. *Nature Nanotechnology*, 2010, vol. 5, pp. 487–496. <https://doi.org/10.1038/nnano.2010.89>
13. Schedin F., Geim A. K., Morozov S. V., Hill E. Detection of individual gas molecules adsorbed on graphene. *Nature Materials*, 2007, vol. 6, pp. 652–655. <https://doi.org/10.1038/nmat1967>
14. Vivechand S. R. C., Rout C. S., Subrahmanyam K. S. et al. Graphene-based electrochemical supercapacitors. *J. Chem. Sci.*, 2008, vol. 120, iss. 1, pp. 9–13. <https://doi.org/10.1007/s12039-008-0002-7>
15. Tadjer M. J., Anderson T. J., Myers-Ward R. L. et al. Step edge influence on barrier height and contact area in vertical heterojunctions between epitaxial graphene and *n*-type 4H-SiC. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, vol. 104, p. 073508. <https://doi.org/10.1063/1.4866024>
16. Rehman M. A., Akhtar I., Choi W. et al. Influence of an Al₂O₃ interlayer in a directly grown graphene-silicon Schottky junction solar cell. *Carbon*, 2018, vol. 132, pp. 157–164. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.02.042>
17. Yi M., Shen Z., Zhang X., Ma S. Achieving concentrated graphene dispersions in water/acetone mixtures by the strategy of tailoring Hansen solubility parameters. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2013, vol. 46, p. 025301. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/46/2/025301>
18. Varrla E., Paton K. R., Backes C. et al. Turbulence-assisted shear exfoliation of graphene using household detergent and a kitchen blender. *Nanoscale*, 2014, vol. 6, p. 11810. <https://doi.org/10.1039/C4NR03560G>
19. Yi M., Shen Z. Kitchen blender for producing high-quality few-layer graphene. *Carbon*, 2014, vol. 78, pp. 622–626. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2014.07.035>
20. Nair R. R., Blake P., Grigorenko A. N. et al. Fine structure constant defines visual transparency of graphene. *Science*, 2008, vol. 320, p. 1308. <https://doi.org/10.1126/science.1156965>
21. Biswas R. Modeling the liquid phase exfoliation of graphene in polar and nonpolar solvents. *Bioint. Res. Appl. Chem.*, 2022, vol. 12, iss. 6, pp. 7404–7415. <https://doi.org/10.33263/BRIAC126.74047415>
22. O'Connell M. J., Boul P., Ericson L. M. et al. Reversible water-solubilization of single-walled carbon nanotubes by polymer wrapping. *Chem. Phys. Lett.*, 2001, vol. 342, pp. 265–271. [http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2614\(01\)00490-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2614(01)00490-0)
23. Mohamed M., Tripathy M., Majeed A. A. Studies on the thermodynamics and solute-solvent interaction of Polyvinylpyrrolidone wrapped single walled carbon nanotubes (PVP-SWNTs) in water over temperature range 298.15 — 313.15 K. *Arabian Journal of Chemistry*, 2013, vol. 10, iss. 2, pp. S1726–S1730. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.06.022>
24. Mohamed M., Shah S. A. A., Mohamed R. et al. Solute Solvent Interactions of Polyvinyl Pyrrolidone Wrapped Single Walled Carbon Nanotubes (PVP-SWNTs) in Water by Viscometric Studies. *Oriental Journal of Chemistry*, 2013, vol. 29, iss. 2, pp. 539–544. <http://dx.doi.org/10.13005/ojc/290221>
25. Ferrari A. C. Raman spectroscopy of graphene and graphite: Disorder, electron-phonon coupling, doping and nonadiabatic effects. *Solid State Communications*, 2007, vol. 143, pp. 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2007.03.052>
26. Ferrari A. C., Meyer J. C., Scardaci V. et al. Raman Spectrum of Graphene and Graphene Layers. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, vol. 97, p. 187401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.97.187401>
27. Sharma B. L., Purohit R. K. *Semiconductor heterojunctions*. Oxford, Pergamon Press, 1974, 216 p.

Опис статті для цитування:

Козярський І. П., Ілашчук М. І., Орлецький І. Г., Козярський Д. П., МIRONЮК Л. А., МIRONЮК Д. В., Євтушенко А. І., Даниленко І. М., Майстрок Е. В. Вольт-амперні характеристики діодів Шотткі на основі гетероструктури графен/n-Si. Технологія та конструювання в електронній апаратурі, 2023, № 1–2, с. 3–8. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2023.1-2.03>

Cite the article as:

Koziarskyi I. P., Ilashchuk M. I., Orletskyi I. G., Koziarskyi D. P., Myroniuk L. A., Myroniuk D. V., Ievtushenko A. I., Danylenko I. M., Maistruk E. V. I-V-characteristics of Schottky diodes based on graphene/n-Si heterostructures. Technology and design in electronic equipment, 2023, no. 1–2, pp. 3–8. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2023.1-2.03>

К. т. н. І. В. ЦЕВУХ, А. А. САКОВИЧ, В. І. ЦЕВУХ

Україна, Національний університет «Одеська політехніка»

E-mail: itsevukh@op.edu.ua

ПОКАЗНИК ПОЛІПШЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ ОДНОКАНАЛЬНИХ СИСТЕМ ОБРОБКИ СИГНАЛУ В УМОВАХ ГАУСОВИХ ЗАВАД

Досліджувались два нелінійних одноканальних виявника корисного сигналу в умовах адитивної суміші некорельованої та корельованої гаусових завад. Для порівняння ефективності виявників з класу нелінійних структур використано показник поліпшення, який є відношенням величин сигнал/завада на виході нелінійної системи та на її вході, усереднений за всіма можливими радіальними швидкостями цілі. Наведено числові результати порівняльного аналізу потенційної ефективності розглянутих алгоритмів для різних спектрально-кореляційних параметрів адитивної суміші некорельованої та корельованої завад.

Ключові слова: система обробки сигналу, адитивна суміш завад, коефіцієнт поліпшення.

Виявлення сигналів рухомих цілей на тлі адитивної суміші некорельованої та корельованої завад є одним з актуальних і достатньо складних завдань, що вирішуються в когерентно-імпульсних радіолокаційних системах (РЛС) [1—4]. Корельовані (пасивні) завади у вигляді відбивань від нерухомих або повільно рухомих об'єктів істотно порушують штатну роботу радіолокаційних систем [1, 2]. Інтенсивність пасивних завад зазвичай значно перевищує рівень власних шумів приймача, що може призвести до невиявлення корисного сигналу, а отже до пропуску цілі.

Відомо, що найбільш загальним підходом до розв'язання завдань виявлення корисних сигналів в умовах завад є знаходження відношення правдоподібності (або відповідної йому достатньої статистики) та порівняння її з деяким порогом [2, 3]. Для гаусових моделей сигналу та завад структура оптимального виявника, синтезована на основі тесту відношення правдоподібності, визначається достатньою статистикою вигляду [3]

$$l = X^* \left[B_3^{-1} - (B_C + B_3)^{-1} \right] X, \quad (1)$$

де X — N -мірний вектор вхідного процесу;

B_C, B_3 — коваріаційні матриці сигналу та завад;

* — знак комплексного спряження та транспонування.

Складність практичної реалізації алгоритму обробки (1) в умовах апріорної невизначеності параметрів сигналу та завад призвела до розробки спрощених варіантів його побудови. У [5, 6] для розв'язання задачі виявлення імпульсного сигналу на фоні гаусових завад з невідомими кореляційними властивостями запропоновано в класі нелінійних структур використовувати, відповідно, достатні статистики

$$T^2 = X^* \hat{B}_3^{-1} X; \quad (2)$$

$$C^2 = X^* \hat{B}_3^{-2} X, \quad (3)$$

$$\text{де } \hat{B}_3 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i X_i^*$$

$\hat{B}_3$ — оцінка максимальної правдоподібності коваріаційної матриці завади B_3 ;

X_i — N -мірний вектор вибірових відліків вхідного процесу;

n — обсяг навчальної вибірки.

Статистика T^2 являє собою статистику Готелінга для перевірки гіпотези H_0 : X належить гаусовому розподілу $G(0, B_3)$ (тільки завада) проти альтернативи H_1 : вибірка належить гаусовому розподілу $G(\mu, B_3)$ $\mu \neq 0$ (завада + сигнал) для невідомої коваріаційної матриці завади B_3 та скінченного обсягу вибірки [5].

Статистика C^2 була отримана у [6] з відношення правдоподібності у припущенні, що рівень корисного сигналу є малим порівняно з рівнем корельованих завад, а роздільна здатність з доплерівської фази сигналу ігнорується. Попри наявність публікацій, присвячених аналізу ефективності алгоритму, що реалізує статистику Готелінга [7—9], відсутні висновки результати щодо порівняння алгоритмів (2) і (3).

Метою цієї роботи є порівняння потенційної ($n \rightarrow \infty$) ефективності двох наведених вище нелінійних одноканальних систем виявлення корисного сигналу в умовах адитивної суміші некорельованої та корельованої гаусових завад.

Для адекватного розв'язання поставленого завдання використаємо критерій ефективності, усереднений в усьому діапазоні значень радіальної швидкості цілі.

Вочевидь, що алгоритми виявлення (2) та (3) є адаптивними, і при збільшенні обсягу навчальної вибірки ($n \rightarrow \infty$) їхні характеристики прямуватимуть до потенційних значень, що визначаються достатніми статистиками вигляду

$$t^2 = X^* B_3^{-1} X; \quad (4)$$

$$c^2 = X^* B_3^{-2} X, \quad (5)$$

Запишемо алгоритм (5) так:

$$c^2 = X^* B_3^{-2} X = X^* B_3^{-1} B_3^{-1} X = Z^* Z = |Z|^2, \quad (6)$$

де $Z = B_3^{-1} X$;

$|\cdot|^2$ — операція обчислення квадрата модуля комплексного вектора.

Вектор Z можна подати у вигляді

$$Z^* = X^* [V_N^{(1)}, V_N^{(2)}, \dots, V_N^{(i)}, \dots, V_N^{(N)}] = X^* V, \quad (7)$$

де $V_N^{(i)} = B_3^{-1} e_i$; e_i — i -й стовпець одиничної матриці E_N розміром $N \times N$.

Зазначимо, що вектор $V_N^{(i)}$ збігається з i -м стовпцем матриці B_3^{-1} .

Перетворимо (7) в такий спосіб:

$$Z^* = [X^* V_N^{(1)}, X^* V_N^{(2)}, \dots, X^* V_N^{(i)}, \dots, X^* V_N^{(N)}]. \quad (8)$$

З урахуванням (8) вирішальну статистику (5) можна подати у вигляді

$$c^2 = \left\| [X^* V_N^{(1)}, X^* V_N^{(2)}, \dots, X^* V_N^{(i)}, \dots, X^* V_N^{(N)}] \right\|^2, \quad (9)$$

Кожен елемент z_i вектора Z у (8) можна трактувати як результат проходження вхідного процесу X через нерекурсивний фільтр з ваговими коефіцієнтами $V_N^{(i)}$.

Зробимо аналогічні перетворення для алгоритму (4):

$$t^2 = X^* B_3^{-1} X = X^* B_{3U}^{-1/2} B_{3L}^{-1/2} X = Y^* Y = |Y|^2, \quad (10)$$

де $Y = B_{3L}^{-1/2} X = [X^* B_{3U}^{-1/2}]^T$; $B_{3U}^{-1/2}, B_{3L}^{-1/2}$ — відповідно, нижня та верхня трикутні матриці з розкладу Холецкого, $B_{3U}^{-1/2} B_{3L}^{-1/2} = B_3^{-1}$.

Вектор Y можна подати у вигляді

$$Y^* = X^* [U_N^{(1)}, U_N^{(2)}, \dots, U_N^{(i)}, \dots, U_N^{(N)}] = X^* U, \quad (11)$$

де $U_N^{(i)} = B_{3L}^{-1/2} e_i$.

Перетворимо (11) в такий спосіб:

$$Y^* = [X^* U_N^{(1)}, X^* U_N^{(2)}, \dots, X^* U_N^{(i)}, \dots, X^* U_N^{(N)}]. \quad (12)$$

З урахуванням (12) вирішальну статистику (4) можна подати у вигляді

$$t^2 = \left\| [X^* U_N^{(1)}, X^* U_N^{(2)}, \dots, X^* U_N^{(i)}, \dots, X^* U_N^{(N)}] \right\|^2. \quad (13)$$

За аналогією з (8) кожен елемент y_i вектора Y в (12) можна трактувати як результат проходження вхідно-

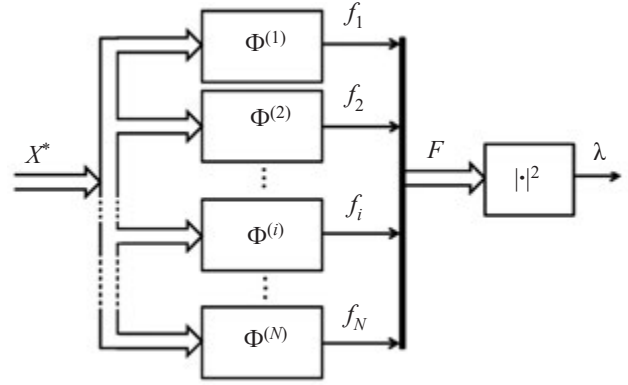


Рис. 1. Структурна схема нелінійної системи обробки сигналу виду $X^* \Phi X$

го процесу X через нерекурсивний фільтр з ваговими коефіцієнтами $U_N^{(i)}$.

Структурна схема, що реалізує алгоритми (9) та (13), представлена на **рис. 1**, де $\Phi^{(i)}$ — нерекурсивні фільтри з ваговими коефіцієнтами $V_N^{(i)}$ для алгоритму (9) або $U_N^{(i)}$ для алгоритму (13); λ — достатня статистика, відповідно, c^2 для (9) або t^2 для (13).

Відомо, що для реалізації систем селекції рухомих цілей (**СРЦ**), які застосовуються в оглядових радіолокаційних станціях, часто використовуються саме нерекурсивні фільтри, які також називають КІХ-фільтрами (фільтрами з кінцевою імпульсною характеристикою) [3]. Одним з параметрів, що характеризує ефективність фільтрів СРЦ, є коефіцієнт поліпшення I_F (*improvement factor*) системи СРЦ — частка від ділення значень відношення сигнал/завада на виході та на вході фільтра СРЦ, усереднене за всіма можливими радіальними швидкостями цілі. Іншими словами, коефіцієнт поліпшення системи СРЦ показує, у скільки разів співвідношення сигнал/завада на виході більше, ніж на вході. Швидкості цілі вважаються рівномірними в усьому діапазоні радіальної швидкості. Коефіцієнт поліпшення I_F може бути представлений у вигляді [10]

$$I_F = W^* W / W^* B_3 W, \quad (14)$$

де W — вектор вагових коефіцієнтів фільтра, що залежить від обраного критерію оптимальності, а також коваріаційної матриці діючої завади B_3 .

Як було зазначено вище, елементи z_i вектора Z у (8) та елементи y_i вектора Y у (12) можливо трактувати як результати проходження вхідного процесу X через нерекурсивні фільтри з ваговими коефіцієнтами $V_N^{(i)}$ та $U_N^{(i)}$ відповідно. Тому для порівняння ефективності нелінійних одноканальних систем виявлення сигналу (4) і (5) доцільно буде використати показник поліпшення P_F , який за аналогією з коефіцієнтом поліпшення I_F є часткою від ділення значень

відношення сигнал/завада на виході та на вході нелінійної системи.

Для алгоритму виявлення (9) з урахуванням (14) буде справедливо

$$P_{FC} = \frac{|V^*V|^2}{|V^*B_3V|^2}, \quad (15)$$

де $V^* = [V_N^{(1)}, V_N^{(2)}, \dots, V_N^{(i)}, \dots, V_N^{(N)}]$; $V_N^{(i)} = B_3^{-1}e_i$.

Тоді

$$|V^*V|^2 = \sum_{i=1}^N B_{3ii}^{-2} = \text{Tr}B_3^{-2};$$

$$|V^*B_3V|^2 = \sum_{i=1}^N B_{3ii}^{-1} = \text{Tr}B_3^{-1}, \quad (16)$$

де $\text{Tr}[\cdot]$ — слід матриці.

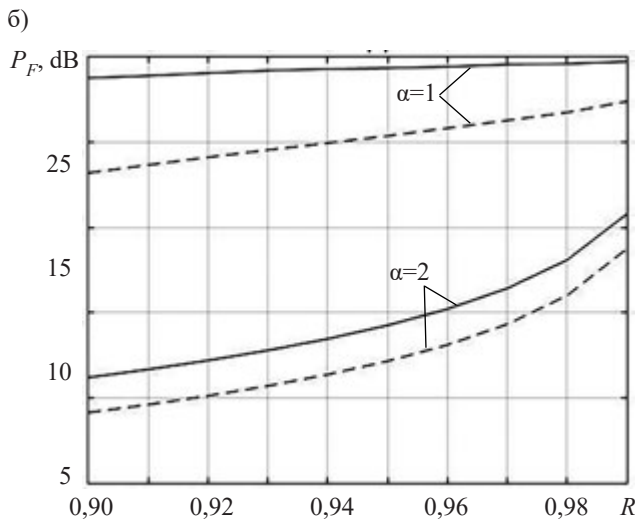
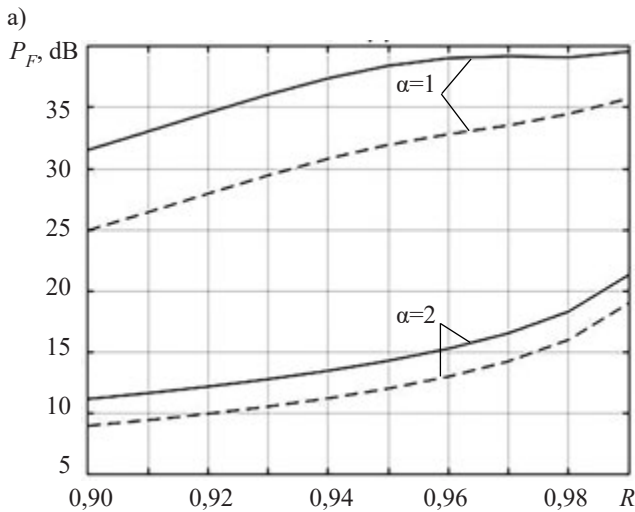


Рис. 2. Показники поліпшення алгоритмів (4) та (5) (відповідно, пунктирна та суцільна лінії) залежно від модуля першого міжперіодного коефіцієнта кореляції R та параметрів адитивної суміші некорельованої та корельованої завад:

a — $N = 5$, $\beta = 40$ дБ; $б$ — $N = 7$, $\beta = 30$ дБ

Отже, показник поліпшення нелінійної одноканальної системи виявлення сигналу в умовах гаусових завад, що реалізує алгоритм (9):

$$P_{FC} = \text{Tr}B_3^{-2} / \text{Tr}B_3^{-1}. \quad (17)$$

Для нелінійного алгоритму виявлення (13) з урахуванням (14)

$$P_{FT} = |U^*U|^2 / |U^*B_3U|^2, \quad (18)$$

де $U^* = [U_N^{(1)}, U_N^{(2)}, \dots, U_N^{(i)}, \dots, U_N^{(N)}]$;

$$U = B_3^{-1/2}e_i.$$

Тоді

$$|U^*U|^2 = \sum_{i=1}^N B_{3ii}^{-1} = \text{Tr}B_3^{-1};$$

$$|U^*B_3U|^2 = N. \quad (19)$$

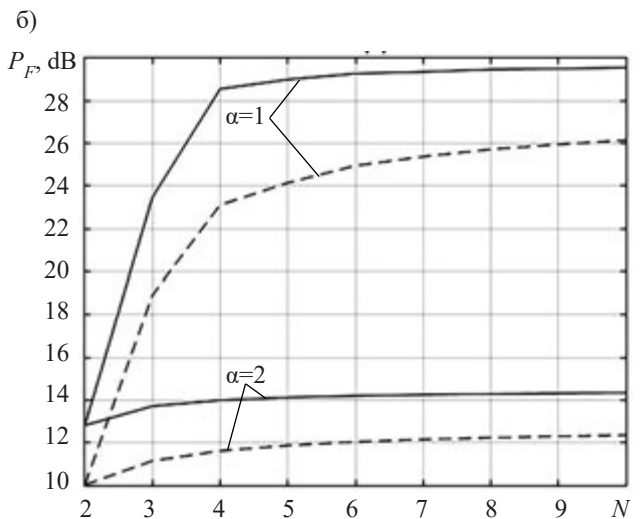
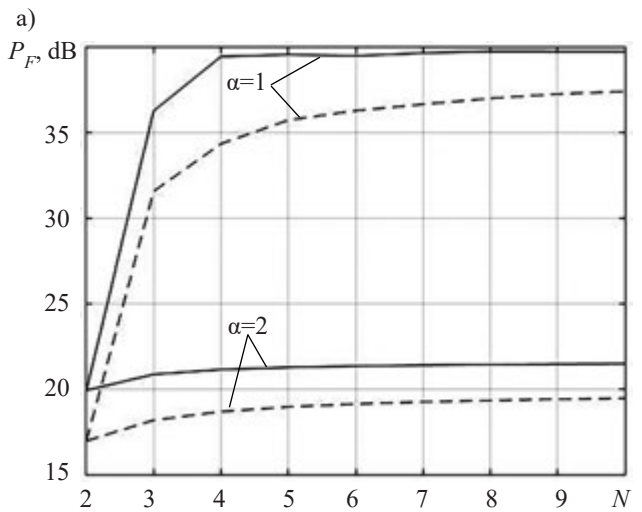


Рис. 3. Показники поліпшення алгоритмів (4) та (5) (відповідно, пунктирна та суцільна лінії) залежно від розміру вектора вхідного процесу N та параметрів суміші некорельованої та корельованої завад:

a — $R = 0.99$, $\beta = 40$ дБ; $б$ — $R = 0.95$, $\beta = 30$ дБ

Показник поліпшення нелінійної одноканальної системи виявлення сигналу в умовах гаусових завад, що реалізує алгоритм (13):

$$P_{FT} = TrB_3^{-1}/N. \quad (20)$$

На рис. 2 наведено дані для проведення порівняльного аналізу ефективності алгоритмів (2) і (3) за критерієм “показника поліпшення” залежно від модуля першого міжперіодного коефіцієнта кореляції R за різних значень параметрів адитивної суміші некорельованої та корельованої завад. Вважалося, що корельована завада має гаусову ($\alpha = 1$) або експоненціальну ($\alpha = 2$) форму спектру флуктуацій, модуль R приймає значення з діапазону $[0,9 \dots 0,99]$.

З графіків видно, що за застосуванням у роботі показником поліпшення P_F потенціальна ($n \rightarrow \infty$) ефективність обох алгоритмів істотно залежить від швидкості спаду та нормованої ширини спектра завади ΔFT — тобто від модуля першого міжперіодного коефіцієнта кореляції $R = f(\Delta F/F)$, де ΔF — ширина спектра завади; F — частота повторення РЛС. Пасивна завада ефективніше придушується у разі гаусової апроксимації ($\alpha = 1$), яка характеризується швидким спадом спектра.

На рис. 3 наведено дані для проведення порівняльного аналізу ефективності алгоритмів (2) та (3) за критерієм “показника поліпшення” залежно від розміру вектора вхідного процесу N (кількості оброблюваних імпульсів). З графіків видно, що зі збільшенням кількості оброблюваних імпульсів швидкість досягнення P_F свого максимального значення для алгоритму (3) декілька вище, ніж для (2). Для РЛС з частковою когерентною обробкою сигналу з подальшим некогерентним накопиченням результати досліджень, наведені на рис. 3, можуть бути корисними при виборі прийнятних співвідношень між тривалістями когерентної та некогерентної обробки.

У всіх проведених розрахунках потенційна ефективність виявника (3) для використаних в роботі параметрів завад була вищою, ніж виявника (2).

Висновок

Таким чином, проведений порівняльний аналіз потенціальної ($n \rightarrow \infty$) ефективності двох нелінійних одноканальних систем виявлення корисного сигналу

в умовах адитивної суміші некорельованої та корельованої гаусових завад дозволив встановити, що за показником поліпшення (частка від ділення значень відношення сигнал/завада на виході та вході нелінійної системи), усередненим за всіма можливими радіальними швидкостями цілі, і обраними в цій роботі параметрами завад потенціальна ефективність розробленого в [6] алгоритму є вищою за ефективність алгоритму, що реалізує відому статистику Готелінга.

Отримані результати можуть бути використані для порівняльного аналізу ефективності деяких існуючих когерентно-імпульсних радіолокаційних систем щодо виявлення сигналів рухомих цілей на тлі адитивної суміші некорельованої та корельованої завад

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Skolnik M. I. (Ed.) *Radar Handbook*. New York: McGraw Hill, 2008, 1352 p.
2. Melvin W. L., Scheer J. A. (Eds.) *Principles of Modern Radar: Advanced Techniques*. New York, SciTech Publishing, IET, Edison, 2013, 846 p.
3. Richards M. A. *Fundamentals of Radar Signal Processing*. New York: McGraw Hill Education, 2014, 618 p.
4. Likhovitskiy D. I., Riabukha V. P., Semeniaka A. V. et al. Protection of coherent pulse radars against combined interferences. 1. Modifications of STSP systems and their ultimate performance capabilities. *Radioelectronics and Communications Systems*, 2019, vol. 62, no. 7, p. 311–341. <https://doi.org/10.3103/S073527271907001X>
5. Бартенев В. Г., Шлома А. М. О построении адаптивного обнаружителя импульсных сигналов на фоне нормальных помех с неизвестными корреляционными свойствами. *Радиоэлектроника*, 1978, № 2, с. 3–8.
6. Цевух И. В. Алгоритм обработки гауссовых сигналов условиях гауссовых помех. *Радиоэлектроника*, 1988, № 12, с. 53–54.
7. Averochkin V. O., Troyanskiy O. V. The Hotelling detector using quadrature channels decorrelation. *Праці Одеського політехнічного університету*, 2014, vol. 1(43), p. 225–229.
8. Ronald W. Butler, Pooria Pakrooh, Louis L. Scharf. A MIMO Version of the Reed-Yu Detector and its Connection to the Wilks Lambda and Hotelling T2 Statistics. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2020, vol. 68, p. 2925–2924. <https://doi.org/10.1109/TSP.2020.2988996>
9. Орлов В. В. Эффективность адаптивного обнаружения сигнала на основе теста Хотеллинга. *Збірник наукових праць ІПМЕ*, 2010, № 57, с. 72–79.
10. IEEE Standard Radar Definitions. *IEEE Std 686-1997*, 1998, 40 p. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.1998.86185>

Дата надходження рукопису
до редакції 02.03 2023 р.

Опис статті для цитування:

Цевух І. В., Сакович А. А., Цевух В. І. Показник поліпшення нелінійних одноканальних систем обробки сигналу в умовах гаусових завад. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*, 2023, № 1–2, с. 9–13. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2023.1-2.09>

Cite the article as:

Tsevuikh I. V., Sakovich A. A., Tsevuikh V. I. Index of improvement of nonlinear single-channel signal detection systems under Gaussian noise. *Technology and design in electronic equipment*, 2023, no. 1–2, pp. 9–13. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2023.1-2.09>

INDEX OF IMPROVEMENT OF NONLINEAR SINGLE-CHANNEL SIGNAL
DETECTION SYSTEMS UNDER GAUSSIAN NOISE

Detection of signals of moving targets against the background of an additive mixture of uncorrelated and correlated interference is one of the relevant and rather complex tasks solved in coherent-pulse radar systems. Correlated interference in the form of disturbing reflections from stationary or slowly moving objects significantly disrupts the regular operation of radar systems, which can lead to missing the target. The article presents a comparative analysis of the potential efficiency of two non-linear single-channel systems for useful signal detection operating under an additive mixture of uncorrelated and correlated Gaussian noise. To solve the task of analyzing the quality of detectors from the class of nonlinear structures, an improvement index was proposed, which is the signal/interference ratio at the output of the nonlinear system to the signal/interference ratio at its input, averaged over all possible radial velocities of the target. Numerical results of a comparative analysis of the potential effectiveness of the considered algorithms for various spectral-correlation parameters of interference are given. It was established that the potential efficiency of the algorithm developed by the author is higher than the efficiency of the algorithm implementing the well-known Hotelling statistics based on the improvement index and the parameters of the additive mixture of uncorrelated and correlated interference selected in this work.

Keywords: signal processing system, additive mixture of noises, improvement index.

REFERENCES

1. Skolnik M. I. (Ed.) *Radar Handbook*. New York: McGraw Hill, 2008, 1352 p.
2. Melvin W. L., Scheer J. A. (Eds.) *Principles of Modern Radar: Advanced Techniques*. New York: SciTech Publishing, IET, Edison, 2013, 846 p.
3. Richards M. A. *Fundamentals of Radar Signal Processing*. New York, McGraw Hill Education, 2014, 618 p.
4. Lekhovyt'skiy D. I., Riabukha V. P., Semeniaka A. V. et al. Protection of coherent pulse radars against combined interferences. 1. Modifications of STSP systems and their ultimate performance capabilities. *Radioelectronics and Communications Systems*, 2019, vol. 62, no. 7, p. 311–341. <https://doi.org/10.3103/S073527271907001X>
5. Bartenev V. G., Shloma A. M. [On the construction of an adaptive detector of pulse signals against the background of normal interference with unknown correlation properties]. *Radioelectronics*, 1978, no. 2, pp. 3–8. (Rus)
6. Tsevukh I. V. [An algorithm of the gaussian signal-processing in the presence of gaussian interference]. *Radioelectronics*, 1988, no. 12, pp. 53–54. (Rus)
7. Averochkin V. O., Troyanskiy O. V. The Hotelling Detector using quadrature channels decorrelation. *Proceedings of the Odessa Polytechnic University*, 2014, vol. 1(43), pp. 225–229.
8. Ronald W. Butler, Pooria Pakrooh, Louis L. Scharf. A MIMO Version of the Reed-Yu Detector and its Connection to the Wilks Lambda and Hotelling T² Statistics. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2020, vol. 68, p. 2925–2924. <https://doi.org/10.1109/TSP.2020.2988996>
9. Orlov V. V. Effectiveness of adaptive signal detection based on the Hotelling test. *Collection of scientific papers of the G.E. Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering*, 2010, no. 57, pp. 72–79. (Rus)
10. IEEE Standard Radar Definitions. *IEEE Std 686-1997*, 1998, 40 p. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.1998.86185>

А. Ю. МАНЖЕЛІЙ, к. т. н. О. Ф. БОНДАРЕНКО

Україна, Україна, м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського

E-mail: bondarenkoaf@gmail.com

ГІБРИДНИЙ НАКОПИЧУВАЧ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТИПУ «АКУМУЛЯТОРНА БАТАРЕЯ — СУПЕРКОНДЕНСАТОР» ДЛЯ МІКРОМОБІЛЬНОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ

Обґрунтовано важливість гібридизації системи живлення мікромобільного електротранспорту з урахуванням жорстких обмежень щодо кінцевих розмірів та ваги накопичувача на прикладі електровелосипеда. Наведено огляд основних типів топологій для гібридизації та проаналізовано переваги й недоліки кожного з них. Описано можливості використання суперконденсаторів як вторинного джерела гібридної системи. Запропоновано шлях подолання недоліків використання стандартних акумуляторів через їх поєднання із вторинним джерелом. Проведено розрахунки, які підтверджують доцільність використання гібридної системи для поліпшення експлуатаційних умов акумуляторної батареї. На прикладі електровелосипеда представлено алгоритм роботи системи накопичення для можливих режимів його роботи.

Ключові слова: гібридна система, суперконденсатор, акумуляторна батарея, гібридизація, топологія, мікромобільний електротранспорт, електровелосипед.

Машини з двигунами внутрішнього згоряння кожного дня заповнюють головні магістралі міст, утворюючи затори, які вносять дискомфорт в наше повсякденне життя. Тренд на екологічність та компактність вже відіграє свою роль у зміні вподобань городян при виборі транспорту для пересування містом. На сьогодні все більшої популярності набуває електротранспорт, але екологічні електромобілі, що потроху витісняють стандартні машини, не мають гнучкості у русі, яка б дозволила уникати цих заторів. Тому вибір людей все частіше припадає на компактний персональний транспорт, зокрема електросамокати або електровелосипеди, екологічність та безшумність яких оцінила вже не одна тисяча містян.

Мікромобільний електротранспорт дедалі більше заповнює вулиці великих міст, поступово “очищаючи” транспортний потік від екологічно “шкідливих” автомобілів. Більшість міських адміністрацій європейських міст активно розвивають велосипедну інфраструктуру, що підштовхує обирати саме цей вид транспорту. Загалом же вибір типу пересування, звичайно, залежить від вимог користувача. Але сучасні методи електрифікації персонального транспорту на сьогодні не є ідеальними. До того ж доволі часто пересування відбувається пагорбами та схилами, що створює певні несприятливі умови для експлуатації батареї, які знижують загальну тривалість її життєвого циклу.

Метою цього дослідження є поліпшення умов експлуатації акумуляторної батареї шляхом гібридизації системи живлення та збільшення терміну її служби.

Постановка проблеми

Гібридизацію системи живлення мікромобільного електротранспорту будемо розглядати на прикладі електровелосипеда. При виборі електровелосипеда або власній електрифікації звичайного велосипеда важливу роль відіграють бажані технічні характеристики. Залежно від потреб користувача може надаватися перевага або більшій швидкості, або більшій тривалості поїздки на одному заряді акумулятора. Але усіх власників електровелосипедів об’єднує загальна вимога — здатність системи живлення забезпечувати стабільну роботу двигуна у різноманітних ситуаціях. До того ж має бути мінімізований вплив усіх навантажень на систему живлення, щоб максимізувати тривалість життєвого циклу батареї. Тому при виборі електровелосипедів значну увагу приділяють основному джерелу живлення.

У більшості сучасних акумуляторів використовують літій-іонні комірки, які мають найвищі характеристики за питомою енергією та потужністю серед інших стандартних джерел енергії (**рис. 1**). Але хімічна природа накопичення енергії у літій-іонних акумуляторах зумовлює часткову деградацію в ході експлуатації. Вони здатні витримувати близько 3000 циклів заряд-розряд [1], після чого комірка втрачає приблизно 20% від номінальної ємності, що робить її непридатною для експлуатації за попередніх умов.

Варто зазначити, що у випадку стандартної системи живлення електровелосипеда характеристика розряду акумулятора матиме вигляд, схожий на наведений **рис. 2**, що у загальному випадку негативно впливатиме на тривалість життя комірок. Живлення двигуна, який застосовується у велосипедах, має

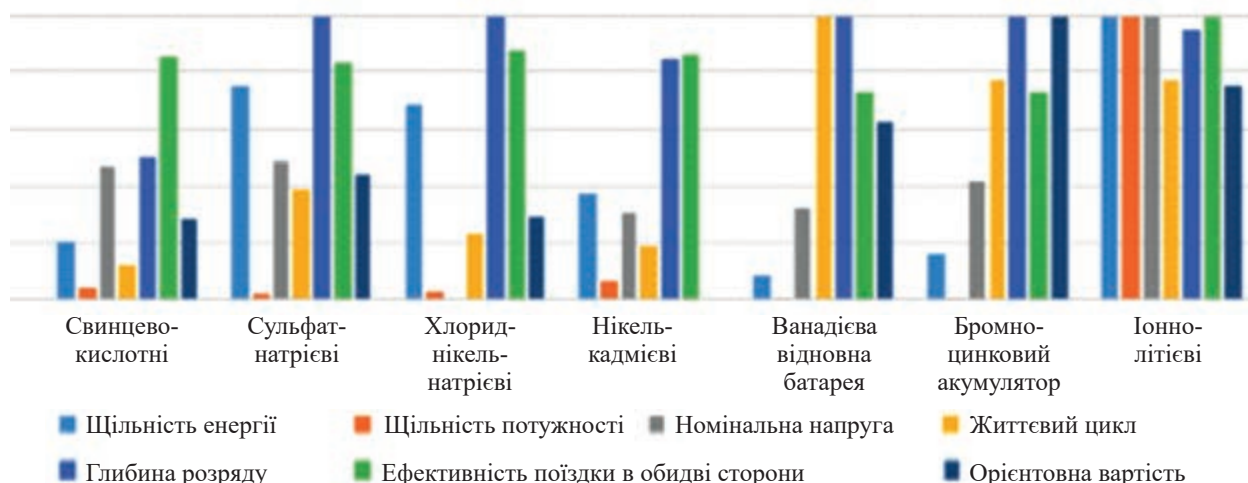


Рис. 1. Порівняння накопичувачів енергії за різними показниками [2]

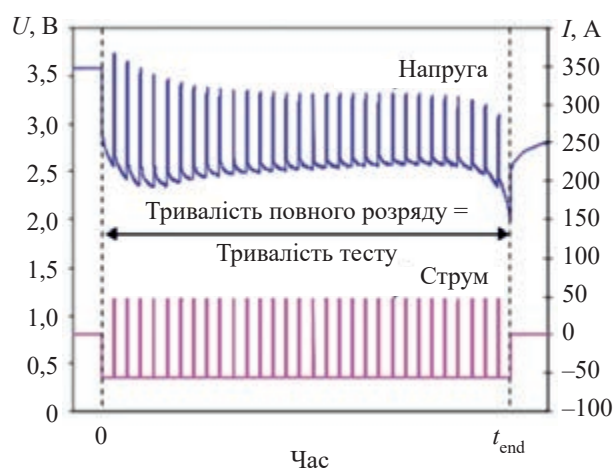


Рис. 2. Діаграми струму та напруги при розряданні літій-іонної комірки [4]

пульсуючий характер, як і зображено на рис. 2. Очевидно, що під час пульсації живлення напруга на акумуляторі також буде пульсуючою, з певною величиною просадки. Причому при розряданні акумулятора в ході експлуатації виникає ситуація, коли функціонування не може відбуватися у допустимому діапазоні напруги через її просадку. В цьому випадку подачу енергії буде обмежувати плата контролю стану акумулятора (*battery management system, BMS*), яка автоматично відмикає акумулятор від силової шини, коли напруга стає нижчою за мінімальний поріг. У разі відсутності такої системи буде виникати внутрішній нагрів кожної комірки акумулятора, що призводить до незворотних хімічних реакцій, які зменшують загальну ємність комірки. Проведене у [3] дослідження показує, що при використанні літій-іонних батарей за звичайних умов (струм розряду 1C) загальна ємність зменшується приблизно на 30% за приблизно 300 циклів заряд-розряд. Таке падіння ємності демонструє, що навіть за номінальних умов експлуатації деградація комірки відбувається

відносно швидко через внутрішні хімічні реакції та збільшення внутрішнього опору комірки.

Гібридизація системи, тобто комбінування двох або більше систем накопичення енергії, дозволить зменшити просадку напруги у моменти пульсацій за умови, що середній струм перевищуватиме максимальний номінальний струм основного джерела — акумулятора. Вторинне джерело повинно мати високу питому потужність при малій питомій енергії. Це дозволить нівелювати недолік основного джерела у моменти перенавантаження. Загальні переваги імплементації гібридних накопичувачів енергії [5]:

- мінімізація початкових витрат на побудову загальної системи накопичення (через розподілення потужності та енергії вторинна система має покривати лише частину необхідної потужності);
- підвищення загальної ефективності системи;
- мінімізація динамічного навантаження на вторинну систему накопичення та оптимізація роботи установки зі збільшенням її загального терміну експлуатації.

Використання суперконденсаторів як вторинного джерела

Зважаючи на вимоги до розмірів та ваги системи накопичення енергії, серед можливих варіантів гібридизації розглядатимемо поєднання стандартного літій-іонного акумулятора із суперконденсатором. Утворена система, відповідно, матиме два джерела енергії, причому суперконденсаторний блок відіграватиме роль допоміжного джерела, відбираючи на себе частину навантаження у пікові моменти споживання.

Батареї, які застосовуються в системах живлення, зазвичай мають електрохімічну природу. Тому системи накопичення енергії на базі таких батарей матимуть більший внутрішній опір та інерційність процесів, що зменшує питому потужність системи.

Накопичення ж енергії у суперконденсаторі має електростатичну природу й характеризується високою питомою потужністю — від 300 до 5000 Вт/кг [6], але водночас його недоліком є мала питома енергія та високий рівень саморозряду.

Як було зазначено вище, поєднання акумулятора та суперконденсаторів може повністю задовольняти вимогам щодо видачі потужності протягом усього руху на велосипеді. Варто зауважити, що у разі перевищення номінального режиму роботи стандартних акумуляторів частина енергії розсіюється на внутрішньому опорі у вигляді тепла, тим самим знижуючи ККД. У роботі [7] наведено порівняльну таблицю з зазначеною ефективністю розряду звичайних батарей та суперконденсаторів. Ефективність стандартних батарей складає близько 70—85% при розряджанні номінальним струмом. Своєю чергою, суперконденсатори, на відміну від літій-іонних акумуляторів, при пікових навантаженнях здатні забезпечити ККД на рівні 95%, тобто лише 5% енергії розсіюється у вигляді тепла [6]. Крім того, недоліком батарей є тривалий час заряджання, в середньому понад годину, що зумовлено інерційністю хімічних процесів всередині комірки. Натомість повне заряджання суперконденсаторів може відбуватися за лічені хвилини.

Огляд топологій гібридизації для використання у мікробільному електротранспорті

Поєднання двох або більше накопичувачів забезпечує більшу гнучкість системи, кращу динамічну характеристику, ефективність та більшу тривалість експлуатації всієї системи. Акумулятор і суперконденсаторний блок можуть бути під'єднані до навантаження напряму або через силові перетворювачі. Пряме підключення має найпростішу архітектуру, відносно малу вартість та невелику гнучкість, що позначається на складності регулювання. Натомість застосування одного чи декількох перетворювачів забезпечує розподілення навантаження на обидва накопичувачі. Загалом топології з'єднання двох джерел енергії можна класифікувати як:

- пасивна;
- напівактивна, в якій застосовується один керований перетворювач;
- повністю активна, що має у своїй конструкції два керованих перетворювачі.

Вибір тієї чи іншої топології повністю залежить від вимог до системи та бажаного ступеню управління розподіленням споживаної енергії між накопичувачами [5].

Пасивна топологія — найпростіший шлях поєднання накопичувачів енергії з, відповідно, високою питомою енергією та потужністю. Навантаження під'єднується до системи живлення напряму, без проміжних силових перетворювачів, які здатні регулювати розподілення енергії. Пасивна

архітектура являє собою паралельне з'єднання обох накопичувачів. При використанні суперконденсатора він буде відігравати роль фільтра нижніх частот через свій низький внутрішній опір. Недоліком такої системи є необхідність узгодження рівнів напруги основного та вторинного джерел, що у разі високої напруги потребує використання досить об'ємного вторинного джерела. Зумовлено це тим, що одна комірка суперконденсатора розрахована зазвичай на напругу 2,7—3,0 В. Крім того, пасивна топологія не дозволяє регулювати споживану енергію кожного з джерел [8].

Напівактивна топологія є компромісом між вартістю та гнучкістю управління всією системою, оскільки вона потребує один перетворювач постійної напруги [9]. Це дозволяє раціональніше використовувати ресурс джерела, до якого під'єднується перетворювач, що дозволяє зменшити кінцеву вагу та розміри накопичувача порівняно з пасивною топологією. Залежно від розташування перетворювача у системі можна виділити три типи напівактивної топології:

- паралельна напівактивна;
- напівактивна з керованим допоміжним джерелом;
- напівактивна з керованим основним джерелом.

Кероване джерело у назві топології відповідає місцю встановлення перетворювача. Паралельна топологія має перетворювач на виході системи накопичення, тому така топологія є наслідуванням пасивної. Паралельна топологія та з керованим основним джерелом потребують узгодження рівня напруги: у першому випадку вторинне джерело має узгоджуватися з основним, у другому — з напругою на навантаженні. Для електровелосипедів використовують двигуни 36—72 В, тому топології, в яких мають узгоджуватися рівні напруги, тобто паралельна та з керованим основним джерелом, потребують використання об'ємного вторинного джерела. Тому такі варіанти не є доцільними для застосування у велосипедах. Натомість теоретично можливим є використання напівактивної системи з керованим допоміжним джерелом, що узгоджує рівні напруги незалежно від номінальної напруги допоміжного джерела. Втім на практиці такий перетворювач не здатен повністю регулювати споживання енергії двигуном, а відповідно, і швидкість транспорту. Необхідно, щоб користувач регулював потужність двигуна, а кола зворотного зв'язку дозволять автоматизувати розподілення енергії між обома джерелами. Для розв'язання цієї проблеми розглянемо активні архітектури.

Усі варіації активних топологій наслідують напівактивні конфігурації з додаванням до системи ще одного перетворювача для створення повністю контрольованої системи (рис. 3). Загалом вони характеризуються найбільшою гнучкістю системи,

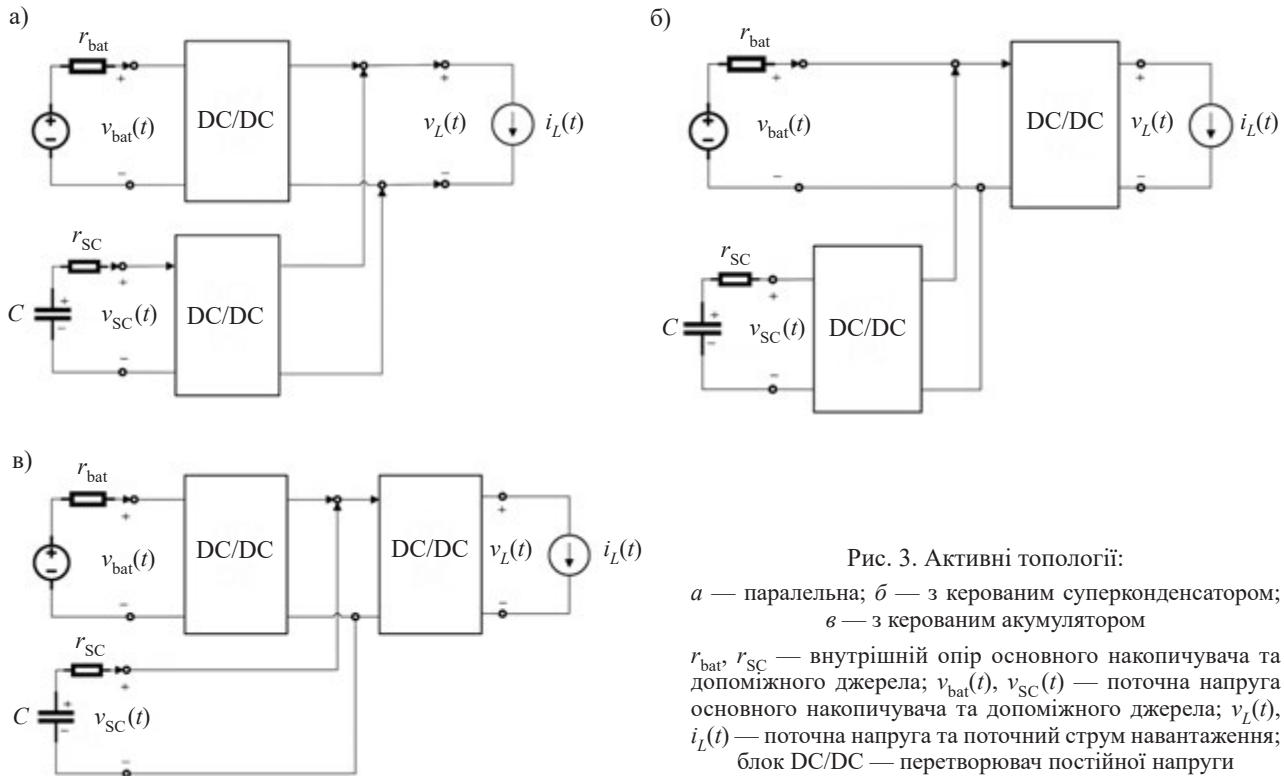


Рис. 3. Активні топології:

а — паралельна; б — з керованим суперконденсатором; в — з керованим акумулятором

r_{bat} , r_{SC} — внутрішній опір основного накопичувача та допоміжного джерела; $v_{bat}(t)$, $v_{SC}(t)$ — поточна напруга основного накопичувача та допоміжного джерела; $v_L(t)$, $i_L(t)$ — поточна напруга та поточний струм навантаження; блок DC/DC — перетворювач постійної напруги

відносно невеликими розмірами, а також найскладнішою архітектурою та високою вартістю, враховуючи ціну розробки. Додатковий перетворювач призначається для усунення недоліків управління у напівактивній системі. У конфігурації з керованим основним або допоміжним джерелами є недолік подвійної трансформації енергії через встановлення двох перетворювачів послідовно. У конфігурації з керованим основним джерелом суперконденсатор виконує роль проміжного фільтра пасивних частот, причому у цьому випадку він знову ж таки має узгоджувати рівень напруги з виходом першого перетворювача (рис. 3, в). Паралельна конфігурація має найбільший ККД серед активних топологій, але вона потребує, щоб обидва перетворювачі були керованими, автоматично або вручну. Зважаючи на те, що у нашому випадку один перетворювач має керуватися вручну, щоб регулювати споживання енергії двигуном, таку конфігурацію використовувати не можна. З інших доступних топологій доцільно використовувати активну систему з керованим допоміжним джерелом (рис. 3, б), оскільки інша конфігурація потребує масивного вторинного джерела через необхідність узгодження рівнів напруги. У такій конфігурації допоміжне джерело зможе виконувати основну функцію — відбирати надмірне навантаження навіть у разі його відносно невеликих розмірів. Додаткові переваги такої конфігурації розглядалися у роботі [10].

Алгоритм управління гібридною системою

Оптимальна для електровелосипеда топологія гібридного накопичувача містить два перетворювачі: один має бути керованим вручну, інший — автоматично за допомогою кіл зворотного зв'язку. Керований перетворювач містить інвертор, який трансформує постійну напругу у змінну й управляє режимами роботи двигуна. Завдяки акселератору (ручці газу) користувач може керувати швидкістю велосипеда за допомогою саме вихідного перетворювача. Автоматизований перетворювач, своєю чергою, повинен мати певний алгоритм роботи, який передбачає усі можливі варіанти споживання енергії.

На рис. 4 узагальнено представлені три варіанти розвитку подій під час руху. Вибір певного алгоритму повністю визначається струмом споживання I_{dem} , який може бути як додатним — прискорення або рух з постійною швидкістю, так і від'ємним — під час рекуперації енергії від двигуна, яку отримано від обертання педалей. Нульовий струм споживання під час руху можливий лише протягом переходу до режиму рекуперації та навпаки. Втім він цілком реальний під час зупинки.

Автоматизовану систему управління перетворювачем найкраще всього будувати на базі мікроконтролера, оскільки це надає системі універсальності та дозволяє досить швидко змінювати реакцію на зміну вхідних параметрів. Тому надалі при описанні конкретизованих алгоритмів будемо опиратися на використання саме мікропроцесорної системи.

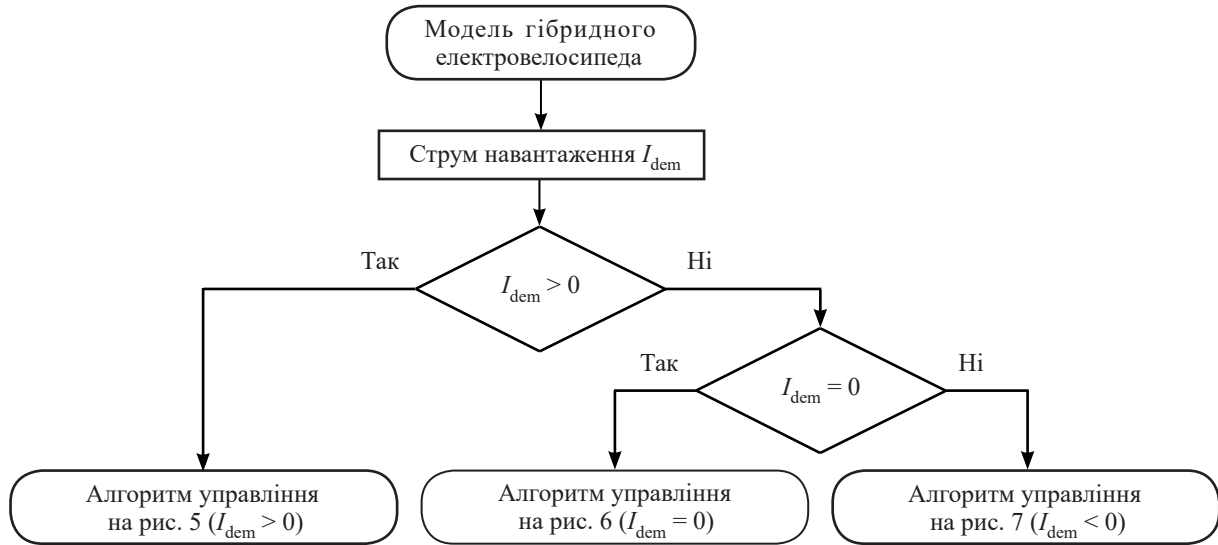


Рис. 4. Узагальнена схема вибору алгоритму розподілення споживаного струму

Вхідними параметрами для усіх випадків є мінімальне та максимальне значення напруги вторинного джерела — $V_{SC\ min}$, $V_{SC\ max}$, від яких залежить, чи дозволено взагалі вмикати допоміжне джерело. Також для основного джерела важливим параметром є максимально допустимий струм $I_{bat\ max}$, перевищення якого є недопустимим з точки зору збереження його ресурсу. Ще один параметр, який має особливе значення, — напруга відсічки батареї $V_{bat\ min}$. Він необхідний для розуміння загального стану системи накопичення, хоча й може бути виключений з алгоритму, зважаючи на систему захисту від глибокого розряду BMS.

Обидва ці параметри, $I_{bat\ max}$ та $V_{bat\ min}$, встановлюються програмно у мікропроцесорній системі.

З кола зворотного зв'язку отримують миттєві значення напруги на джерелах V_{bat} , V_{SC} та поточний вихідний струм основного накопичувача I_{bat} . Згідно з алгоритмом, якщо струм навантаження не перевищує максимально допустиме значення струму основного джерела енергії, виконується поновлення заряду вторинного джерела струмом, що визначається різницею максимального і поточного струмів.

На **рис. 5** наведено алгоритм під'єднання вторинного джерела у випадку руху велосипеда або його роз-

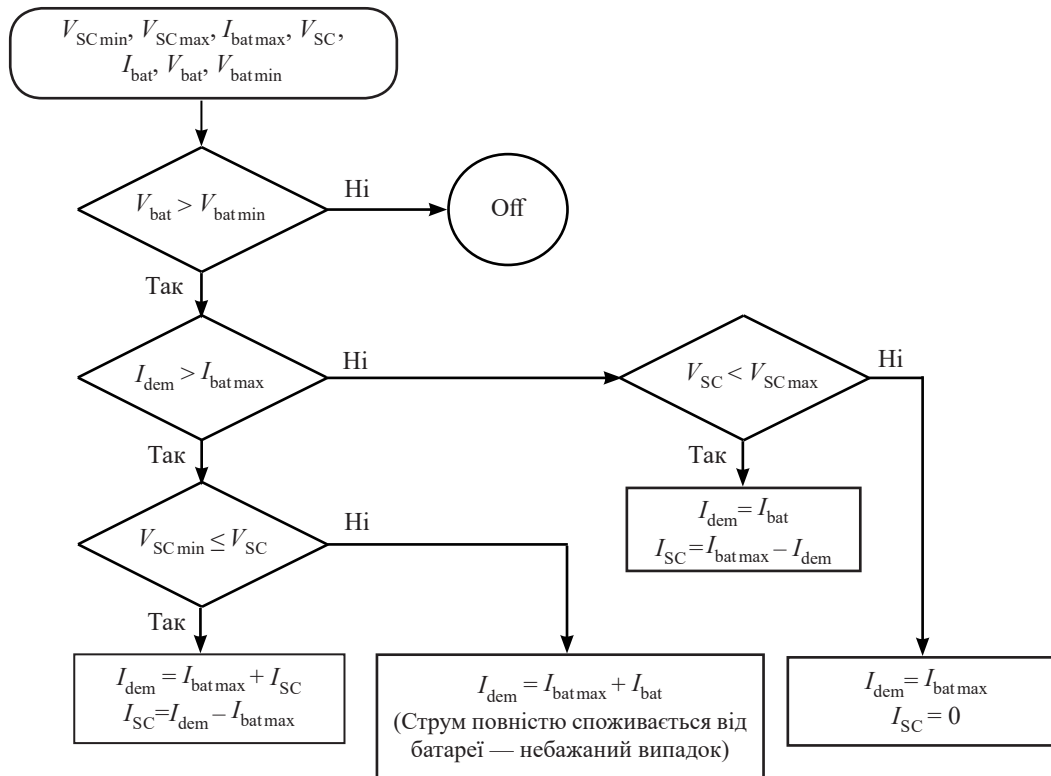


Рис. 5. Алгоритм під'єднання вторинного джерела при додатному струмі навантаження

гону при $I_{\text{dem}} > 0$. Алгоритм побудовано таким чином, щоб була змога підтримувати вторинне джерело у зарядженому стані під час стандартного руху, а у піки навантаження підключати це джерело до силової шини, щоб забезпечити необхідну різницю між максимальним струмом батареї та споживаним струмом.

Ще один алгоритм під'єднання вторинного джерела, наведений на **рис. 6**, можливий за нульового струму навантаження — під час зупинки. У такому випадку гібридна система, як і в попередньому, намага-

тиметься поновити стан максимальної зарядженості допоміжного джерела, використовуючи основний. Але тут немає додаткової умови віддавати частину енергії навантаженню, тому процес заряджання може протікати швидше, аніж під час руху.

Останній можливий випадок під час користування електровелосипедом — режим рекуперації, коли повернута енергія в першу чергу використовується для заряджання вторинного джерела, оскільки воно не має високої ємності (**рис. 7**).

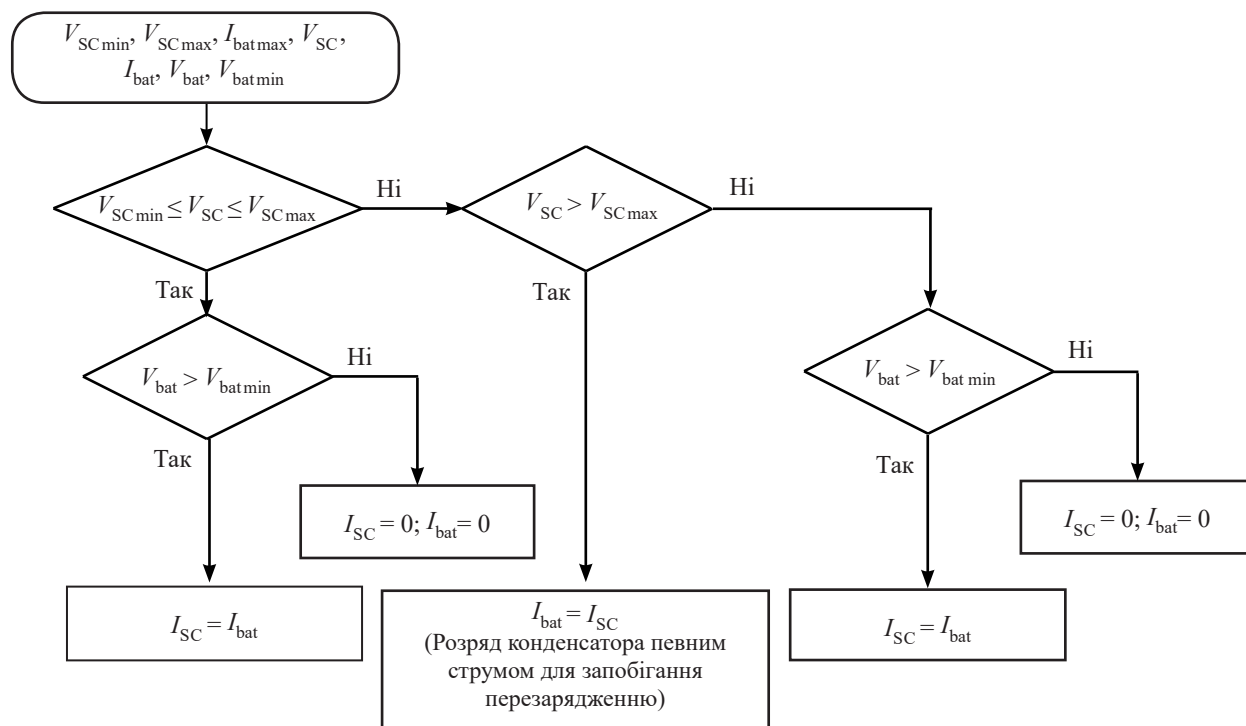


Рис. 6. Алгоритм під'єднання вторинного джерела за відсутності струму навантаження

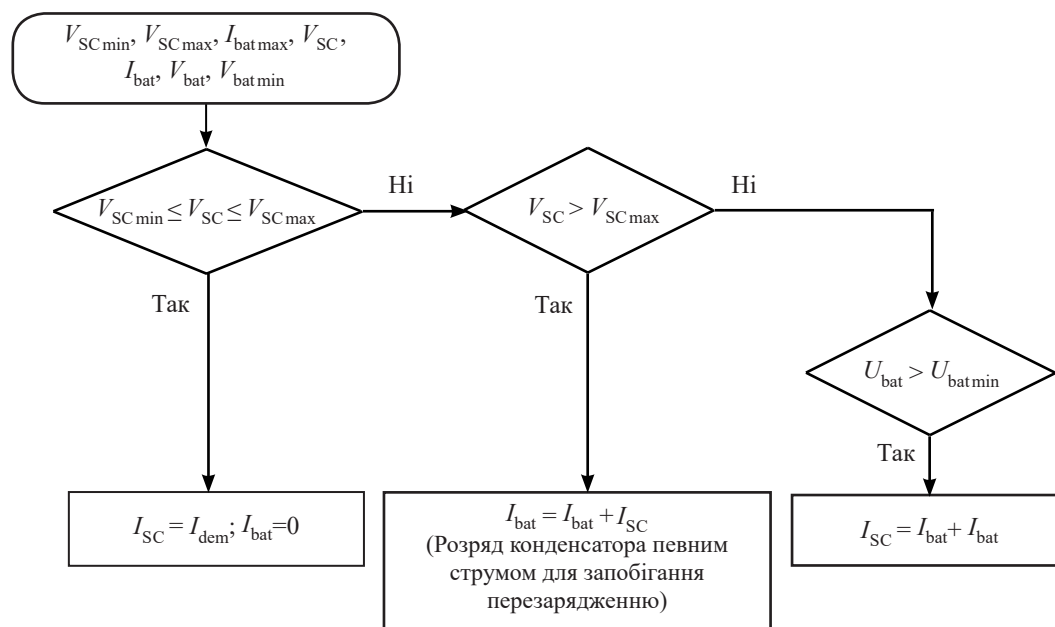


Рис. 7. Алгоритм під'єднання вторинного джерела при від'ємному струмі навантаження

Підвищення ресурсу батареї завдяки гібридизації

Для наочної демонстрації поліпшення використання ресурсу стандартного акумулятора проведемо розрахунок діапазону робочої напруги акумулятора при використанні гібридної та стандартної систем.

Прийнемо, що нахил шляху пересування дорівнює 10%. Також для їзди на велосипеді важливо враховувати швидкість вітру, оскільки вітер впливає на споживану двигуном енергію. Візьмемо, наприклад, середнє значення для Києва: згідно з даними Українського гідрометеорологічного центру [11] воно становить 2,21 м/с. Щоб змодельовати пік споживання двигуном, вважатимемо, що вітер є зустрічним, велосипедист рухається вгору, не допомагаючи педалями, тобто потужність рекуперації — 0 Вт. Маса користувача — 75 кг, початкова швидкість велосипеда — 40 км/год.

Використовуючи онлайн-сервіс симуляції для дослідження параметрів електровелосипедів, побудуємо маршрут руху велосипедиста, що складається з підйому на пагорб з 10-відсотковим нахилом та спуском, зображений на **рис. 8**. Слід зауважити, що симуляція проводиться для випадку використання стандартного літій-іонного акумулятора. Під час підйому спостерігається спад швидкості велосипедиста, на цій ділянці виберемо точку найбільшого споживання енергії двигуном для подальших розрахунків і позначимо її на рис. 8.

Відповідно до описаного вище алгоритму роботи необхідно задати піковий струм, який забезпечується акумулятором. Проаналізувавши стандартні акумулятори, прийнемо, що $I_{\text{bat max}} = 25 \text{ A}$ [12]. Згідно з документацією внутрішній опір обраного акумулятора становить $R_{\text{esr}} = 0,14 \text{ Ом}$. За результатами симуляції (**рис. 9**) вихідна потужність батареї становить $P_{\text{load}} = 1555 \text{ Вт}$. При розрахунку важливо брати до уваги номінальну напругу, на яку розраховано двигун. Для цього виберемо двигун з прямим приводом компанії Volta Bikes: 48—60 В, 600 Вт [13]. Отже, можна прийняти, що номінальна напруга складає $V_{\text{bat nom}} = 48 \text{ В}$.

Задавшись необхідними величинами, розрахуємо діапазон робочої напруги акумулятора за відсутності гібридної системи. Спочатку необхідно визначити вихідний струм акумулятора:

Задавшись необхідними величинами, розрахуємо діапазон робочої напруги акумулятора за відсутності гібридної системи. Спочатку необхідно визначити вихідний струм акумулятора:

$$I_{\text{dem}} = P_{\text{load}} / V_{\text{bat nom}} = 1555/48 \approx 32,40 \text{ А.} \quad (1)$$

Порівнявши пікове значення струму зі споживаним, можна одразу зробити висновок, що акумулятор працюватиме у режимі, що шкодить літій-іонним коміркам, нагріваючи їх та зменшуючи тривалість використання. За такого режиму роботи падіння напруги на внутрішньому резисторі основного джерела дорівнюватиме

$$V_{\text{esr}} = I_{\text{dem}} R_{\text{esr}} = 32,4 \cdot 0,14 \approx 4,54 \text{ В.} \quad (2)$$

Повертаючись до обраного акумулятора, зазначимо, що для захисту від виснаження в ньому встановлено систему контролю батареї BMS. Для обраного акумулятора напруга відсічки становить $39 \pm 1 \text{ В}$. Втім, з метою збереження ресурсу батареї між двигуном та акумулятором встановлено контролер, який має власний захист. В обраного контролера напруга відсічки становить $42 \pm 0,5 \text{ В}$ [14]. Тому діапазон робочої напруги акумулятора за ідеальних умов становить 42—54,6 В, без урахування коливань напруги відсічки систем захисту.

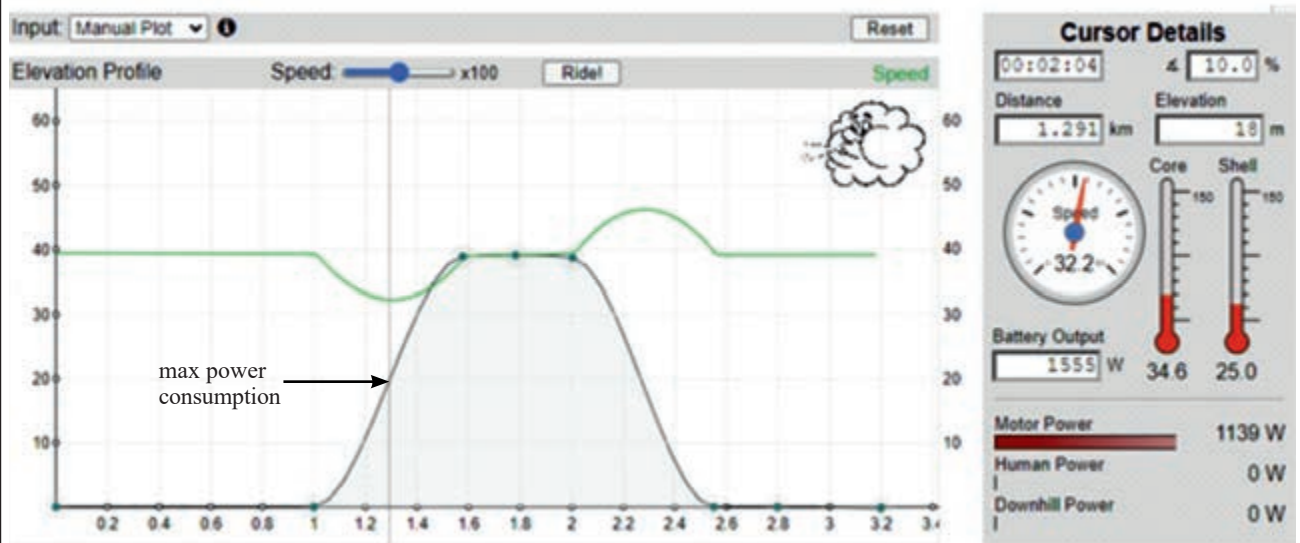


Рис. 8. Умовний маршрут велосипедиста

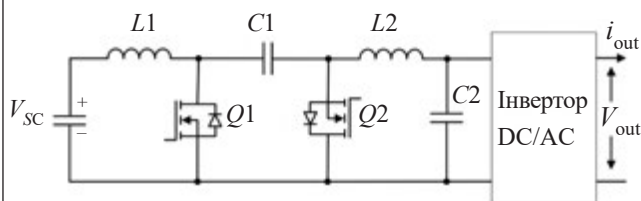


Рис. 9. Перетворювач Чука [15]

Розраховане падіння напруги на внутрішньому опорі впливає на нижнє порогове значення діапазону робочої напруги, оскільки при її проходженні акумулятор перестає постачати енергію. Тоді скорегований діапазон напруги для стандартного рішення буде таким:

$$(V_{\min} + V_{\text{bat esr}}) \dots V_{\max} = (42 + 4,54) \dots 54,6 = 46,54 \dots 54,6 \text{ В.} \quad (3)$$

З отриманих значень діапазону можна зробити висновок, що значна частина запасеної енергії акумулятора не використовується. При цьому сама батарея працює у піковому режимі, що значно шкодить тривалості її життя.

Розрахуємо тепер діапазон робочої напруги для гібридизованої системи.

При використанні гібридного накопичувача надмірний струм відбирається вторинним джерелом, у нашому випадку — суперконденсаторним блоком, тобто вихідний струм основного джерела дорівнює своєму піковому значенню, щоб не переходити у режим перенавантаження: $I_{\text{bat max}} = 25 \text{ А}$. За такого струму падіння опору на внутрішньому резисторі дорівнюватиме

$$V_{\text{bat esr}} = I_{\text{bat max}} R_{\text{esr}} = 25 \cdot 0,14 \approx 3,5 \text{ В.} \quad (4)$$

Додаючи отриману величину до ідеального діапазону отримаємо діапазон робочої напруги основного джерела для гібридного накопичувача:

$$(V_{\min} + V_{\text{bat esr}}) \dots V_{\max} = (42 + 3,5) \dots 54,6 = 45,5 \dots 54,6 \text{ В.} \quad (5)$$

Очевидно, що тут нижня межа робочої напруги наблизилася до ідеального стану, це свідчить про збільшення використання ресурсу основного джерела. Додатково зауважимо, що батарея не переходить межу пікового струму, а значить, не перебуває у стані перенавантаження, що також позитивно впливає на стан акумулятора.

При розробленні вторинного джерела з системою керування на базі мікроконтролера можна обмежити порогове значення вихідного струму основного накопичувача для ввімкнення допоміжного джерела на рівні програмного забезпечення. З метою відбирання струмів більшого діапазону на допоміжне джерело, таке порогове значення можна встановити з деяким запасом. При цьому варто враховувати, що у такому

режимі вторинне джерело буде здатне забезпечувати різницю струму протягом меншого часу.

Необхідно зауважити, що оптимізувати використання ресурсу основного джерела можна, зважаючи на деяке компромісне рішення, яке поєднуватиме відповідність вимогам щодо задовільної ємності вторинного джерела, ваги кінцевого гібридного накопичувача та займаного ним об'єму.

Як було зазначено вище, одним з перетворювачів у активній топології є стандартне рішення [14], доступне на ринку, тому надалі його розглядати не будемо.

Аналітичний розрахунок передавальної характеристики допоміжного перетворювача

Допоміжним перетворювачем, який би забезпечував регулювання вихідної напруги у широкому діапазоні, причому як у режимі підвищення, так і пониження напруги, був обраний перетворювач Чука, який відповідає зазначеним вимогам (див. рис. 9). Для можливості рекуперації енергії його необхідно реалізувати у двонаправленому форматі.

Розглянемо практичний випадок, використовуючи наявні на ринку компоненти. Номінальні параметри обраних елементів наведені у таблиці. Схему заміщення перетворювача Чука з урахуванням усіх паразитних опорів елементів та джерела наведено на рис. 10.

Мінімальне та максимальне значення вхідної напруги вторинного джерела зумовлюються обраним суперконденсаторним блоком [16]. Прийmemo, що робочий діапазон складатиме 50% від ємності суперконденсаторів. Оскільки напруга лінійно пропорційна запасеній енергії, тому $V_{\min} = 0,5 V_{\max}$. Вихідні параметри напруги мають відповідати діапазону напруги обраного основного джерела з врахуванням отриманої величини падіння напруги при максимальному навантаженні [12]. Вихідний струм перетворювача обмежимо максимальною величиною 10 А.

Передавальні параметри перетворювача Чука

Параметри	Мінімальна напруга, В	Максимальна напруга, В	Піковий середній струм, А
Вхідні	8	16	30
Вихідні	45,5	51,1	10

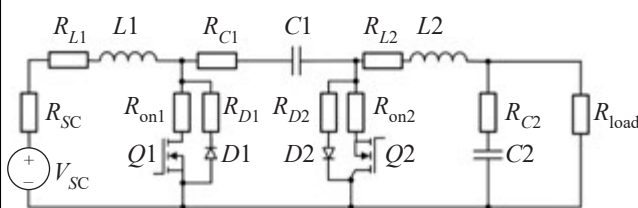


Рис. 10. Схема заміщення перетворювача Чука

Розрахунок будемо проводити для усталеного режиму, тому за навантаження можемо прийняти опір з таким значенням:

$$R_{\text{load}} = V_{\text{bat nom}} / I_{\text{SC out max}} = 48 / 10 = 4,8 \text{ Ом.} \quad (6)$$

Отримане значення навантаження може змінюватися залежно від ступеня заряду батареї та, відповідно, від струму споживання навантаження.

Передавальну характеристику перетворювача отримаємо, використовуючи метод усередненого стану [17]. Прийнемо деякі фундаментальні та передавальні змінні, відносно яких буде проводитися розрахунок. Для цього задамо матриці $\mathbf{x}$ та $\mathbf{y}$, які будуть містити фундаментальні та передавальні змінні відповідно:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ v_{c1} \\ v_{c2} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} i \\ v \end{bmatrix}, \quad (7)$$

де i_1, i_2 — струми крізь відповідні котушки, причому обидва у напрямку до конденсатора $C1$;

i — вхідний струм;

v_{c1}, v_{c2} — напруга на відповідних конденсаторах;

v — вихідна напруга перетворювача, інвертована відносно входу.

Тоді загальна система для розрахунку виглядатиме так:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}v_{\text{SC}}; \\ \mathbf{y} = \mathbf{c}\mathbf{x}, \end{cases} \quad (8)$$

де $\dot{\mathbf{x}}$ — зміна вищезазначених величин протягом періоду роботи перетворювача;

$\mathbf{A}$ — матриця коефіцієнтів розміром 4×4 , що пов'язує усі фундаментальні величини протягом періоду роботи;

$\mathbf{b}$ — матриця коефіцієнтів розміром 4×1 , що пов'язує вхідну напругу джерела v_{SC} з фундаментальними величинами;

$\mathbf{c}$ — матриця коефіцієнтів розміром 2×4 , що пов'язує фундаментальні та передавальні величини.

Друге рівняння у системі (8) пов'язує значення струму та напруги компонентів перетворювача з передавальними. Кожна матриця коефіцієнтів складається з двох частин — вони відповідають станам, коли транзистор замкнений та коли він розімкнений, тому необхідно розглянути обидва ці стани.

Схеми заміщення для різних станів транзисторів перетворювача представлено на **рис. 11**, де опір каналу R_{on} відповідає увімкненому стану транзистора $Q1$, а опір R_{D2} — стану провідності зворотного діода $D2$.

Використовуючи закони Ома та Кірхгофа, отримаємо матриці для періоду часу γT_s , коли транзистор $Q1$ знаходиться у замкненому стані, де γ — коефіцієнт заповнення сигналу широтно-імпульсної модуляції; T_s — період перемикання (рис. 11, а). Для замкненого стану позначення матриць будемо супроводжувати індексом «1». У розімкненому стані ключа $Q1$ діод $D2$ перебуває у стані провідності, тому його опір необхідно врахувати при розрахунках. За такої схеми (рис. 11, б) отримаємо матриці коефіцієнтів з індексом «2» для періоду часу $\gamma' T_s$, де $\gamma' = 1 - \gamma$.

Отримавши аналітичні частини матриць для обох станів транзистора, тобто для повного періоду перетворювача, можемо перейти до утворення єдиних матриць, які описують повний період перемикання транзистора. Розрахувати їх можна, просумувавши частини відповідних проміжків:

$$\begin{cases} \mathbf{A} = \gamma \mathbf{A}_1 + \gamma' \mathbf{A}_2; \\ \mathbf{b} = \gamma \mathbf{b}_1 + \gamma' \mathbf{b}_2; \\ \mathbf{c} = \gamma \mathbf{c}_1 + \gamma' \mathbf{c}_2, \end{cases} \quad (9)$$

де

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{21} & A_{31} & A_{41} \\ A_{12} & A_{22} & A_{32} & A_{42} \\ A_{13} & A_{23} & A_{33} & A_{43} \\ A_{14} & A_{24} & A_{34} & A_{44} \end{bmatrix}; \quad (10)$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} 1/L_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (11)$$

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{\text{load}} \parallel R_{C2} & 0 & \frac{R_{\text{load}}}{R_{C2} + R_{\text{load}}} \end{bmatrix}; \quad (12)$$

$$A_{11} = -\frac{R_{\text{SC}} + R_{L1} + \gamma R_{\text{on}} + \gamma'(R_{C1} + R_D)}{L1};$$

$$A_{12} = -\frac{\gamma R_{\text{on}} + \gamma' R_D}{L2};$$

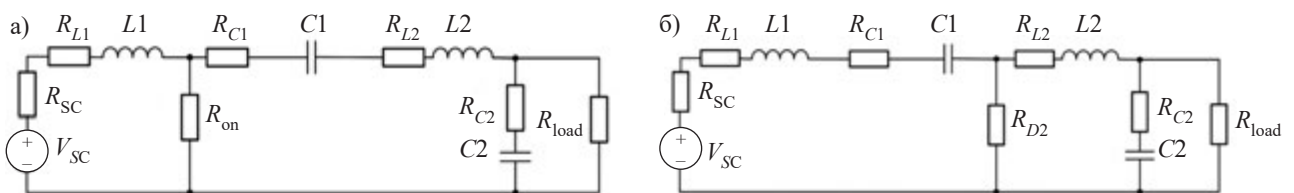


Рис. 11. Схема заміщення перетворювача Чука для замкненого (а) та розімкнутого (б) станів транзистора

$$A_{13} = \gamma' / C_1;$$

$$A_{14} = 0;$$

$$A_{21} = -\frac{\gamma R_{on} + \gamma' R_D}{L_1};$$

$$A_{22} = -\frac{R_{L2} + \gamma(R_{C2} + R_{on}) + \gamma' R_D + R_{load} \parallel R_{C2}}{L_2};$$

$$A_{23} = 0;$$

$$A_{24} = \frac{R_{load}}{C_2(R_{load} + R_{C2})};$$

$$A_{31} = -\gamma' / L_1;$$

$$A_{32} = \gamma / L_2;$$

$$A_{33} = 0; A_{34} = 0;$$

$$A_{41} = 0;$$

$$A_{42} = -\frac{R_{load}}{L_2(R_{load} + R_{C2})};$$

$$A_{43} = 0;$$

$$A_{44} = -\frac{1}{C_2(R_{load} + R_{C2})};$$

Зауважимо, що у наведених формулах R_D — це опір діода R_{D2} .

Для визначення передавальної характеристики проведемо аналіз при постійному струмі й, відповідно, виконаємо заміну позначення змінних величин: x на $\mathbf{X}$, y на $\mathbf{Y}$, v на $\mathbf{V}$. При цьому зазначимо, що зміна фундаментальних величин в усталеному режимі дорівнює нулю, і тоді система (8) набуває нового вигляду:

$$\begin{cases} 0 = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{b}V_{SC}; \\ \mathbf{Y} = \mathbf{c}\mathbf{X}. \end{cases} \quad (13)$$

Рішенням цієї системи буде рівняння

$$\mathbf{X} = -\mathbf{A}^{-1}\mathbf{b}V_{SC}, \quad (14)$$

де $\mathbf{A}^{-1}$ — матриця, обернена до матриці коефіцієнтів.

Розв'язувалося це рівняння у програмному середовищі Wolfram Mathematica, яке може працювати із символьними величинами.

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} \gamma^2 V_{SC} / F \\ \gamma \gamma' V_{SC} / F \\ (\gamma'^2 R_D + \gamma^2 R_{on} + \gamma'(R_{load} + R_{L2} + \gamma R^*)) \cdot V_{SC} / F \\ \gamma \gamma' V_{SC} / F \end{pmatrix}, \quad (15)$$

$$\text{де } F = \gamma^3 R_D + \gamma^2 \gamma' R^* + \gamma^2 (R_{load} + R_{L2} + \gamma R^*) + \gamma^2 (R_{L1} + \gamma R_{on} + R_{SC});$$

$$R^* = R_{C1} + R_D + R_{on}.$$

Після отримання виразів для фундаментальних змінних можемо отримати вирази для передавальних:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{c}\mathbf{X}; \quad (16)$$

$$I = \gamma^2 V_{SC} / F; \quad (17)$$

$$V = \gamma \gamma' R_{load} V_{SC} / F. \quad (18)$$

В результаті розрахунку одержали дві функції, які пов'язують вихідну напругу перетворювача із вхідними параметрами: струмом з суперконденсаторного блоку та вхідною напругою. Загалом, застосувавши закон Ома, нескладно отримати залежності вихідного струму від вхідних параметрів з урахуванням того, що опір навантаження відомий.

Побудуємо одержану передавальну характеристику. Для цього необхідно прийняти орієнтовні паразитні опори елементів. Для побудови оцінювальної передавальної характеристики прийнемо такі значення (в Ом):

$$\begin{aligned} R_{on} &= 0,005; R_D = 0,001; R_{C1} = 0,005; \\ R_{I2} &= 0,001; R_{L1} = 0,0005; R_{L2} = 0,0005; \\ R &= 4,8; R_{SC} = 0,011; V_{SC} = 16 \text{ В}. \end{aligned} \quad (19)$$

Після того як підставимо прийняті значення до виразу передавальної характеристики, зможемо побудувати графік, зображений на **рис. 12**.

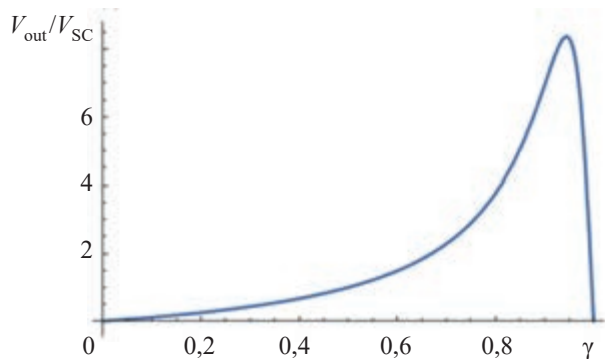


Рис. 12. Передавальна характеристика перетворювача Чука

Імітаційне моделювання перетворювача Чука

Для підтвердження правильності розрахунку передавальної характеристики була створена модель перетворювача Чука у пакеті MatLab. Система перевірялася без кола зворотного зв'язку для коефіцієнта перетворення $k = 3$; номінальна напруга суперконденсаторного блоку — 16 В; навантаження — резистор номіналом 4,8 Ом, що відповідає навантаженню у розрахунках.

Очікувані результати:

$$V_{SC} = 48 \text{ В}; I_{out} = 10 \text{ А}; \Delta V_{out} = 1\%.$$

Для побудови моделі прийняли такі номінали реактивних компонентів перетворювача Чука: $L1 = 12 \text{ мкГн}$, $L2 = 8,2 \text{ мкГн}$, $C1 = 22 \text{ мкФ}$, $C2 = 47 \text{ мкФ}$.

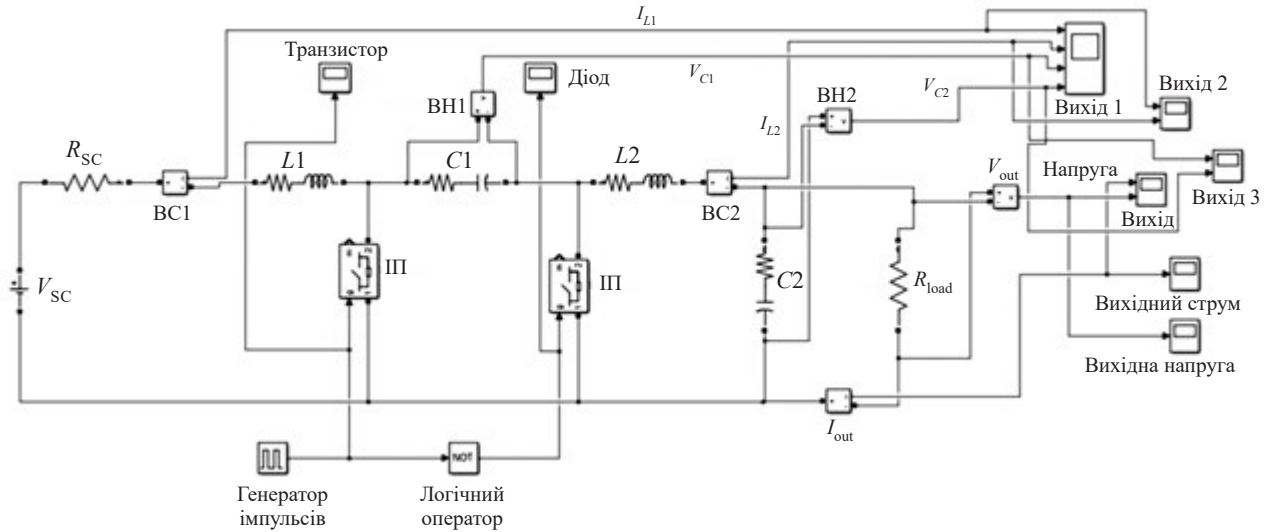


Рис. 13. Схема перетворювача Чука для імітаційного моделювання:
ВН — вимірювачі напруги; ВС — вимірювачі струму; ІП — ідеальний перемикач

Номіналами паразитичних опорів слугували прийняті вище значення (див. (19)). З рис. 12 бачимо, що для коефіцієнта перетворення $V_{out}/V_{SC} = 3$ коефіцієнт заповнення дорівнює 0,76.

Комп'ютерна симуляція виконувалась з синхронним перемиканням ключів. Схема для імітаційного моделювання зображена на рис. 13. Отримані в результаті моделювання діаграми вихідної напруги та струму зображені на рис. 14, де видно проміжок умовного перехідного процесу перетворювача та вихід на усталений режим, причому в усталеному режимі вихідний струм чітко дорівнює очікуваному — 10 А. Вихідна напруга також відповідає очікуваній — приблизно 48 В. Варто зауважити, що амплітуди напру-

ги та струму під час перехідного процесу є досить значними, що свідчить про мале значення фазового допуску.

З вихідних діаграм збільшеного масштабу, представлених на рис. 15, видно, що пульсації струму та напруги близькі до 1%, що відповідає очікуванням.

Імітаційне моделювання дозволило оцінити характер перехідних процесів розімкненої системи та правильність розрахунку передавальної характеристики. З результатів моделювання видно, що введення кола зворотного зв'язку може призводити до нестабільної роботи перетворювача, тому це питання потребує окремого дослідження.

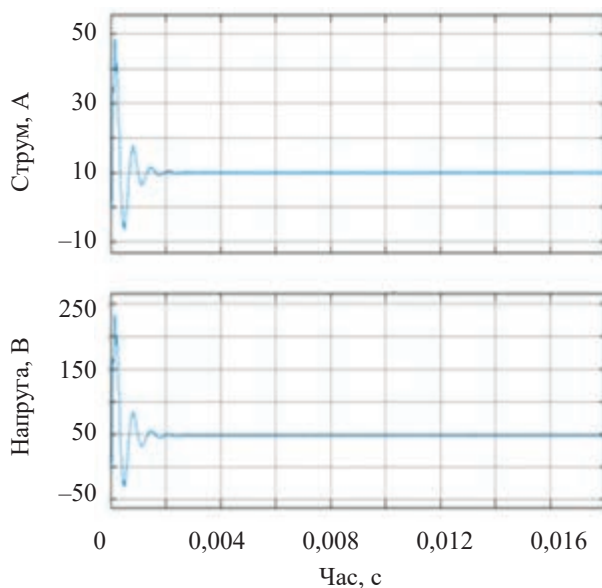


Рис. 14. Вихідні діаграми струму та напруги

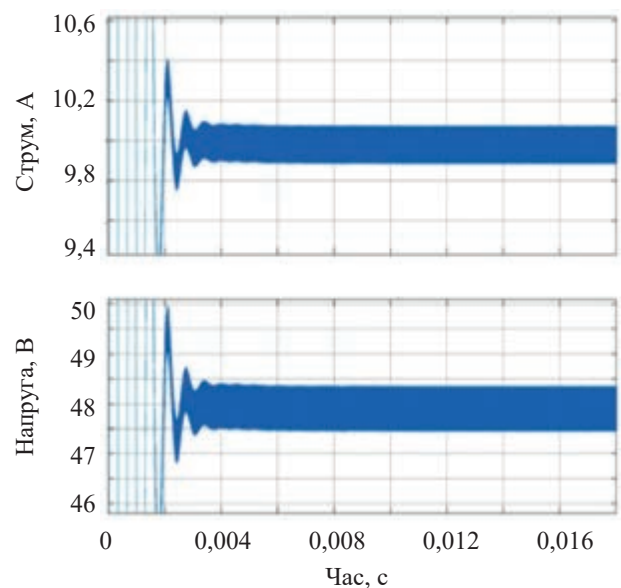


Рис. 15. Масштабовані вихідні діаграми струму та напруги

Висновки

Таким чином, дослідження показали, що гібридизація системи живлення електровелосипеда з використанням суперконденсаторів як вторинного джерела дозволяє розв'язати проблему великих пікових навантажень, яка існує при живленні мікромобільного електротранспорту стандартними літій-іонними акумуляторами. Таке рішення розвантажує основне джерело, відбираючи у пікові моменти споживання надмірний струм, забезпечуючи тим самим більший діапазон робочої напруги порівняно з використанням лише стандартного джерела живлення.

Обрана топологія виконання — активна система з керованим вторинним джерелом — забезпечує оптимальні масогабаритні характеристики накопичувача. Система керування є автоматизованою, вона виконана на основі мікроконтролера, що забезпечує універсальність вторинного джерела, завдяки можливості відносно швидкої зміни алгоритму управління залежно від вимог.

Надалі планується створити прототип гібридної системи з системою управління, побудованою на запропонованому у цій роботі алгоритмі. Це дозволить порівняти на практиці функціонування літій-іонних акумуляторів у стандартних рішеннях і в системах, де використовується гібридний накопичувач. Крім того, прототип системи дозволить визначити кількісні показники ефективності та підтвердити доцільність практичного використання гібридних накопичувачів в мікромобільному електротранспорті.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. da Silva Lima L., Quartier M., Buchmayr A. et al. Life cycle assessment of lithium-ion batteries and vanadium redox flow batteries-based renewable energy storage systems. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, vol. 46, 101286. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101286>
2. Hussain S., Ali M.U., Nengroo S.H. et al. Semiactive hybrid energy management system: A solution for electric wheelchairs. *Electronics*, 2019, vol. 8, iss. 3. <https://doi.org/10.3390/electronics8030345>
3. Li J., Murphy E., Winnick J., Kohl P. A. Studies on the cycle life of commercial lithium ion batteries during rapid charge-discharge cycling. *Journal of Power Sources*, 2001, vol. 102, iss. 1–2, pp. 294–301. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)00821-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00821-7)
4. Savoye F., Venet P., Millet M., Groot J. Impact of periodic current pulses on li-ion battery performance. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, vol. 59, no. 9, pp. 3481–3488. <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2172172>
5. Babu T. S., Vasudevan K. R., Ramachandramurthy V. K. et al. A comprehensive review of hybrid energy storage systems:

Converter topologies, control strategies and future prospects. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 148702–148721. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3015919>

6. Zhang Q., Deng W., Zhang S., Wu J. A rule based energy management system of experimental battery/supercapacitor hybrid energy storage system for electric vehicles. *Journal of Control Science and Engineering*, 2016, vol. 2016, article ID 6828269. <https://doi.org/10.1155/2016/6828269>

7. Prasad G. G., Shetty N., Thakur S. et al. Supercapacitor technology and its applications: A review. *IOP Conference Series: Material Science and Engineering*, 2019, vol. 561, 012105. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/561/1/012105>

8. Forouzesh M., Siwakoti Y. P., Gorji S. A. et al. Step-Up DC–DC converters: A comprehensive review of voltage-boosting techniques, topologies, and applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, vol. 32, no. 12, pp. 9143–9178. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2652318>

9. Kuperman A., Aharon I. Battery-ultracapacitor hybrids for pulsed current loads: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, vol. 15, iss. 2, pp. 981–992. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.010>

10. So K. M., Wong Y. S., Hong G. S., Lu W. F. An improved energy management strategy for a battery/ultracapacitor hybrid energy storage system in electric vehicles. *2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, Dearborn, MI, USA, 2016, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ITEC.2016.7520186>

11. Середні місячні температури повітря по м. Києву за багаторічний період. [Електронний ресурс] : Центральна геофізична обсерваторія імені Бориса Срезневського. Режим доступу: <http://cgo-sreznevskyi.kyiv.ua/uk/diialnist/klimatolohichna/klimatychni-dani-po-kyievu>

12. Акумулятор для електровелосипеда 48V, 11, 6Ah (Panasonic) [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://electro-bike.com.ua/akkumulyator/akkumulyator-dlya-elektrovelosipeda-48v-11-6ah-panasonik> Battery for e-bike 48V, 11, 6Ah (Rus)

13. Переднє мотор колесо Вольта 48-60V 600W(1250W) [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://e-bike.com.ua/index.php?route=product/product&product_id=898 Front wheel motor Volta 48-60V 600W (1250W) (Rus)

14. Контролер Вольта 48V 800W [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://e-bike.com.ua/index.php?route=product/product&product_id=803 Volta controller 48V 800W (Rus)

15. Lipu M.S.H., Faisal M., Ansari S. et al. Review of electric vehicle converter configurations, control schemes and optimizations: Challenges and suggestions. *Electronics*, 2021, vol. 10, iss. 4, 477. <https://doi.org/10.3390/electronics10040477>

16. Maxwell Technologies. 16 Volt Small Module. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://maxwell.com/products/ultracaps/16v-small-modules/>

17. Polivka W. M., Chetty P. R. K., Middlebrook R. D. State-space average modelling of converters with parasitics and storage-time modulation. *1980 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Atlanta, GA, USA, 1980, pp. 119–143. <https://doi.org/10.1109/PESC.1980.7089440>

Дата надходження рукопису
до редакції 3.04 2023 р.

Опис статті для цитування:

Манжелій А. Ю., Бондаренко О. Ф. Гібридний накопичувач електроенергії типу «акумуляторна батарея — суперконденсатор» для мікромобільного електротранспорту. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*, 2023, № 1–2, с. 14–26. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2023.1-2.14>

Cite the article as:

Manzhelii A. Yu., Bondarenko O. F. Hybrid battery-supercapacitor energy storage system for micromobile electric vehicles. *Technology and design in electronic equipment*, 2023, no. 1–2, pp. 14–26. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2023.1-2.14>

HYBRID BATTERY-SUPERCAPACITOR ENERGY STORAGE SYSTEM
FOR MICROMOBILE ELECTRIC VEHICLES

The study proves the importance of hybridising the power supply system of micromobile electric vehicles, taking into account the strict limitations on the final size and weight of the storage device, using the example of an electric bicycle. The authors offer a brief overview of the main hybridization topologies and analyze the advantages and disadvantages of each of them. The paper describes the possibilities of using supercapacitors as an additional source of energy for a hybrid system and proposes a way to deal with the disadvantages of using standard batteries by combining them with an additional energy source. A mathematical basis is given to such a solution being able to unload the main power source by drawing excessive current at peak consumption times, thereby providing a wider range of operating voltages compared to using only a standard power source. To ensure optimal weight and size parameters of the drive, an active system with a controlled auxiliary power source is chosen. In this topology, the second converter is installed between the additional energy source, the supercapacitor storage device, and the battery. It is proposed to implement the schematic of this converter using a Chuk converter with an automated control system containing a feedback loop and based on a microcontroller, which ensures a relatively quick change of the control algorithm depending on the configuration and requirements for the system. The paper also presents the algorithm of the storage system operation for possible modes of electric bicycle operation. The transfer characteristic is calculated using the averaged state method. To confirm the operability of the auxiliary power source, a converter circuit is developed and simulation modelling is carried out in MATLAB Simulink. The system simulation allowed assessing the nature of the transient processes of the open-loop system and the accuracy of the transfer characteristic calculation.

Keywords: hybrid system, supercapacitor, battery, hybridization, topologies, micromobile electric vehicles, electric bicycle.

REFERENCES

1. da Silva Lima L., Quartier M., Buchmayr A. et al. Life cycle assessment of lithium-ion batteries and vanadium redox flow batteries-based renewable energy storage systems. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, vol. 46, 101286. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101286>
2. Hussain S., Ali M.U., Nengroo S.H. et al. Semiactive hybrid energy management system: A solution for electric wheelchairs. *Electronics*, 2019, vol. 8, iss. 3. <https://doi.org/10.3390/electronics8030345>
3. Li J., Murphy E., Winnick J., Kohl P. A. Studies on the cycle life of commercial lithium ion batteries during rapid charge-discharge cycling. *Journal of Power Sources*, 2001, vol. 102, iss. 1–2, pp. 294–301. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)00821-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00821-7)
4. Savoye F., Venet P., Millet M., Groot J. Impact of periodic current pulses on li-ion battery performance. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, vol. 59, no. 9, pp. 3481–3488. <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2172172>
5. Babu T. S., Vasudevan K. R., Ramachandaramurthy V. K. et al. A comprehensive review of hybrid energy storage systems: Converter topologies, control strategies and future prospects. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 148702–148721. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3015919>
6. Zhang Q., Deng W., Zhang S., Wu J. A rule based energy management system of experimental battery/supercapacitor hybrid energy storage system for electric vehicles. *Journal of Control Science and Engineering*, 2016, vol. 2016, article ID 6828269. <https://doi.org/10.1155/2016/6828269>
7. Prasad G. G., Shetty N., Thakur S. et al. Supercapacitor technology and its applications: A review. *IOP Conference Series: Material Science and Engineering*, 2019, vol. 561, 012105. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/561/1/012105>
8. Forouzesh M., Siwakoti Y. P., Gorji S. A. et al. Step-Up DC–DC converters: A comprehensive review of voltage-boosting techniques, topologies, and applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, vol. 32, no. 12, pp. 9143–9178. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2652318>
9. Kuperman A., Aharon I. Battery-ultracapacitor hybrids for pulsed current loads: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, vol. 15, iss. 2, pp. 981–992. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.010>
10. So K. M., Wong Y. S., Hong G. S., Lu W. F. An improved energy management strategy for a battery/ultracapacitor hybrid energy storage system in electric vehicles. *2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, Dearborn, MI, USA, 2016, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ITEC.2016.7520186>
11. Average monthly air temperatures in Kyiv over a multi-year period. [Electronic resource]: *Boris Sreznhevsky Central Geophysical Observatory*. Access mode: <http://cgo-sreznhevskyi.kyiv.ua/uk/diialnist/klimatolohichna/klimatychni-dani-po-kyievu>
12. Batteries for e-bikes 48V, 11, 6Ah (Panasonic) [Electronic resource]. Access mode: <https://electro-bike.com.ua/akkumulyatory/akkumulyator-dlya-elektrovelosipeda-48v-11-6ah-panasonik> Battery for e-bike 48V, 11, 6Ah (Rus)
13. Front motor wheel Volta 48-60V 600W(1250W) [Electronic resource]. Access mode: https://e-bike.com.ua/index.php?route=product/product&product_id=898 Front wheel motor Volta 48-60V 600W (1250W) (Rus)
14. Volta controller 48V 800W [Electronic resource]. Access mode: https://e-bike.com.ua/index.php?route=product/product&product_id=803 Volta controller 48V 800W (Rus)
15. Lipu M.S.H., Faisal M., Ansari S. et al. Review of electric vehicle converter configurations, control schemes and optimizations: Challenges and suggestions. *Electronics*, 2021, vol. 10, iss. 4, 477. <https://doi.org/10.3390/electronics10040477>
16. Maxwell Technologies. 16 Volt Small Module. [Електронний ресурс]. Access mode: <https://maxwell.com/products/ultracapacitors/16v-small-modules/>
17. Polivka W. M., Chetty P. R. K., Middlebrook R. D. State-space average modelling of converters with parasitics and storage-time modulation. *1980 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Atlanta, GA, USA, 1980, pp. 119–143. <https://doi.org/10.1109/PESC.1980.7089440>

Л. В. ЛІПНИЦЬКИЙ, Р. С. МЕЛЬНИК, д. т. н. Ю. Є. НИКОЛАЄНКО,
д. т. н. В. Ю. КРАВЕЦЬ, PhD Д. В. ПЕКУР*

Україна, м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського;

*Інститут фізики напівпровідників імені В. Є. Лашкарьова НАН України

E-mail: leonid.lipnitsky@gmail.com; yunikola@ukr.net

ВПЛИВ ФОРМИ ГРАВІТАЦІЙНОЇ ТЕПЛОВОЇ ТРУБИ З РІЗЬБОВИМ ВИПАРНИКОМ НА ЇЇ ТЕПЛОПЕРЕДАВАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Виконано порівняння теплових характеристик мідної гравітаційної циліндричної теплової труби (ТТ) з різьбовим випарником, заповненої фреоном R141b, до та після її сплюснення. Експериментальні дослідження проводились при вертикальному розташуванні ТТ та під кутом нахилу відносно горизонту 15° в умовах охолодження зони конденсації вимушеною конвекцією. Показано, як впливає перехід від циліндричної форми корпусу до плоскої на температуру в зоні нагріву ТТ, тепловий опір та коефіцієнт тепловіддачі в зонах випаровування та конденсації в діапазоні теплової потужності від 5 до 70 Вт.

Ключові слова: тепла труба, теплопередавальні характеристики, різьбовий випарник, форма корпусу ТТ.

Сучасний розвиток електронного обладнання пов'язаний з проблемою зниження його масових та габаритних характеристик при одночасному збільшенні потужності. Це призводить до підвищення температурного режиму роботи як окремих елементів, так і пристрою в цілому, що сприяє зниженню надійності обладнання. Вважається, що відповідно до рівняння Арреніуса підвищення температури p - n -переходу інтегральної схеми на 10°C зменшує її середній термін служби на 50% [1]. Тому важливою інженерною задачею є пошук та створення ефективних систем охолодження, що можуть забезпечити нормальний тепловий режим електронних пристроїв у заданому діапазоні температури. Одним із сучасних рішень при цьому є використання теплових труб (ТТ) різних типів, конструкції та розмірів [2–4].

Теплові труби являють собою герметичні випаровувально-конденсаційні теплопередавальні пристрої з капілярною структурою на внутрішній поверхні, яка виконує функцію транспорту теплоносія та інтенсифікатора теплообміну в зонах ТТ. Проте наявність додаткової складової ТТ — шару капілярно-пористої структури призводить до збільшення вартості теплопередавальних пристроїв, а також ускладнює виготовлення системи охолодження з їх використанням.

Одним з найбільш простих та технологічних перспективних рішень здешевлення систем охолодження на основі двофазних теплопередавальних пристроїв є використання в системах охолодження термосифонів [5, 6] або гравітаційних теплових труб [7–10]. Гравітаційні ТТ відрізняються від традиційних гладкостінних термосифонів наявністю інтенсифікатора теплообміну щонайменше в зоні випаровування. Повернення сконденсованого теплоносія до зони випаровування в них здійснюється лише силами гравітації, тому в робочому положенні системи охолодження зона конденсації ТТ має розташовуватися вище зони випаровування [11].

Роботу виконано за підтримки Національного фонду досліджень України (проект № 2020.02/0357) та Міністерства освіти і науки України (проект № 2603).

Для підвищення теплопередавальних характеристик гравітаційних ТТ використовують різні методи інтенсифікації теплообміну в зоні випаровування. Наприклад, автори [12] для інтенсифікації теплообміну зробили на поверхні ТТ осьові поздовжні канавки методом електроерозійного різання, в [13] — на поверхню поздовжніх канавок термосифона наносили окисне покриття, в [14] застосували інтенсифікатори теплообміну у вигляді нанотрубок, вирощених анодуванням внутрішньої поверхні стінки в зоні випаровування алюмінієвої гравітаційної ТТ з ацетоном. Найбільш простими і дешевими інтенсифікаторами теплообміну в зоні випаровування гравітаційної ТТ можуть стати різьбові канавки [7, 15, 16]. Наразі відома невелика кількість експериментальних досліджень гравітаційних ТТ з різьбовим випарником, наприклад [15–17], та декілька робіт з комп'ютерного моделювання систем охолодження на їх основі, наприклад [11, 18]. Їхні результати вказують на перспективність застосування плоских гравітаційних ТТ з різьбовою структурою в зоні випаровування [19] в системах охолодження електронної апаратури.

Метою цієї роботи є експериментальне вивчення впливу зміни форми гравітаційної ТТ з різьбовим випарником з циліндричної на плоску на температуру в зоні нагріву, тепловий опір та коефіцієнти тепловіддачі в зонах випаровування та конденсації в широкому діапазоні зміни теплової потужності (від 5 до 70 Вт) при кутах нахилу ТТ до горизонту 90° та 15° .

Експериментальні зразки гравітаційних ТТ та методика проведення досліджень

Експериментальний зразок мідної гравітаційної ТТ циліндричної форми з інтенсифікатором теплообміну у вигляді різьбових канавок в зоні випаровування мав зовнішній діаметр 8 мм, внутрішній 6 мм, довжину 255 мм. Довжина зони нагріву ТТ складала 40 мм, зони охолодження — 200 мм, зона транспорту — 15 мм. Теплоносієм слугував фреон R141b. Коефіцієнт заповнення ТТ визначався як відношення об'єму теплоносія до об'єму внутрішнього простору ТТ в зоні випаровування й складав 0,54.

Після дослідження теплових характеристик циліндричної гравітаційної ТТ форму її корпусу змінювали на плоску (рис. 1) методом деформації у пресформах. Розміри поперечного перерізу плоскої гравітаційної ТТ складали $6 \times 7,4$ мм, при цьому зберігалася її довжина та кількість теплоносія.

Після заправлення ТТ теплоносієм та герметизації проводили механічне очищення її корпусу від оксидів міді, які утворилися в процесі виготовлення ТТ, після чого поверхню знежирювали та розмічали місця встановлення термопар за схемою, представленою на рис. 2. У визначених місцях за допомогою алюмінієвої клейкої стрічки монтували мідь-константанові термопари. Всього було встановлено 14 термопар: шість в зоні нагріву (ТП1...ТП6), одна в зоні транспорту (ТП7), сім в зоні охолодження (ТП8...ТП14). Далі проводився монтаж імітатора теплового потоку та радіатора охолодження з вентиляторним блоком. При цьому в місцях контакту використовувалась теплопровідна паста КПТ-8. Зони нагріву та транспорту ТТ теплоізолювали базальтовою ватою.

Підготовлений досліджуваний зразок ТТ монтували на поворотний пристрій експериментальної установки (рис. 3) у вертикальному положенні, розташовуючи зону охолодження ТТ вище зони нагріву, й перевіряли працездатність всіх систем установки.

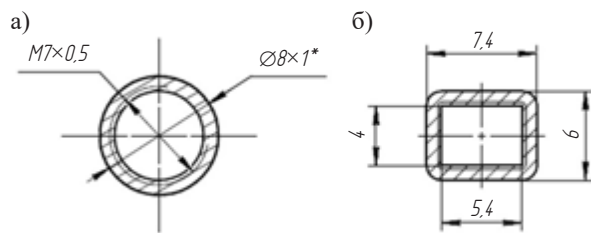


Рис. 1. Поперечний переріз гравітаційної ТТ в зоні нагріву: а — початкова форма; б — форма після пресування

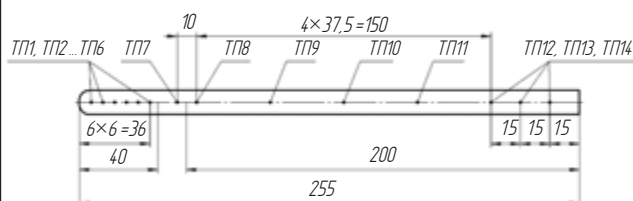


Рис. 2. Схема розташування термопар на поверхні ТТ

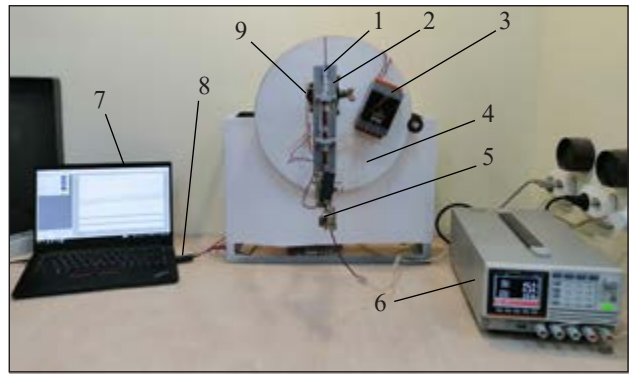


Рис. 3. Загальний вигляд експериментальної установки для дослідження теплових характеристик гравітаційних ТТ в умовах охолодження вимушеною конвекцією:

1 — теплова труба; 2 — радіатор; 3 — модуль збору даних; 4 — поворотна основа; 5 — імітатор теплового потоку; 6 — блок живлення; 7 — персональний комп'ютер; 8 — перетворювач інтерфейсу; 9 — вентилятор

Експериментальна установка містить поворотну основу 4 з штативним притискачем, який дозволяє фіксувати досліджувану ТТ 1 з імітатором теплового потоку 5 та радіатором 2. Радіатор з вмонтованою ТТ охолоджували за допомогою двох вентиляторів 9, встановлених на торцях ребер радіатора на відстані, що дорівнювала третині довжини радіатора від кожного краю (рис. 4). З метою зниження контактного теплового опору в основі радіатора виконували канавку напівциліндричного поперечного перерізу для циліндричної ТТ та прямокутного перерізу на половину товщини основи радіатора для плоскої ТТ. До зони контакту між тепловою трубою та радіатором наносили теплопровідну пасту КПТ-8.

Відвід теплоти забезпечували вимушеною конвекцією повітря з температурою $20 \pm 1^\circ\text{C}$, швидкість повітря на виході з міжреберних каналів радіатора складала біля 1 м/с.

Експериментальні дослідження проводяться наступним чином.

Після фіксації досліджуваної ТТ у вертикальному положенні вмикаються вентилятори охолодження і подається електричне навантаження на імітатор теплового потоку. Після виходу установки на

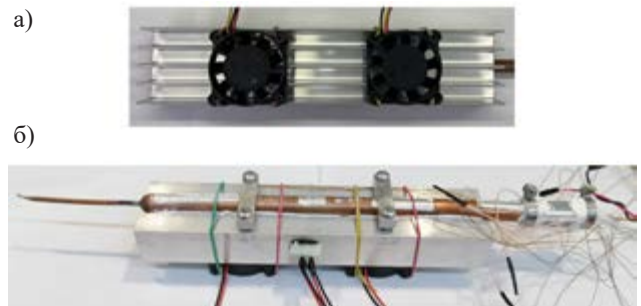


Рис. 4. Система тепловідведення від зони охолодження ТТ — вентиляторний охолоджувальний блок (а), встановлений на досліджуваній ТТ (б)

стаціонарний тепловий режим до електронної системи обробки даних вносяться покази термодатчиків в контрольних точках та значення теплової потужності Q . Потім відбувається перехід до наступного значення Q (крок підвищення 5 Вт). При досягненні температури в зоні нагріву 100°C (значення зумовлено температурними режимами роботи електроніки) електричний нагрівач вимикається, дані зберігаються в персональному комп'ютері для подальшої обробки.

Дискретний масив значень температури, отриманих за період стаціонарного режиму з кожного датчика температури ТП1...ТП14, осереднюється за формулою

$$\bar{t}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n t_{ij},$$

де i — номер термодатчика, $i = 1 \dots 14$;

n — кількість вимірів протягом стаціонарного періоду;

j — порядковий номер вимірювання, $j = 1 \dots n$.

Після цього осереднюються температури по зонах нагріву (ЗН), транспорту (ЗТ) та охолодження (ЗО), а також розраховується тепловий опір R ТТ:

$$\bar{t}_{\text{ЗН}} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \bar{t}_i; \quad \bar{t}_{\text{ЗТ}} = \bar{t}_7;$$

$$\bar{t}_{\text{ЗО}} = \frac{1}{7} \sum_{i=8}^{14} \bar{t}_i; \quad R = \frac{\bar{t}_{\text{ЗН}} - \bar{t}_{\text{ЗО}}}{Q}.$$

Коефіцієнти тепловіддачі в зонах нагріву та конденсації визначали, відповідно, за формулами

$$\alpha_{\text{ЗН}} = \frac{Q}{F_{\text{ЗН}}(\bar{t}_{\text{ЗН}} - \bar{t}_{\text{ЗТ}})}; \quad \alpha_{\text{ЗК}} = \frac{Q}{F_{\text{ЗО}}(\bar{t}_{\text{ЗТ}} - \bar{t}_{\text{ЗО}})},$$

де $F_{\text{ЗН}}, F_{\text{ЗО}}$ — площа внутрішньої поверхні зони нагріву та зони конденсації відповідно.

Такі розрахунки виконувалися для кожного значення підведеного теплового навантаження Q . Результати представлялися у вигляді графічних залежностей середнього значення температури в зоні нагріву та величини теплового опору від теплового навантаження.

Результати експериментальних досліджень та їх аналіз

На практиці при розрахунку температурного режиму електронних компонентів, який може забезпечити система охолодження, важливо знати середнє значення температури в зоні нагріву ТТ за певного значення теплового навантаження.

На рис. 5 наведено результати визначення середніх значень температури в зоні нагріву для ТТ обох типів при різних її орієнтаціях в просторі. Як видно

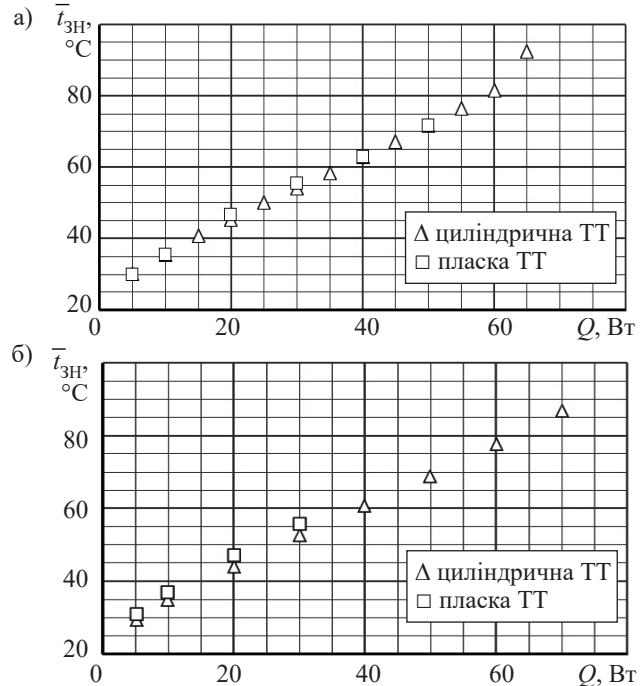


Рис. 5. Залежність середньої температури зони нагріву досліджуваних гравітаційних ТТ від підведеного теплового потоку у вертикальному положенні (а) та під кутом 15° відносно горизонту (б)

з рис. 5, а, при вертикальній орієнтації ці значення температури для ТТ циліндричної та плоскої форми майже однакові у всьому діапазоні зміни теплової потужності. Однак максимальний тепловий потік, який здатна передавати циліндрична ТТ, на 10 Вт перевищує той, що передає плоска (60 Вт проти 50 Вт). (При перевищенні цього значення Q спостерігалася стрімке зростання температури в зоні нагріву ТТ.) Як показують наведені результати, при вертикальній орієнтації ТТ і однакових значеннях теплового потоку в діапазоні від 5 до 50 Вт ефективність охолодження електронних компонентів не буде залежати від форми ТТ, а при потужності електронних компонентів від 50 до 60 Вт можна використовувати лише циліндричну ТТ.

Середні значення температури в зоні нагріву циліндричної ТТ, розташованої під кутом $\varphi = 15^\circ$ до горизонту, дещо відрізняються від отриманих при її вертикальному положенні — вони менші на $1\text{—}3^\circ\text{C}$, а для плоскої ТТ — майже такі самі (рис. 5, б). Тобто, при $\varphi = 15^\circ$ значення температури для плоскої ТТ порівняно з циліндричною у діапазоні теплових потоків від 5 до 30 Вт були вищими на $1\text{—}3^\circ\text{C}$ (або на $3\text{—}5\%$) залежно від теплового потоку. Більших змін набули значення максимального теплового потоку. Перш за все, після нахилу плоскої ТТ на 15° спостерігалася зменшення верхньої межі її функціонування на 20 Вт — з 50 до 30 Вт. Водночас для циліндричної ТТ максимальне значення теплового потоку зросло на 10 Вт — з 60 до 70 Вт.

Така поведінка теплових характеристик теплової труби при зміні її орієнтації в просторі може бути ви-

кликана зміною процесів теплообміну як в зоні нагріву, так і в зоні охолодження. І хоча різниця між значеннями температури є незначною, проте зменшення максимального теплового потоку плоскої ТТ є достатньо суттєвим. Це слід брати до уваги при використанні ТТ в певних умовах, наприклад в положеннях, близьких до горизонтального, попри те, що технологічно плоскі ТТ спрощують монтаж.

Щодо теплового опору R , аналіз представлених на рис. 6 даних показує, що з підвищенням теплового навантаження величина R як циліндричної, так і плоскої ТТ зменшується до певного значення Q , після якого починається його зростання. Це значення Q є максимальним тепловим потоком, що передається тепловою трубою. Така форма графіків з точкою перегину є класичною для теплового опору ТТ. Падіння R досягається завдяки інтенсифікації процесів кипіння та конденсації. В певний момент тепловий опір досягає мінімального значення, що вказує на максимум ефективності теплової труби. Подальше зростання може відбуватися через низку причин, таких як: нестача теплоносія в зоні нагріву, гідродинамічні фактори, зростання товщини плівки в зоні конденсації, що погіршує тепловіддачу, тощо. В загальному випадку початок зростання теплового опору сигналізує про початок кризових явищ в ТТ. Особливо помітно це на рис. 6, а, де зростання теплового потоку від 50 Вт призвело до стрімкого зростання теплового опору ТТ.

При вертикальній орієнтації ТТ на початковій ділянці (5—15 Вт) спостерігається відмінність теплового опору циліндричної та плоскої ТТ (рис. 6, а). Це пов'язано з внутрішньою гідродинамікою нерозвиненого кипіння та перерозподілом теплового потоку у зоні нагріву. Крім того, у вертикальному положенні мінімальний тепловий опір — $0,3^\circ\text{C}/\text{Вт}$ за теплового навантаження 50 Вт був досягнутий саме в плоскій ТТ. На відміну від цього, при $\varphi = 15^\circ$ (рис. 6, б) циліндрична ТТ забезпечує інтенсивніше повернення теплоносія у зону нагріву, що дозволяє досягти ще меншого значення мінімального теплового опору ($0,29^\circ\text{C}/\text{Вт}$) та відвести від зони нагріву у два рази більший тепловий потік порівняно з плоскою ТТ.

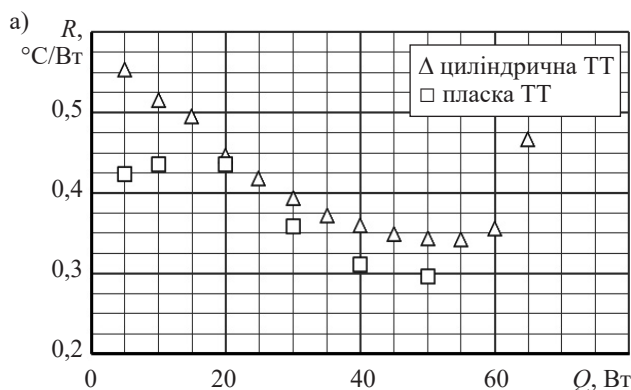
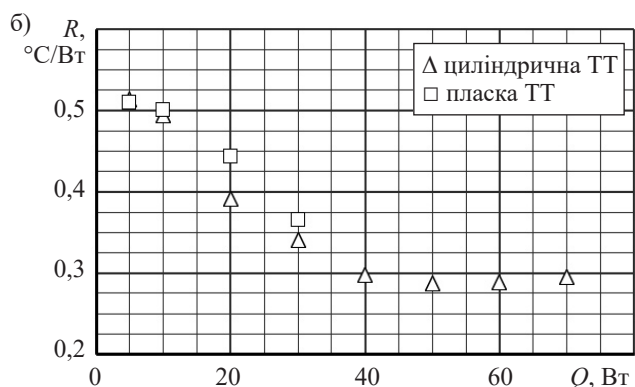


Рис. 6. Залежність теплового опору ТТ від підведеного теплового потоку у вертикальному положенні (а) та під кутом 15° відносно горизонту (б)

Тепловий опір досліджуваних гравітаційних ТТ складається з теплових опорів в зонах випаровування та конденсації, які визначаються інтенсивністю теплообміну в зазначених зонах. Отримані експериментально графічні залежності коефіцієнтів тепловіддачі α в зонах випаровування та конденсації в циліндричній та плоскій гравітаційних ТТ наведені на рис. 7, 8.

На відміну від залежностей температури зони нагріву та теплового опору ТТ від теплового навантаження, різниця між значеннями коефіцієнтів тепловіддачі циліндричної та плоскої ТТ є більш явною. Для циліндричної ТТ у вертикальному положенні (рис. 7, а) графік умовно можна розділити на три частини. В діапазоні 5—15 Вт коефіцієнт тепловіддачі змінюється незначно, що свідчить про початок функціонування ТТ та нерозвинене кипіння або ж інтенсивне випаровування в зоні нагріву. Для плоскої ТТ така картина спостерігається у дещо більшому діапазоні Q — до 20 Вт, проте значення її коефіцієнта тепловіддачі нижчі на 5—10%. Подальше збільшення теплового потоку призводить до інтенсифікації кипіння і зростання коефіцієнтів тепловіддачі в діапазоні Q від 20 до 50 Вт, при цьому на всьому діапазоні Q значення α для плоскої ТТ на 15—20% нижчі, ніж для циліндричної ТТ. Така різниця, вочевидь, може бути наслідком більшого опору переміщенню парової суміші від зони нагріву до зони охолодження через утворення менісків в кутах плоскої труби. Також з цієї причини можливе зменшення кількості теплоносія в зоні нагріву, що прямо впливає на інтенсивність відведення теплоти від стінки ТТ. При подальшому збільшенні теплового потоку спостерігається зменшення різниці значень α , а при переході від 55 до 60 Вт навіть зниження цих значень, що прямо вказує на кризові явища, пов'язані з нестачею теплоносія в зоні нагріву. У випадку плоскої ТТ таку картину спостерігати не вдалося.

Залежності $\alpha = f(Q)$, отримані при розташуванні ТТ під кутом нахилу до горизонту 15° (рис. 7, б), мають аналогічний характер, проте кількісно показники дещо відрізняються.



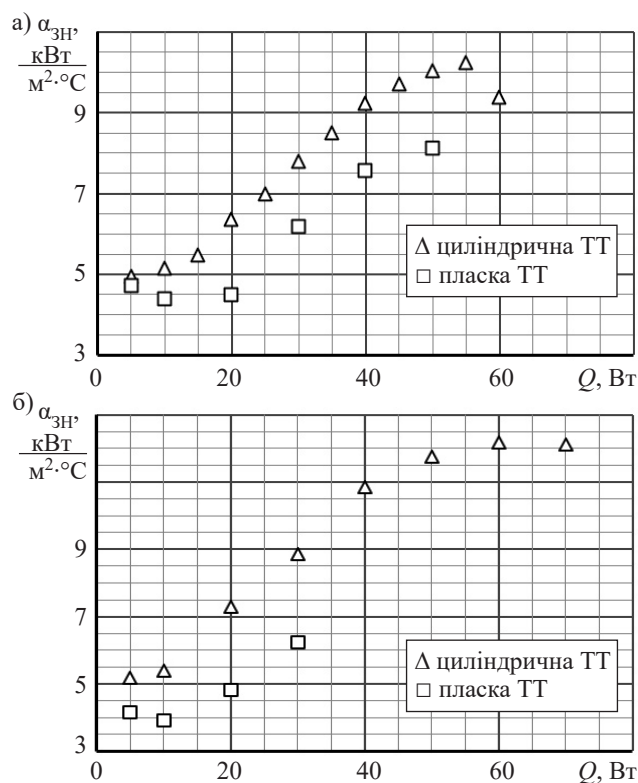


Рис. 7. Залежність коефіцієнта тепловіддачі у зоні нагріву ТТ від підведеного теплового потоку у вертикальному положенні (а) та під кутом 15° відносно горизонту (б)

Важливо зауважити, що для циліндричної ТТ при зміні орієнтації від вертикальної до нахиленої суттєво зросли значення α — на 14 — 19% залежно від теплового потоку. Такий приріст коефіцієнта тепловіддачі пояснюється утворенням тонкої плівки рідини у верхній частині зони нагріву, що інтенсифікує процес пароутворення. Крім того, при виході пару із зони нагріву захоплюється менше теплоносія. Частково це пояснює і зростання діапазону теплового потоку, де ТТ може функціонувати.

Як зазначалося вище, тепловий опір ТТ залежить як від інтенсивності процесу кипіння, так і від інтенсивності процесу конденсації. На рис. 8 наведено графіки залежності коефіцієнта тепловіддачі у зоні конденсації теплоносія від теплового потоку при різній орієнтації ТТ в просторі. На противагу результатам, що описують інтенсивність тепловіддачі в зоні нагріву, для зони конденсації, як у вертикальному, так і у нахиленому положеннях ТТ, значення коефіцієнтів тепловіддачі плоскої ТТ вищі порівняно з циліндричною на всьому дослідженому діапазоні Q .

Такий розподіл може пояснюватись згадуваним вище утворенням менісків рідини у кутах плоскої труби. Саме через це у зоні конденсації плоскої труби товщина плівки теплоносія на плоских гранях при вертикальній орієнтації ТТ менша, що і призводить до більш інтенсивної конденсації. Також це припущення підтверджується тим, що при зміні кута нахилу різниця в значеннях коефіцієнтів тепловідда-

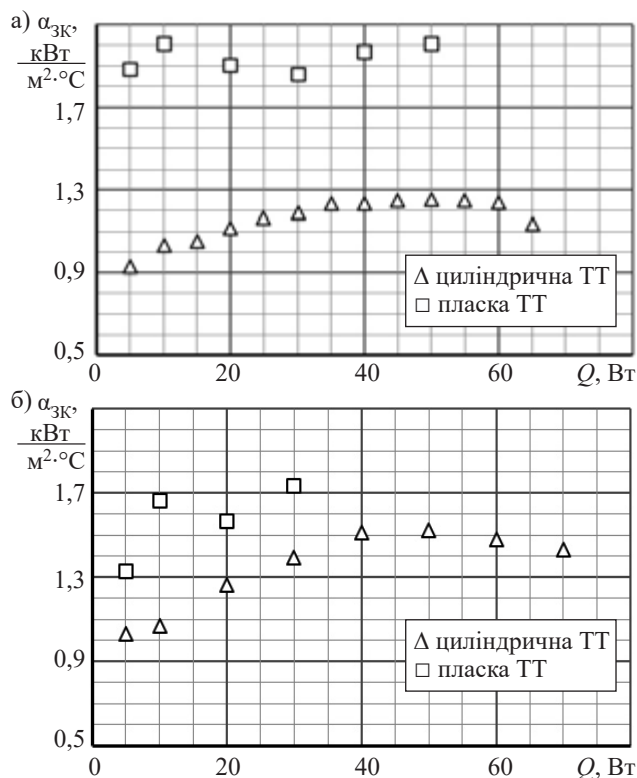


Рис. 8. Залежність коефіцієнта тепловіддачі у зоні конденсації ТТ від підведеного теплового потоку у вертикальному положенні (а) та під кутом 15° відносно горизонту (б)

чі між циліндричною та плоскою ТТ зменшується. Це відбувається через те, що в циліндричній ТТ теплоносії після конденсації стікає по стінках в нижню частину профілю труби, що призводить до зменшення товщини плівки конденсату на основній поверхні конденсації та до зростання ефективності конденсації. Цей ефект описували й інші автори при дослідженнях впливу орієнтації в просторі на характеристики термосифонів. Тобто зменшення кута нахилу призводить до інтенсифікації процесів конденсації в круглій трубі на 5 — 12%.

У випадку плоскої ТТ зміна кута нахилу з 90° до 15°, навпаки, призводить до зменшення коефіцієнта тепловіддачі на 10 — 20% залежно від теплового потоку, що можна пояснити утворенням на всій нижній поверхні плоскої ТТ шару конденсату теплоносія. Оскільки саме від нижньої поверхні плоскої ТТ відводиться найбільша кількість теплоти до радіатора, утворення шару конденсату і призводить до погіршення характеристик теплообміну в зоні конденсації. Хоча навіть у такому випадку коефіцієнти тепловіддачі плоскої ТТ в зоні конденсації на 15 — 28% вищі, ніж циліндричної ТТ.

Висновки

Результати досліджень теплових характеристик циліндричної та плоскої гравітаційних ТТ з різьбовим випарником, заправлених фреоном 141b, показують, що такі теплопередавальні пристрої можуть

бути використані для ефективного охолодження теплонавантажених електронних компонентів радіоелектронної та комп'ютерної техніки в умовах вимушеної конвекції при орієнтації у просторі за силами тяжіння.

Проведені дослідження дозволяють обґрунтовано підходити до вибору форми ТТ залежно від максимальних теплових навантажень електронних компонентів та орієнтації в просторі системи охолодження. Зміна форми з циліндричної на плоску призводить до зменшення максимального теплового навантаження, що може передаватися тепловою трубою, але плоска форма ТТ є більш технологічною для застосування у системах охолодження електронного обладнання. До того ж зміна форми корпусу ТТ з циліндричної на плоску при досліджених геометричних розмірах поперечного перерізу в дослідженому діапазоні теплових потоків незначно впливає на середнє значення температури в зоні нагріву та на тепловий опір ТТ.

Проведений аналіз інтенсивності тепловіддачі в процесах кипіння та конденсації в ТТ показав фактори впливу на ці процеси, що дозволить надалі шукати шляхи зменшення впливу зазначених факторів.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Lakshminarayanan V., Sriraam N. The effect of temperature on the reliability of electronic components. *2014 IEEE international conference on electronics, computing and communication technologies (CONECCT)*, Bangalore, India, 2014, pp. 1–6, <https://doi.org/10.1109/conecct.2014.6740182>
2. Khairnasov S., Naumova A. Heat pipes application in electronics thermal control systems. *Frontiers in Heat Pipes*, 2015, vol. 6, article 6, pp. 1–14, <http://dx.doi.org/10.5098/fhp.6.6>
3. Mochizuki M. Latest development and application of heat pipes for electronics and automotive. *2017 IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ)*, Kyoto, Japan, 2017, pp. 87–90. <https://doi.org/10.1109/ICSJ.2017.8240095>
4. Алексеев Е.С., Кравец В.Ю. Система отвода теплоты от теплонагруженных элементов РЭА на основе пульсационной тепловой трубы. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2013, № 1, с. 19–24.
5. Kravets V., Konshin V., Hurov D. et al. Determining the influence of geometric factors and the type of heat carrier on the thermal resistance of miniature two-phase thermosyphons. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2022, vol. 4, no. 8(118), pp. 51–59. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263180>
6. Безродный М.К., Пиоро И.Л., Костюк Т.О. Процессы переноса в двухфазных термосифонных системах. *Теория и практика*. Киев, Факт, 2005, 704 с.
7. Николаєнко Ю.Є. Гравітаційна теплова труба. Патент України на корисну модель №109840, 2016, бюл. № 17.
8. Nikolaenko Yu. E., Alekseik E.S., Kozak D.V., Nikolaenko T.Yu. Research on two-phase heat removal devices for power electronics. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2018, vol. 8, pp. 418–425. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.09.012>
9. Tian F.Z., Xin G.M., Hai Q., Cheng L. An investigation of heat transfer characteristic of cross internal helical microfin gravity heat pipe with self-rewetting fluid. *Advanced Materials Research*, 2013, vol. 765–767, pp.189–192. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.765-767.189>
10. Jobb M., Nemec P., Kosa L., Malcho M. Influence of working fluid amount and working position gravitational heat pipe on thermal performance. *AIP Conference Proceedings*, 2014, vol. 1608, article 88. <https://doi.org/10.1063/1.4892713>
11. Nikolaenko Yu.E., Pekur D.V., Kravets V.Yu. et al. Study on the performance of the low-cost cooling system for transmit/receive module and broadening the exploitative capabilities of the system using gravity heat pipes. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 2022, vol. 14, iss. 12, article 121001, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1115/1.4054812>
12. Reji A.K., Kumaresan G., Kaushik N. et al. Thermal analysis of grooved heat pipe with eco-friendly refrigerant for low heat loads in comparison to an ordinary thermosyphon. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 66, pp. 878–882. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.512>
13. Sudhan A. L. S., Solomon A. B., Immanuel I. D. Comparative study on the heat transfer performance of micro-grooved anodized thermosyphon with R134a, R600a and R717 for low-temperature applications. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2021, vol. 35, is. 11, pp. 5213–5223. <http://doi.org/10.1007/s12206-021-1038-6>
14. Weng H.C., Yang M.-H. Heat transfer performance enhancement of gravity heat pipes by growing AAO nanotubes on inner wall surface. *Inventions*, 2018, vol. 3, is. 42, pp. 1–12. <https://doi.org/10.3390/inventions3030042>
15. Kozak D.V., Nikolaenko Yu.E. The working characteristics of two-phase heat transfer devices for LED modules. *2016 IEEE International Conference on Electronics and Information Technology (EIT)*. Odesa, Ukraine, 2016, pp. 10–13. <http://dx.doi.org/10.1109/ICEAIT.2016.7500980>
16. Николаєнко Ю.Є., Козак Д.В. Термическое сопротивление алюминиевой гравитационной тепловой трубы с резьбовой капиллярной структурой. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2017, № 4–5, с. 24–31.
17. Nikolaenko Yu.E., Pekur D.V., Sorokin V.M. et al. Experimental study on characteristics of gravity heat pipe with threaded evaporator. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2021, vol. 26, article 101107. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.101107>
18. Nikolaenko Yu.E., Pekur D.V., Sorokin V.M. et al. Thermal performance of low-cost cooling systems for transmit/receive modules of phased array antennas with and without gravity heat pipes. *Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT)*, 2022, vol. 18, article 23. <https://doi.org/10.5098/hmt.18.23>
19. Николаєнко Ю.Є., Котов М.М. Гравітаційна теплова труба. Патент України на корисну модель № 130237, 2018, бюл. № 22.

Дата надходження рукопису
до редакції 04.05 2023 р.

Опис статті для цитування:

Ліпницький Л. В., Мельник Р. С., Николаєнко Ю. Є., Кравец В. Ю., Пекур Д. В. Вплив форми гравітаційної теплової труби з різьбовим випарником на її теплопередавальні характеристики. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*, 2023, № 1–2, с. 27–33. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2023.1-2.27>

Cite the article as:

Lipnitskyi L. V., Melnyk R. S., Nikolaenko Yu. E., Kravets V. Yu., Pekur D. V. Impact of changing the shape of gravity heat pipe with threaded evaporator on its heat transfer characteristics. *Technology and design in electronic equipment*, 2023, no. 1–2, pp. 27–33. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2023.1-2.27>

IMPACT OF CHANGING THE SHAPE OF GRAVITY HEAT PIPE WITH THREADED
EVAPORATOR ON ITS HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS

The modern development of electronics is associated with the problem of reducing the mass and size of the equipment while increasing its power. This leads to an increase in the temperature of both individual elements and the device as a whole, which contributes to a decrease in equipment reliability. This makes the development of inexpensive yet efficient cooling systems an urgent task. One of the ways to solve this problem is to use heat pipes of a new simplified design in cooling systems. This article compares the thermal characteristics of a cylindrical copper gravity heat pipe with a threaded evaporator before and after flattening. The working fluid used in the experiment was R141b. Experimental studies were conducted at two tilt angles relative to the horizontal under the conditions of forced convection cooling of the condensation zone. The influence of the change in the shape of the body from cylindrical to flat on the temperature in the heating zone of the heat pipe, thermal resistance, and heat transfer coefficients in the evaporation and condensation zones was shown in the range of heat power from 5 to 70 W. The choice of the heat pipe is justified based on the maximum thermal loads of electronic components and the orientation of the cooling system in space. Changing the shape of heat pipe from cylindrical to flat leads to a decrease in the maximum thermal power transmitted, but a flat heat pipe shape is more technologically feasible for use in cooling systems of electronic equipment.

Keywords: heat pipe, heat transfer characteristics, threaded evaporator, HP housing shape.

REFERENCES

1. Lakshminarayanan V., Sriraam N. The effect of temperature on the reliability of electronic components. *2014 IEEE international conference on electronics, computing and communication technologies (CONECCT)*, Bangalore, India, 2014, pp. 1–6, <https://doi.org/10.1109/conecct.2014.6740182>
2. Khairnasov S., Naumova A. Heat pipes application in electronics thermal control systems. *Frontiers in Heat Pipes*, 2015, vol. 6, article 6, pp. 1–14, <http://dx.doi.org/10.5098/fhp.6.6>
3. Mochizuki M. Latest development and application of heat pipes for electronics and automotive. *2017 IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ)*, Kyoto, Japan, 2017, pp. 87–90. <https://doi.org/10.1109/ICSJ.2017.8240095>
4. Alekseik E. S., Kravets V. Yu. Oscillating heat pipe cooler for heat-generating elements of electronics. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2013, no. 1, pp. 19–24. (Rus)
5. Kravets V., Konshin V., Hurov D. et al. Determining the influence of geometric factors and the type of heat carrier on the thermal resistance of miniature two-phase thermosyphons. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2022, vol. 4, no. 8(118), pp. 51–59. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263180>
6. Bezrodny M.K., Pioro I.L., Kostyuk T.O. *Protsessy perenosu v dvukhfaznykh termosifonnykh sistemakh. Teoriya i praktika* [Transport processes in two-phase thermosiphon systems. Theory and practice]. Kyiv, Fact, 2005, 704 p. (Rus)
7. Nikolaenko Yu.E. [Gravity heat pipe]. *Patent of Ukraine no. 109840*, 2016, bul. no. 17. (Ukr)
8. Nikolaenko Yu. E., Alekseik E.S., Kozak D.V., Nikolaienko T.Yu. Research on two-phase heat removal devices for power electronics. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2018, vol. 8, pp. 418–425. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.09.012>
9. Tian F.Z., Xin G.M., Hai Q., Cheng L. An investigation of heat transfer characteristic of cross internal helical microfin gravity heat pipe with self-rewetting fluid. *Advanced Materials Research*, 2013, vol. 765–767, pp.189–192. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.765-767.189>
10. Jobb M., Nemec P., Kosa L., Malcho M. Influence of working fluid amount and working position gravitational heat pipe on thermal performance. *AIP Conference Proceedings*, 2014, vol. 1608, article 88. <https://doi.org/10.1063/1.4892713>
11. Nikolaenko Yu.E., Pekur D.V., Kravets V.Yu. et al. Study on the performance of the low-cost cooling system for transmit/receive module and broadening the exploitative capabilities of the system using gravity heat pipes. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 2022, vol. 14, iss. 12, article 121001, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1115/1.4054812>
12. Reji A.K., Kumaresan G., Kaushik N. et al. Thermal analysis of grooved heat pipe with eco-friendly refrigerant for low heat loads in comparison to an ordinary thermosyphon. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 66, pp. 878–882. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.512>
13. Sudhan A. L. S., Solomon A. B., Immanuel I. D. Comparative study on the heat transfer performance of micro- grooved anodized thermosyphon with R134a, R600a and R717 for low-temperature applications. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2021, vol. 35, is. 11, pp. 5213–5223. <http://doi.org/10.1007/s12206-021-1038-6>
14. Weng H.C., Yang M.-H. Heat transfer performance enhancement of gravity heat pipes by growing AAO nanotubes on inner wall surface. *Inventions*, 2018, vol. 3, is. 42, pp. 1–12. <https://doi.org/10.3390/inventions3030042>
15. Kozak D.V., Nikolaenko Yu.E. The working characteristics of two-phase heat transfer devices for LED modules. *2016 IEEE International Conference on Electronics and Information Technology (EIT)*. Odesa, Ukraine, 2016, pp. 10–13. <http://dx.doi.org/10.1109/ICEAIT.2016.7500980>
16. Nikolaenko Yu. E., Kozak D. V. Thermal resistance of aluminum gravity heat pipe with threaded capillary structure. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2017, no. 4–5, pp. 24–31. <https://doi.org/10.15222/TKEA2017.4-5.24> (Rus)
17. Nikolaenko Yu.E., Pekur D.V., Sorokin V.M. et al. Experimental study on characteristics of gravity heat pipe with threaded evaporator. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2021, vol. 26, article 101107. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.101107>
18. Nikolaenko Yu.E., Pekur D.V., Sorokin V.M. et al. Thermal performance of low-cost cooling systems for transmit/receive modules of phased array antennas with and without gravity heat pipes. *Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT)*, 2022, vol. 18, article 23. <https://doi.org/10.5098/hmt.18.23>
19. Nikolaenko Yu.E., Kotov M.M. [Gravity heat pipe]. *Patent of Ukraine no. 130237*, 2018, bul. no. 22. (Ukr)

O. S. POLUKHIN¹, PhD V. V. KRAVCHINA²

Ukraine, Zaporizhzhya, "Element- Preobrazovatel" Ltd;
Mykolaiv, Mykolaiv Polytechnic Vocational College
E-mail: kravchina_vv@ukr.net

ASPECTS OF USING OF SHEET THERMOMIGRATION OF THE Al+Si THREE-DIMENSIONAL LIQUID ZONE TO FORM SEMICONDUCTOR POWER DEVICES

The paper considers using the technology of sheet thermomigration of three-dimensional zones, which implements p^+-Si^ liquid epitaxy on an $n-Si$ wafer, to produce power semiconductor devices with crystals having thinned layers of high-resistive $n-Si$ base, which are surrounded by p^+-Si^* side insulation regions, and thickened p^+-Si^* emitter layers. This technology, which has a number of advantages, was used to create diode arrays in $n-Si$ with a specific resistance of $20 \Omega \cdot cm$. For recrystallization, p^+-Si wafers with a resistivity of $0.005 \Omega \cdot cm$ were used. The produced direct polarity diodes had a breakdown voltage of $1000 V$, a forward voltage drop of $1.17 V$ at a current density of $2.0 A/mm^2$, and a reverse resistance recovery time of $t_{rr} = 1.5 \mu s$. Additional use of the technology of creation of recombination centers allowed to further improve t_{rr} to $0.5 \mu s$.*

Key words: *Al+Si melt, diode, sheet thermomigration, three-dimensional zones.*

The development and production of power semiconductor devices (PSD) today is guided primarily by the criteria of economy and reliability. Typically, the thickness of the silicon wafers for PSDs is determined by their mechanical strength and durability during the long manufacturing process of the chips. Because of this, both the high-resistance n -base of PSD chips and the wafer as a whole have a technological thickness that is difficult to reduce below about $150 \mu m$ without losing the necessary technological indicators of mechanical strength and reliability. This means that the high-resistance n -base of the structures can often be excessively thick, which is undesirable as regards their optimal parameters. For a number of PSDs used in relatively low-voltage devices, such as those connected to household power networks, this adversely affects some of their parameters. Among other things, it leads to an increase in the direct voltage drop U_F . The thicknesses of near-contact highly alloyed regions, which are formed by diffusion methods, have their own technological thickness limitations and do not allow to radically change both the thickness of the base and the U_F . Such excess can reach $100 \mu m$, which at a current density of more than $1 A/mm^2$ leads to noticeable power losses and an increase in the temperature of the device. The reverse voltages U_R required for such PSDs are usually in the range of $500 - 1200 V$. Such relatively low U_R values should be matched by relatively low values of the U_F parameter. To ensure appropriate parametric dependences of such PSD structures, there needs to be a technological possibility to reduce the thickness of the n -base to $30 - 100 \mu m$, depending on the specific resistance of the original n -silicon and the size of the

space charge regions of reverse-biased $p-n$ junctions. Of course, the requirements for the mechanical durability of the wafers and the manufacturability of the processes remain. Therefore, the decrease in the base thickness must be compensated by a corresponding increase in the thickness of the low-resistance p^+-Si layer of the substrate, which is the anode layer. Also, according to the basic technology, silicon wafers should have a relief surface of $1 - 3 \mu m$.

Fig. 1 shows two structures formed using different technologies with different base thicknesses. The considered designs of the structures allow both to passivate the rectifier $p-n$ junctions and to further control the parameters of the structures with wafers on one side. The structures shown in Fig. 1, *a* were formed using local thermomigration (TM) process (or temperature gradient zone melting), where the layers of lateral p^+ -insulation, the so-called insulating wall (IW), are formed [1–5]. The structures from Fig. 1, *b* were created using the developed sheet TM process, which includes the formation of both the IW layers and a thicker p^+-Si emitter layer, which allows maintaining mechanical properties of the wafers.

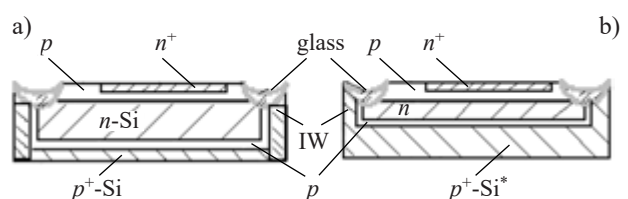


Fig. 1. Thyristor structures created according to the basic technology (*a*) and to the researched technology — with a thinner $n-Si$ base layer and a thicker p^+-Si emitter layer (*b*)

Studies have shown that the flat zone TM is a promising technique for producing PSDs with a thinner n -base.

The basis of the researched technology is the TM process, during which the p^+ -Si* layers of the substrate and the p^+ -Si* IW regions of the chips are created (Fig. 1). The technology also uses grinding processes to reduce the thickness of the semiconductor structure, including the reduction of the thickness of the n -base and exposing of the IW layers. This technology makes it possible to obtain structures with reduced UF without deteriorating the values of other important controlled parameters of the devices. At the same time, energy losses are reduced and the temperature regime of the devices is improved. The diameter of such processed wafers can be 100—150 mm or more. In this case, TM of 3D zones is an alternative to traditional gas epitaxy. The TM process used in this case is not local, but sheet-like with a liquid recrystallization zone over the entire surface area of the wafer.

The researched technology based on the TM process involves the creation of intermediate structures. To create them, a low-resistance p^+ -Si “source” wafer is connected to a high-resistance “working” n -Si wafer using Al+Si melt. One of the success factors of this technology is the formation of protrusions on the surface of p^+ -Si wafers [3], which form a capillary gap when the wafers are connected. These protrusions make it possible to ensure the same initial thickness of the Al+Si liquid zone of the “ n -Si — Al+Si melt — p^+ -Si” structures during their formation by capillary suction of the melt over the entire surface of the wafer connection.

For PSD chips in the range from 10 to 100 A, it is desirable to use a group technology to expose and passivate rectifier p - n junctions from the side of the n -silicon surface, as shown in Fig. 1. Such structures can be formed using the investigated technique of sheet thermomigration of Al with internal volumetric three-dimensional liquid zones, which can be abbreviated as sheet TM or 3D TM.

To successfully produce a PSD with thin base using the sheet TM technology, one should start with creating a working wafer — liquid zone — source wafer structure (“ n -Si — Al+Si melt — p^+ -Si”). The movement of the liquid layer of the melt through the gap between the connected wafers under the action of capillary wetting forces forms a liquid zone for sheet TM. The gap capillary consists of a flat part between the wafer surfaces and a relief part with grooves in n -Si, which are perpendicular to the wafer surface along the perimeter of the chip. Thus, the liquid zone of the Al+Si melt, which fills the capillaries, is three-dimensional. Later in the process of sheet TM, a layer of recrystallized p^+ -Si* is formed on the n -Si wafer, and thus the n -Si — p^+ -Si* structure is created. Moreover, a recrystallized p^+ -Si* layer is simultaneously formed both in the region of the topological IW grooves and on the flat horizontal surface of the emitter. The researched technology uses basic technological processes

of grinding with a microrelief of 1—3 μm , without the use of polishing processes with a high class of surface treatment. Since this method of PSD formation is considered for the first time, is quite appropriate to give a detailed description and analysis of the conditions for its implementation.

This study aims to develop and experimentally verify the possibility of applying the Al sheet thermomigration technology to produce PSDs with a thinner base and thus improved electrophysical parameters.

Literature review

Splicing two silicon wafers or epitaxial deposition of mono- or polycrystalline silicon films in order to obtain thin layers of silicon, including silicon on insulator (SOI), is widely used for producing integrated circuits (IC). Various technological routes are used to manufacture such structures. One of such routes [6] allows using a technology similar to the one considered in this study.

The method of direct thermal joining of wafers is also used in the manufacture of PSDs. But the structures created using this method are often highly resistive, have an increased defectivity of transition layers and an increased direct voltage drop [7].

The formation of three-dimensional TM zones and their application in manufacturing chips have not been covered in the literature, thus there is nothing to compare with in this particular matter. But there are similar methods and some aspects of this process [1—5, 8] that are worth mentioning. The fact is that the speed of zone migration in the temperature gradient field depends on their thickness [1], and there are generally three areas of such dependence. For “thin” zones, migration is to a greater extent determined by molecular-kinetic processes at the “cold” and “hot” boundaries of the zone than by diffusional transport of silicon through the zone melt. This mode was named “kinetic”, and the thinner the zones, the lower the speed of their advancement in the temperature gradient field. For relatively “thick” zones, the speed is determined precisely by the diffusion transfer process and practically does not depend on the zone thickness. Of course, there is also an intermediate stage between these two, the so-called mixed mode, where the migration speed does depend on the thickness, but the dependence is negligible. From a technological standpoint, it is the mixed mode that is the most acceptable, because the diffusion mode, despite its advantage as regards the speed uniformity, has a considerable problem of removing the remaining melt after the process is completed.

Adding a third component, such as gallium or tin, to the composition of the zone [9—11] is an important factor in increasing stability by equalizing the migrating velocities of liquid zones of different thicknesses. It is reported that the migration stability of the three-component zone is higher than that of the two-component zone, and it is also established that the temperature of the beginning of migration grows with increasing gal-

lithium concentration. It is also reported that the migration rate in the thickness range of 10—40 μm varies only slightly, which may serve as an additional advantage of the three-component zones.

Using plasma-chemical method to remove the products of reaction between the zone metal and silicon dioxide after the migration is complete [12] allows expanding the technological possibilities upon completion of the TM process and at the post-migration stage. Migration of zones with different thicknesses is generally undesirable. In practice, this is the reason why the period of proper migration is artificially extended to ensure that the so-called thinned outsider zones reach the finish side of the wafer. Otherwise, you will have to deal with “frozen” zones, which are the root cause of significant mechanical stresses [13—15] and defects. But the latest studies [9—11, 16] allow us to believe that using a three-component zone instead of a binary zone and non-stationary thermal conditions of TM, a zone of regularly variable thickness can move without breaks for a technologically acceptable distance. Non-stationary thermal conditions [16] suggest the presence of a tangential component of the temperature gradient $\nabla T\tau$ (this temperature changes in magnitude and direction over time) with a zero average value, when there is a significant decrease in the difference in the speed of movement of zones with unequal thickness.

The technology studied in this work competes with the technology of creating moderately low-voltage PSDs on epitaxial p^+-n -substrates [13, 14], but, compared to it, has a wider range of resistivity and thickness values of doped layers, while possessing certain advantages in the process of forming deposited layers on the wafer. The sheet TM technology also reduces environmental damage compared to gas-phase epitaxy.

This study does not consider the direct splicing of silicon or bonding the wafers with silicides, because the said methods produce too high a level of electrical resistance in the contact area, and when the operating current flows through the wafer, this leads to a significant increase in U_F and deterioration of the thermal operating conditions of the chip. In addition, these methods are acceptable only for wafers with grinded surfaces, however, when creating PSDs, preference is given to grinded surfaces with microrelief, which is a natural getter.

It is important to note that the researched technology is not a variation of those previously described in the literature, but is a completely independent technology.

Test samples and research methodology

The sheet TM technique based on three-dimensional zones [5] is used to manufacture PSD chips with a thin n -base with peripheral IWs on a thick p^+-Si^* substrate. The implementation of the method is explained in **Fig. 2—7**. Before the “ n -Si — Al+Si melt — p^+-Si ” structures are formed, grooves for the IW are formed on

the surface of one of the sides of the n -Si wafer. The other p^+-Si wafer is fitted with microprotrusions [2], which define the width of the capillary gap between the joined wafers. The grooves in the IW region are created using laser scribing, but other methods, such as chemical etching, can also be used (Fig. 2). These grooves will form the insulating side surfaces of the active regions of future semiconductor structures. The depth of the grooves for the IW should slightly exceed the thickness of the n -Si base of the future chip diode. The contact connection of the wafers thus occurs between the surfaces with p^+-Si microprotrusions and n -Si IW grooves. The width of the capillary contact gap, when it is later filled with the Al+Si melt, determines the thickness of the zone in the sheet TM process. The thickness variation of the Al+Si liquid zone during the sheet thermomigration process is determined by the topological microrelief of the grooves on the crystal surface, and the fact that the thicker zones over the depressions of the microrelief move faster allows for epitaxial overgrowth of depressions and leveling of the epitaxial surface relief, which is often necessary when designing semiconductor devices. It should be noted that the microprotrusions on the surface of p^+-Si were successfully formed by both surface etching and local application of films.

During capillary suction, the Al+Si melt fills both the volume of the gap between the wafers and the IW grooves perpendicular to the gap in the n -wafer (Fig. 2). Thus, a three-dimensional liquid zone is created (Fig. 3). This zone can be considered a combination of a flat zone of standard thickness and an ensemble of linear zones of excessive thickness within the IW.

During TM, the three-dimensional zone moves as a whole, changing its shape while moving. As the movement begins in the temperature gradient field ∇T , the zone front (the contact surface of the zone with p^+-Si (Fig. 3) is flat, but when the zones begin migrating, the thicker fragments in the region of n -Si grooves move with a higher speed due to the purely diffusive mode of migration, and thus such areas move forward (Fig. 4). At this stage, the recrystallized p^+-Si^* monocrystalline

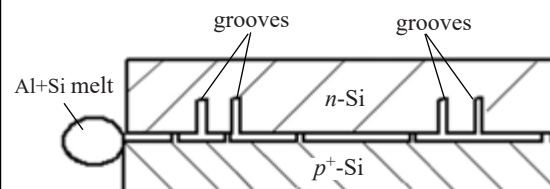


Fig. 2. Initial position of the n -Si and p^+-Si wafers during the liquid zone formation from the Al+Si melt

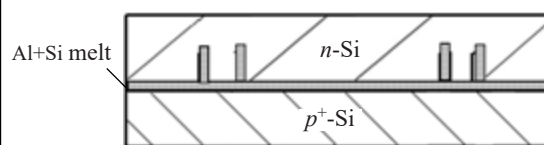


Fig. 3. Formation of the “ n -Si — Al+Si melt — p^+-Si ” structure necessary to perform the sheet TM process

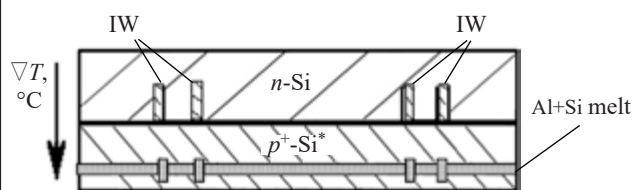


Fig. 4. Modeling of the movement of the three-dimensional zone in the sheet TM during the formation of the p^+-Si^*

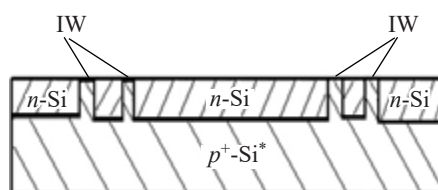


Fig. 5. Creation of a diode matrix during grinding of the $p^+-Si^*—n$ -Si structure

regions are formed as a continuation of the single crystal of the n -Si wafer. Moreover, the conductivity of the p^+-Si^* region is mainly determined by the conductivity of the original p^+-Si wafer, which has a significant value. Thus a structure with a flat active $p-n$ junction (Fig. 5) and vertical passive $p-n$ junctions of IW layer is formed. Theoretically, if different zone areas move with unequal speed, this can generally lead to the rupture and fragmentation of the zone. The choice of the geometric parameters of the zone and the sheet TM mode should ensure the integrity of the three-dimensional zone as a single complex throughout the entire process. However, the fragmentation of the zone may also be allowed at a significant distance from the planar $p-n$ junction, in the part of the structure that will later be mechanically removed.

It should be noted that both during the formation of the aluminum melt in the volume between the wafers and during sheet TM, Al and B diffuse to the n -Si wafer and the $p-n$ junctions shifts into the volume of the n -Si wafer relative to its surface. At the same time, the formed $p-n$ junctions of $p^+-Si^*—p^+-Si(n)—n$ -Si structures are high-voltage. After TM is completed, the obtained $p^+-Si^*—n$ -Si structure is mechanically processed. At this stage, IW layers (Fig. 5), which separate high-resistance n -regions and have high-voltage $p-n$ junctions $p^+-Si^*—p^+-Si—n$ -Si, are exposed. Thus, a diode matrix is formed on a low-resistance p^+ substrate (Fig. 5). When forming other types of devices, other diffusion or epitaxial regions may be created beforehand on the n -Si wafer.

Different stages of the sheet TM process were carried out on the OH.1944 multi-position installation. The installation has separate chambers for the TM process and for the process of forming structures from wafers connected by an aluminum alloy.

All thermal operations, phosphorus diffusion and oxidation followed a serial route using the necessary pre-diffusion treatments in accordance with the basic PSD technology. Exposing vertical rectifier $p-n$ junctions of the IW by chemical mesa-etching and passivating them with lead-alumino-silicate glass, metallization [2, 5], soldering of diode chips to the metal base, and sealing with plastic were done in the same way as when producing serial diodes in the TO-220 case. Electrophysical parameters of matrix elements, chips and finished diodes were tested in a similar way. Phototemplates, which expose silicon regions in the photoresist mask for subsequent

chemical etching of the mesa-grooves, are combined with the IWs placed in the center of the grooves. The parameters of the grooves in the n -type silicon wafer were provided by the current capabilities of the LTU-16 laser.

During the experiment, direct polarity diodes were formed. KDB-0.005 monocrystalline silicon wafers of p -type conductivity with a diameter of 76 mm, a thickness of 500 μm and a specific resistance of 0.005 $\Omega \cdot cm$ were used as p^+-Si . KEF-20 n -type silicon wafers were used as n -Si, with a lifetime of charge carriers τ_i of 7.5 μs , a thickness of 330 μm and a diameter of 76 mm. The wafers had a (111) crystallographic orientation, a grinding finish, and underwent standard basic surface treatments. The LTU-16 laser was used to create a grid of double grooves with a distance between the grooves of 200 μm on the “working” wafer. The grooves were cut with a step of 4.55×4.55 mm. The grooves were 40 μm wide and 110—120 μm deep. After the grooves were formed, the products of laser cutting needed to be removed. In order to do that, the wafers were treated in a 5% solution of cold KOH alkali until the violent stage of the reaction was complete, after which they were thoroughly washed in hot and cold deionized water.

Along the periphery and in the center of the p^+-Si wafers, columns of $\varnothing 1$ mm and a height of 25—30 μm were chemically etched. This was done to later form a capillary gap between the wafers. Joined together, the p^+-Si and n -Si wafers were fixed in a specialized graphite

Fig. 6. Schematic of Si wafers fixed in the cassette:

1 — n -Si; 2 — p^+-Si ; 3 — lower part of the cassette; 4 — upper part of the cassette; 5 — nozzle; 6 — Si squares for Al+Si melt; 7 — Al solder preform

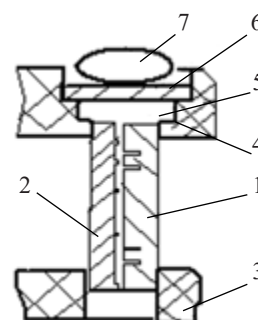


Fig. 7. Photograph of the upper and lower parts of the graphite cassette used to form “ n -Si — Al+Si melt — p^+-Si ” structures



cassette. The wafers were installed in the slots of the lower part and fixed with the slots of the upper part of the cassette (Fig. 6, 7). The upper fixing slots were equipped with recesses designed to hold Al and Si samples of a certain mass, and nozzles that direct the flow of the generated Al+Si melt to the capillary gap between the wafers.

The three-dimensional zones were formed by capillary force during wetting of the silicon surface in a vacuum of at least $1 \cdot 10^{-4}$ mmHg at a temperature of 900°C. The material that formed the liquid zone was the A+Si melt with a Si content of 25%. Such a melt was created directly in the process of heat treatment of the cassette with the Al and Si samples. The KOF-70 silicon cut into 7×7 mm squares and high-purity A6N (A999) aluminum were used in the amount necessary to fill the capillary gap. Initially, silicon squares were inserted into the square niches of the cassettes, and the aluminum solder preform was placed on top. When annealing in vacuum began, the components melted together to form the Al+Si melt. Then, when the surface tension forces became insufficient to hold the weight of the Al+Si melt above the nozzle gap with increasing temperature, the melt flowed down the nozzle to the capillary gap. Upon contact with the wafers, the melt was drawn into the gap by capillary forces. Thus, a three-dimensional liquid zone was formed almost instantly.

Apart from the flat capillary, the melt also completely filled the IW grooves in *n*-Si. At this point, the silicon of the wafers began partially dissolving until the equilibrium concentration at the zone formation temperature (37% Si at 900°C). The bonded wafers were cooled and transferred into another chamber of the TM installation. The OH.1944 installation with resistive heating in a stationary temperature gradient field was described in [2]. The vacuum was at least $1 \cdot 10^{-4}$ mm Hg, and the maximum temperature of the process was 1150°C. The temperature rose at a rate of up to 100°C/min and cooled by 40—50°C/min.

During grinding, the position of the *p*-*n* junctions was controlled on the sections along the wafer edges. The cut layers were contrast stained when processed in hydrofluoric acid with the addition of nitric acid.

First, the finish side of the wafer, i.e. the *p*⁺-Si* layer, was ground until the surface was made plane-parallel. After that, one-sided or two-sided grinding was used to adjust the thickness of the base of the diode matrices to the required thickness (about 100 μm) (Fig. 5). The *p*⁺-Si* IW was contrast stained to carry out photolithographic alignment.

During phosphorus oxidation and diffusion, the *p*-*n* junction somewhat shifted towards the region of bulk *n*-type silicon. In total, the high-temperature treatments affecting the displacement of the *p*-*n* junction lasted about six hours.

Chemical etching of the grooves in the region of rectifier *p*-*n* junctions of the diode elements, glass pas-

sivation of the grooves, and nickel metallization of the contact surfaces were made according to the standard diode manufacturing technology. At the same time, the depth of the mesa-grooves was decreased to 50—60 μm, compared to the regular production technology. This could have been the reason for some permissible decrease in U_R values. Each cathode contact had a metallization area of 10 mm². A serial set of phototemplates designed to create diodes with a reverse breakdown voltage U_R at the level of 1.6—2.5 kV was used.

DLS-82E spectrometer was used to study deep level spectra using non-stationary capacitive spectrometry techniques.

Experimental results

Fig. 8 presents the photographs of the investigated *n*-Si — *p*⁺-Si* structures. Fig. 8, *a* shows the surface of the finish side of the recrystallized *p*⁺-Si* layer immediately after the sheet TM process. In some areas, e.g., in the lower part of the wafer (Fig. 8, *a*), flat zones do not reach the surface. Fig. 8, *b* shows the surface of the cross-section of the wafer structure with *p*⁺-Si and *n*-Si layers, where extension lines indicate the *p*⁺-Si* IW insulating protrusions. The *p*⁺-Si* layers of the substrate and IW changed their color to a darker shade during contrast staining, while the light shade of *n*-Si remained unchanged. The grinded surface of the *n*-Si diode matrix is shown in Fig. 8, *c*, where the double dark lines of *p*⁺-Si* IW layers visibly stand out on the gray background of *n*-Si.

The image of the unground *p*⁺-Si* layer shows that the IW (double grid) with a greater zone thickness surfaced completely, while the flat parts of the *p*⁺-Si* three-dimensional zone did not reach the surface in some areas (Fig. 8, *a*).

This did not affect the functionality of the device, and the possible formation of such structures had been

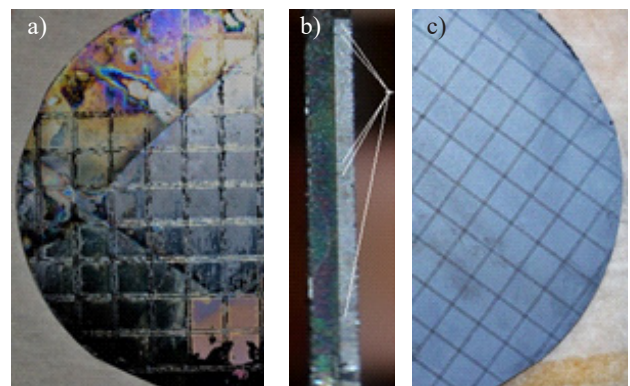


Fig. 8. Photographs of the structures obtained by sheet TM: *a* — surface of the recrystallized *p*⁺-Si* layer before grinding; *b* — cross section of *n*-Si and *p*⁺-Si* layers; *c* — *n*-Si surface after grinding

predicted earlier when analyzing the kinetics of the movement of the studied three-dimensional zones in the sheet TM process.

Analysis of the parameters of the obtained devices

Si wafers with fully formed semiconductor structures of direct polarity diodes are shown in **Fig. 9**. Before dividing the wafer into chips, we tested the reverse voltage U_R of each element, where the reverse leakage current was below 10 μA . The lifetime of minor charge carriers τ_i was measured selectively and found to be $3.2 \pm 0.25 \mu\text{s}$.

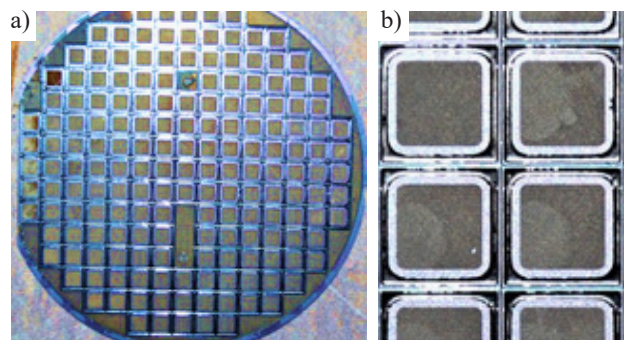


Fig. 9. Full-size (a) and enlarged (b) photographs of the wafer with diode structures formed by sheet TM and with layers of metallization and insulating glass

Compared to the initial lifetime on n -wafers $\tau_i \leq 7.5 \mu\text{s}$, the obtained value can be considered acceptable, considering that no special annealing was done to improve τ_i .

The obtained diode chips had a reverse breakdown voltage U_R at the level of 0.95 — 1.05 kV, which is slightly less than the maximum breakdown voltage of the p - n junction for the obtained semiconductor structures based on n -Si wafers with a resistivity of 20 $\Omega \cdot \text{cm}$. Lower values of U_R were observed in the elements located closer to the center of the wafers. This difference can be explained by a certain curvature of the n -Si surface and a decrease in the thickness of the base in the region of the bulge in the center of the wafer during its flat-parallel grinding.

After dividing the wafer into separate chips, the standard technology was used to create diodes in TO-220 case. The resulting diode devices had a reverse recovery time τ_{rr} of about 1.5 μs . This value of the τ_{rr} parameter matches the parameters of some of the standard-technology fast-recovery diodes. The value of the direct current I_F and the corresponding average values of the

forward voltage drop $\bar{U}_F$ of the forward polarity diodes are shown in the **Table**. The average forward voltage $\bar{U}_F$ was calculated for groups of 20 diodes. The table also shows the values of the root mean square deviation σ , which are given in millivolts and in relative percentages and demonstrate a slight variation of the U_F values. This indicates high reproducibility of the results. Compared to the mass-produced devices, the diode in the exposed state demonstrates better, lower values of the voltage drop. Irradiation of the studied structures with high-energy electrons [18] allows obtaining τ_{rr} below 500 ns, where $U_F \leq 1.55 \text{ V}$. Such parameters are significantly better in comparison with the parameters of the mass-produced fast-recovery diodes of this type. Using both the initial n -Si with higher values of τ_i and the phototemplate with a larger area of cathode metallization, namely 12.0 mm^2 instead of 10.0 mm^2 , will further reduce U_F .

The serial D106 diodes produced by standard diffusion technology with the IW created using local TM of linear zones have $\bar{U}_F$ of 1.22 to 1.27 V at a current of 20 A. For such diodes, τ_{rr} is around 10 μs at $\tau_i = 20$ — 40 μs . Compared to standard diodes, structures made using sheet TM of three-dimensional zones allow switching a larger amount of current, have a lower direct voltage drop and, accordingly, a lower level of losses, while the τ_{rr} parameters allow defining them as fast-recovery diodes of certain frequency groups [18]. The same applies to thyristor chips with optical or electrical control. The obtained results on manufacturing and testing such diodes and thyristors in welding equipment allow talking about the prospects of using them to produce devices powered from 220 and 380 V supply networks. The use of sheet TM allows forming emitter layers with different concentrations of impurities, thereby implementing different types of p - n junctions, which is determined and easily adjusted by choosing the value of the resistivity of the original silicon of the p^+ -Si wafer for sheet TM. The technology, having a small environmental stress, is able to compete with traditional gas epitaxy, including in terms of increasing the range of breakdown voltage U_R , improving frequency properties and other technical capabilities.

Since the studied technology applies thermomigration liquid epitaxy deposition on a Si relief, it is important to compare it with gas-phase epitaxy on a similar relief.

Direct voltage drop U_F in the structures obtained by sheet TM depending on the amount of direct current

$I_F, \text{ A}$	10	12,5	16	20	25	40	50	63	80
$\bar{U}_F, \text{ B}$	1,02	1,07	1,12	1,17	1,23	1,42	1,52	1,71	1,88
$\pm \sigma, \text{ mV}$	12	25	20	50	50	70	87	100	90
$\pm \sigma, \%$	1,2	2,3	1,8	4,3	4,1	4,9	5,7	5,8	4,8

When considering the gas-phase epitaxial deposition on the relief surface of Si wafers, it is necessary to note that a higher rate of deposition of the Si layer on the surface than at the bottom of the slits may lead to the formation of macrostructural defects, such as volumetric voids deep in the slits. In this case, the application of gas-phase epitaxy on the topological relief may not be appropriate. With some other technologies, for example, the formation of structures with dielectric insulation, the use of gas-phase deposition of thick polycrystalline silicon layers on the relief may lead to significant mechanical stresses, and thus to bending and warping deformation of the wafers.

The studied technology does not exhibit any formation of volumetric overgrowth defects in the slits. At the same time, the monocrystalline silicon layers, both near the grooves with a width of 40 μm and a depth of 120 μm , and on the grinded surface of $n\text{-Si}$ in the area with a microrelief height of 1—3 μm , are of high quality. The Al+Si melt, both during the filling of the capillary between the joined wafers, and during the start of the sheet TM process, dissolving Si of the surface layers of the microrelief, is saturated with silicon to an equilibrium concentration. The process of dissolution of Si also occurs in topological slit grooves, which are quickly and efficiently filled with the Al+Si melt due to capillary forces. The formation of the solid phase in the volume of the three-dimensional zone occurs as a single coherent front along the entire surface, but with some predominance of the crystallization rate of $p^+\text{-Si}^*$ in the volume of topological gaps, because the liquid zone of the Al+Si melt is much thicker. Such features of the deposition kinetics in general determine the quality of the formed structures of recrystallized silicon $p^+\text{-Si}^*$ on the $n\text{-Si}$ relief. The occurring mechanical stresses are relatively minimal and are to do with the issues of compatibility between the layers with different thermal expansion coefficients. These include the presence of contact of the $n\text{-Si}$ crystal with the melt zone and the solid phase of the Al+Si melt at different stages of the TM sheet process, as well as the compatibility of the layers with various impurities, respectively P and Al and B. As a result, mechanical stresses may manifest themselves between the layers of $p^+\text{-Si}^*$ and layers of the $n\text{-Si}$ wafer in the form of structure bending with convexity on the $n\text{-Si}$ side. But in the studied technology, there are no layers with mechanical stresses and crystallographic defects similar to those formed on the peripheral surfaces of the IW boundary during local TM in silicon [13, 14]. Such Si layers with different stresses exhibit different kinetics of chemical etching, which is reflected in the formation of a characteristic relief in the process of chemical etching of grooves in the places of deposition of a layer of insulating low-melting glass above the IW. The high level of elec-

trophysical parameters indicates the high quality of the $n\text{-Si} - p^+\text{-Si}^*$ interface and of the $p\text{-}n$ junction in $n\text{-Si}$.

One of the factors that reduce τ_{tr} of the obtained structures can be the formation of recombination centers (RC), which additionally improve the frequency properties of the semiconductor structures of the devices. In this work, the deep-level transient spectroscopy (DLTS) allowed revealing the appearance of RCs on the samples described in work [2] during local Al TM and post-operational annealing at a temperature of 1150°C for 4, 9, and 16 hours during the formation of the IW from $p^+\text{-Si}$. The annealing quality was evaluated by the reverse breakdown voltage. On the samples where the annealing time was 4 hours, recombination centers with the energy level $E_{a5} = 0.28$ eV were observed. The indicated centers were not observed in the samples annealed for 9 and 16 hours. The obtained TM RC peaks are similar in shape, but shifted to the region of higher ionization temperatures relative to the $E_{a4} = 0.35$ eV peaks of modified divacancies, which were observed in the spectra of the structures after irradiation with high-energy electrons and low-temperature annealing [18]. It is clear that it is not yet possible to generalize the appearance of such RCs on the structures created by sheet TM based on silicon with different conductivity and different base thickness, and the issue requires further study.

The studied structures surpass the basic ones, such as KEF40, due to the advantages in frequency properties, a thinner base (about 100 μm instead of 160 μm), a higher doped silicon they are made of, and certain technological features of the $p^+\text{-}n$ junction formation processes.

The impact of the latter can be detailed by comparing it with the parameters of similar epitaxial $p^+\text{-}n$ structures with the same $n\text{-Si}$ type formed by standard gas epitaxy technologies. Fast-recovery samples created from these structures have a τ_{tr} value of 0.9—1.0 μs . This means that they have better frequency parameters compared to the silicon samples with a higher bulk resistance, but are inferior to the samples created by the sheet thermomigration technology. A feature of the DLTS of such diode samples made of more highly doped silicon is a higher recombination centers concentration. This proves that some improvement of the τ_{tr} parameter in the tested samples occurs due to the formation of recombination centers in the process of performing sheet TM.

Let us consider what can cause the formation and increase in the concentration of RCs. When the Al+Si melt fills the capillary gap between the semiconductor wafers, there begins the process of dissolution of Si atoms in the melt, including on the surface of the relief layer of the $n\text{-Si}$ wafer. On the surface, in places where Si atoms are extracted, vacancies are formed. These vacancies are partially filled with atoms, mostly silicon and aluminum, partially diffuse into the volume of the basic

regions of the structures, and all the while they interact, forming divacancies, among other things. Also formed are the connections with various defects, including Si crystal growth defects. Such RCs as divacancies, which are created during local or sheet TM processes, can be considered high-temperature defects. The concentration of such RCs in the samples obtained by sheet TM is significantly greater due to the fact that the surface area of vacancy formation in sheet TM is $2 \cdot 10^4$ greater than in local TM. Another feature of sheet TM is the absence of compressive mechanical stresses at the boundary, which are characteristic of local TM. On the contrary, since the wafer compositions cool down with the melt in their volume, just at the stage of formation of the said RCs, the process is accompanied by the formation and influence of tensile stresses. This feature also causes an increase in mobility, an increase in the concentration of vacancies that diffuse into the volume of the base. The combined effect of these factors may increase the RC concentration, and thus provide a notable improvement in the frequency properties of the devices.

At the same time when the vacancies form and diffuse, the Al atoms are introduced into the n -Si surface layers and their diffusion takes place. During the thermomigration process and subsequent high-temperature operations, along with aluminum atoms, boron atoms also diffuse. Thus, p^+ -Si regions and a high-voltage p - n junction of emitters and lateral insulation are formed in the n -Si region. In our experiment, these areas had a thickness of about 15—20 μm at the end of the TM process. The presence of the layers with compressive stresses and defects at the border of the structure created by local TM [2, 8] and their absence in the case of sheet TM leads to differences in the current-current characteristics and breakdown voltages of the corresponding structures. With sheet TM, these characteristics are optimal without additional annealing. The initial RC concentration provides a τ_{rr} value of 1.5 μs . New RCs, which are formed in the process of irradiation with high-energy electrons and annealing at temperatures of 400—450°C, are added to the initial RCs, which are created during sheet TM at a temperature of 1150°C. At the same time, the total RC concentration increases. Such an increase in the RC concentration causes the resulting, so far most optimal, decrease in τ_{rr} from 1.5 μs to $\tau_{rr}^* \leq 0.5 \mu\text{s}$. It is possible that the further development of technological processes of sheet TM will allow improving both τ_{rr} and τ_{rr}^* of fast-recovery and frequency devices even more.

The low mechanical stress level, the high structural quality of the formed p - n junctions, the improved frequency properties make the sheet TM process, including if used on relief surfaces, very promising for application in the manufacturing of both PSDs and other semiconductor devices.

Conclusions

The technology of sheet Al TM with a three-dimensional liquid zone developed in the course of this study is designed to form high-quality highly doped epitaxial layers of p^+ -Si* emitters and lateral insulation on a significantly large, 100 μm or more, n -Si wafer surface with the possibility of forming devices with a thinner n -Si base layer. Structures with a thin base layer created using this technology have better parameters of the direct current drop U_F and the recovery time of the reverse resistance τ_{rr} . D106 diodes created according to the developed technology at a breakdown voltage of 1000 V have a reduced voltage drop of 1.17 V in the exposed state at a current density of 2.0 A/mm², and a reverse recovery time of 1.5 μs . Using the structures obtained by the sheet TM method to form fast-recovery and high-frequency PSDs by irradiation with high-energy electrons and low-temperature annealing allows producing devices with improved parameters, including with τ_{rr}^* at the level of 0.5 μs and less. The option of different thicknesses of the Al+Si liquid zone of the sheet thermomigration process is given by the topological microrelief of the grooves on the crystal surface, and the property of the prevailing speed of movement of the zone with a greater thickness in the region of the depressions of the microrelief implements the option of epitaxial overgrowth of depressions and alignment of the relief of the epitaxial surface, which is necessary in many cases when implementing designs of semiconductor devices.

REFERENCES

1. Lozovsky V. N., Lunin L. S., Popov V. P. *Zonnaya perekristallizatsiya gradiyentom temperatury poluprovodnikovykh materialov* [Temperature-Gradient Zone Recrystallization of Semiconductor Materials]. Moscow, Metallurgiya, 1987, 232 p. (Rus)
2. Kravchyna V. V. Polukhin O. S. [Thermomigration for technology of powerful semiconductor appliances]. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2018, no. 3, pp. 16–24. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2018-3-2> (Ukr)
3. Seredyn B.M., Balyuk A.V. Formation of flat zones during liquid-phase epitaxy in the field of a temperature gradient. *Crystallization and properties of crystals. Issue: Interuniversity collection of scientific papers of the Platov Polytechnic Institute*, 1989, pp. 119–126. (Rus)
4. Lozovsky V.N., Popov V.P., Darovsky N.Y. [Investigation of the possibility of obtaining p-n junctions free from surface breakdown by the TGZM method]. *Crystallization and properties of crystals. Issue: Interuniversity collection of scientific papers of the Platov Polytechnic Institute*, 1970, vol. 208, 67 p. (Rus)
5. Polukhin O.S., Semenov O.S. [Method of manufacturing silicon epitaxial matrix structures with peripheral isolating walls] *Pat. UA, no 41209 A*, 2001, bull. 7. (Ukr)
6. Gorban O.N., Kravchyna V.V. Features of the formation of complementary transistors for IC with dielectric isolation. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2013, iss. 1, pp. 30–35. <http://periodicals.zntu.edu.ua/index.php/1607-3274/article/view/14732> (Ukr)
7. Grekhov I.V., Kostyna L.S., Argunova T.S. et al. [Direct splicing of silicon wafers with simultaneous formation of diffusion layers]. *Journal of Technical Physics*, 2001, vol. 71, iss. 6, pp. 45–51. (Rus)

8. Polukhin O.S., Kravchina V.V. Thermomigration of non-oriented aluminium-rich liquid zones through (110) silicon wafers. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2021, №5–6, pp. 33–40. <https://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.5-6.33> (Ukr)
9. Popov V.P., Seredin B.M., Zaichenko A.N., Seredina P.B. Influence of gallium and tin on the process of thermomigration of liquid zones based on aluminum in silicon. *Bulletin of the North Caucasian Federal University*, 2017, iss. 5 (62), pp. 39–45. <https://vestnikskfu.elpub.ru/jour/article/view/915> (Rus)
10. Kuznetsov V.V., Lozovskii V.N., Seredin B.M. et al. Thermomigration kinetics in the Si–Al–Ga and Si–Al–Sn systems. *Inorganic Materials*, 2018, vol. 54, no. 1, pp. 32–36. <https://doi.org/10.7868/S0002337X18010062> (Rus)
11. Lomov A.A., Seredyn B.M., Martyushov S.Yu. et al. Shulpina structural perfection and composition of gallium-doped thermomigration silicon layers. *Pisma v ZhTF*, 2020, vol. 46, iss. 6, pp. 27–30. <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/49161> (Rus)
12. Bin Lu, Gautier G., Valente D., Morillon B. Etching optimization of post aluminum-silicon thermomigration process residues. *Microelectronic Engineering*, 2016, vol. 149, pp. 97–105. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2015.10.004> (Rus)
13. Morillon B., Dilhac J.-M., Auriel G. et al. Realization of a SCR on an epitaxial substrate using Al thermomigration. *32nd European*

- Solid-State Device Research Conference*, 2002, Firenze, Italy, pp. 327–330. <https://dx.doi.org/10.1109/ESSDERC.2002.194935>
14. Morillon B. Etude de la thermomigration de l'aluminium dans le silicium pour la réalisation industrielle de murs d'isolation dans les composants de puissance bidirectionnels. *Rapport LAAS N 02460*, 2002.
15. Anthony T.R., Cline H.E. Stresses generated by the the thermomigration of liquid inclusions in silicon. *J. Appl. Phys.*, 1978, vol. 49, iss. 12, pp. 5774–5782. <https://doi.org/10.1063/1.324581>
16. Gershanov V.Yu., Garmashov S.I. *Nonlinear nonstationary effects in mass transfer processes*. Rostov-on-Don, YuFU ed. 2014, 114 p. <https://sfedu.ru/files/upload/per/57837/publ.html> (Rus)
17. Lozovsky V.N., Seredyn B.M., Polukhin O.S. et al. [Equipment for the production of silicon structures by thermomigration]. *Electronic equipment. Series 2: Semiconductors*, 2015, no. 5, pp. 65–76. (Rus)
18. Gorban A. N., Kravchina V. V., Gomolsky D. M., Solodovnic A. I. Specifics of the formed fast cover silica diodes. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2008, no. 3, pp. 36–40. http://www.tkea.com.ua/tkea/2008/3_2008/st_09.htm (Rus)

Received 08.02 2023 p.

DOI: 10.15222/TKEA2023.1-2.34
УДК 621.315.592

О. С. ПОЛУХИН¹, В. В. КРАВЧИНА²

Україна, Запоріжжя, ТОВ «Елемент-Перетворювач»;
Миколаїв, Миколаївський політехнічний фаховий коледж
E-mail: kravchina_vv@ukr.net

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЛИСТОВОЇ ТЕРМОМІГРАЦІЇ ТРИРОЗМІРНОЇ РІДКОЇ ЗОНИ AL+SI ДЛЯ ФОРМУВАННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СИЛОВИХ ПРИЛАДІВ

В роботі розглядається технологія листової термоміграції (ТМ) тривимірних зон, яка реалізує рідинну епітаксію p^+-Si^* на рельєфі $n-Si$, при виготовленні силових напівпровідникових приладів, кристали яких мають потонішені шари високоомної бази $n-Si$, що по периметру оточені областями p^+-Si^* бокової ізоляції, та потовщені шари p^+-Si^* емітеру. Тривимірні зони формуються капілярним втягуванням розплаву $Al+Si$ в зазор між пластинами p^+-Si та $n-Si$ та в зазор канавок глибиною 120 мкм та шириною 40 мкм, які сформовані в пластині $n-Si$. Процес ТМ створює шари p^+-Si^* , які в канавках є областями бокової ізоляції, а у плоскій частині $n-Si$ — емітером. За такою технологією, яка має ряд переваг, створено діодні матриці в $n-Si$ з питомим опором 20 Ом·см. Для рекристалізації використовували пластини p^+-Si з питомим опором 0,005 Ом·см. Виготовлені діоди прямої полярності мали напругу пробного на рівні 1000 В, напругу падіння прямої напруги 1,17 В при щільності струму 2,0 А/мм² і час відновлювання зворотного опору $\tau_{rr}=1,5$ мкс. Додаткове застосування технології створення рекомбінаційних центрів дозволило поліпшити τ_{rr} — до 0,5 мкс.

Опція різновисхідності рідкої зони $Al+Si$ процесу листової термоміграції задається топологічним мікрорельєфом поверхні кристалу, а властивість переважної швидкості руху зони з більшою товщиною в області впадин мікрорельєфу реалізує опцію епітаксialного зарощування впадин і вирівнювання рельєфу епітаксialної поверхні, що є необхідним в багатьох випадках при реалізації конструкції напівпровідникових приладів.

Ключові слова: $Al+Si$ розплав, діод, листовая термоміграція, тривимірні зони.

Опис статті для цитування:

Полухін О. С., Кравчина В. В. Особливості застосування листової термоміграції трирозмірної рідкої зони $Al+Si$ для формування напівпровідникових силових приладів. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*, 2023, № 1–2, с. 34–42. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2023.1-2.34>

Cite the article as:

Polukhin O. S., Kravchina V. V. Aspects of using of sheet thermomigration of the $Al+Si$ three-dimensional liquid zone to form semiconductor power devices. *Technology and design in electronic equipment*, 2023, no. 1–2, pp. 34–42. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2023.1-2.34>

К. т. н. В. М. ЛИТВИНЕНКО¹, к. т. н. С. В. ШУТОВ²

Україна, ¹Херсонський державний аграрно-економічний університет,
²м. Київ, Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України
 E-mail: hersonlvn@gmail.com

ПОЛІПШЕННЯ ЗВОРОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КРЕМНІЄВОГО ВАРИКАПА ЗА ДОПОМОГОЮ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОГО ГЕТЕРУВАННЯ

Розглянуто причини та механізми деградації зворотних характеристик варикапа в процесі формування омичного контакту на основі нікелю. Досліджено вплив низькотемпературного гетерувального відпалу варикапних структур після формування омичного контакту на основі нікелю на рівень зворотного струму варикапів, а також проаналізовано можливі механізми цього впливу. Показано ефективність запропонованої технології з використанням гетерування щодо зниження рівня зворотних струмів і підвищення виходу придатних приладів.

Ключові слова: нікель, омичний контакт, гетерування, варикап, структурні дефекти, зворотний струм.

Варикапи широко використовуються в радіоелектроніці як змінна ємність, величина якої управляється напругою [1 — 5]. Слабким місцем в технологічному маршруті виготовлення варикапів є процеси формування омичних контактів. Для одержання омичних контактів до варикапних структур зазвичай використовується нікель або алюміній. На відміну від алюмінію, нікель добре змочується припоем і дозволяє приєднувати провідники пайкою, утворює з кремнієм силіциди, стабільні в широкому діапазоні температури, допускає електролітичне формування локальних контактів. Ці переваги дозволяють застосовувати простіші методи складання напівпровідникових приладів, виключити з технологічного процесу операції фотолітографії з металізації, підвищуючи таким чином ефективність виробництва приладів і знижуючи їхню собівартість [6, 7]. З іншого боку, використання нікелю для виготовлення омичного контакту викликає проблеми, пов'язані з деградацією зворотної гілки вольт-амперних характеристик (ВАХ) приладів в процесі формування контакту. Дослідження показали, що основною причиною високого рівня зворотних струмів діодів є структурні дефекти та домішки важких металів в активних областях діодів [8, 9]. Для запобігання утворенню структурних дефектів в кремнії та зменшенню щільності вже утворених дефектів застосовуються різноманітні методи гетерування [10 — 13].

Як показала практика, ні оптимізація режимів формування p^+ -області, ні використання операцій гетерування на початкових стадіях виготовлення варикапа не дозволяють повністю позбутися структурних дефектів і збільшити в результаті відсоток виходу придатних діодів. Майже завжди понад 10% ді-

одних структур мають збільшений рівень зворотних струмів.

Метою цієї роботи було дослідження причини деградації зворотних характеристик варикапа в процесі формування омичного контакту на основі нікелю, а також можливості застосування низькотемпературного гетерування для поліпшення його зворотних характеристик та підвищення відсотка виходу придатних приладів.

Експериментальні зразки

Досліджувані діодні структури виготовлялися за стандартною планарно-епітаксійною технологією [14] на легованих фосфором кремнієвих епітаксійних структурах n -типу провідності з питомим опором $2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ товщиною 11 мкм, вирощених на орієнтованій в кристалографічному напрямку (111) кремнієвій підкладці.

Для виготовлення варикапних структур проводилися такі основні технологічні операції:

- термічне окислення пластин в парах води за температури $T = 1050^\circ\text{C}$ із подальшим відпалом в середовищі аргону за температури процесу окислення;
- (I) фотолітографія для відкривання вікон у шарі діоксиду кремнію під дифузію бору;
- (I) загонка бору методом відкритої труби з джерела домішки B_2O_3 за температури 1100°C протягом 30 хв у суміші аргону (60 л/год) і сухого кисню (2,5 л/год);
- видалення боросилікатного скла в розчині плавикової кислоти;
- розгонка бору за температури 1150°C з подальшим чергуванням циклів: розгонка в середовищі сухого кисню (30 хв) $\rightarrow$ розгонка в середовищі воло-

ного кисню (4 год) → розгонка в середовищі сухого кисню (30 хв);

- (II) фотолітографія для відкривання вікон у шарі діоксиду кремнію для проведення загонки бору;
- (II) загонка бору за температури 1050°C протягом 20 хв у суміші аргону (90 л/год) і кисню (4 л/год);
- видалення шару боросилікатного скла з використанням розчину плавикової кислоти;
- шліфування тильної сторони пластин до товщини 180—220 мкм;
- формування омичних контактів: хімічне осадження Ni з двох боків пластини з подальшим відпадом плівки нікелю за температури 700°C у середовищі аргону (200 л/год) протягом 20 хв (в процесі відпаду в результаті взаємодії Ni з Si утворюється силіцид нікелю NiSi). Товщина осажденої плівки нікелю складає приблизно 1 мкм.

Примітка. II загонка бору є гетерувальним технологічним процесом, що проводиться з метою ліквідації структурних дефектів типу окислювальних дефектів упаковки (ОДУ) в активних областях варикапних структур. Застосування цього методу гетерування в технології варикапів з омичним контактом на основі нікелю докладно розглянуто в [15].

У результаті була отримана структура варикапа, наведена на **рис. 1**.

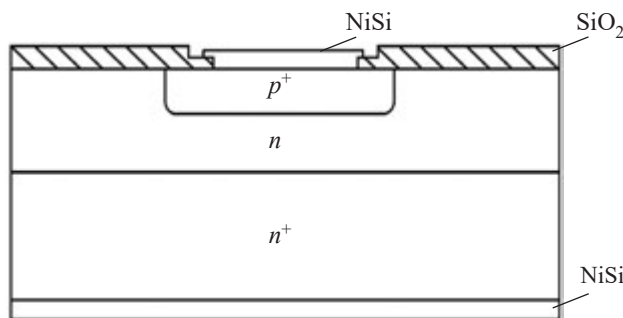


Рис. 1. Структура варикапа, виготовленого за базовою технологією

Для з'ясування причин низького відсотка виходу придатних варикапів були проведені металографічні дослідження. Для виявлення структурних дефектів використовувався травник Сіртла. Вид структурних дефектів і їх щільність оцінювалися за допомогою металографічного мікроскопа МЕТАМ-1 (**рис. 2**). На пластинках після проведення технологічної операції «розгонка бору» були виявлені окислювальні дефек-

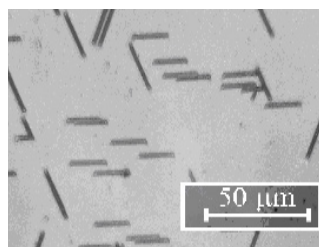


Рис. 2. Мікрофотографія поверхні епітаксійної структури після термічного окислення та селективного травлення

ти упаковки щільністю до $5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$, при цьому час травлення структур у травнику Сіртла складав 15 с.

Вибір технології гетерування

Для запобігання утворенню та для ліквідації структурних дефектів у структурах кремнієвих діодів зазвичай застосовують гетерування — цей технологічний процес широко використовується у сучасному виробництві напівпровідникових приладів та інтегральних схем, які виготовляються на основі кремнію. Щоб досягти високої ефективності гетерування дефектів, необхідно забезпечити високу рухливість точкових дефектів в напівпровідниковому матеріалі. У зв'язку з цим будь-який метод гетерування містить термообробку, температура і тривалість якої мають бути достатніми для дифузії домішок з областей формування приладів до області гетера. Гетерування дозволяє накопичувати небажані домішки в неробочих ділянках пластин і повністю очистити активні області від структурних дефектів або значно зменшити їх щільність [16, 17]. Існують різні методи гетерування, які відрізняються за місцем розміщення гетера, гетерувальною фазою та способом створення гетера.

Можна виділити п'ять основних механізмів взаємодії точкових дефектів, завдяки яким відбувається гетерування [16]:

- взаємодія точкових дефектів з полем пружних напружень;
- електрична взаємодія точкових дефектів між собою;
- поглинання домішкових точкових дефектів рідкою або рідиноподібною фазою;
- виділення власних і домішкових дефектів до вакууму або до газової фази;
- адсорбція дефектів на розвиненій поверхні твердого тіла.

У зв'язку з тим, що гетерування дефектів зазвичай пов'язане з декількома механізмами, класифікацію методів гетерування доцільно провести не за механізмом, а за технологією його здійснення [18]:

- нанесення гетерувального шару на поверхню пластини;
- утворення шару напівпровідникового матеріалу з порушеною кристалічною структурою;
- проведення термічної обробки пластин в спеціальному середовищі.

Ефективне гетерування домішок можна здійснити шляхом нанесення на поверхню кремнієвих пластин шару порушеного кремнію [18] або плівки скла: фосфо-, боро-, свинцево-силікатного, халькогенідного [8, 19]. В цьому випадку гетерування небажаних домішок обумовлено їхньою підвищеною розчинністю в шарі скла.

Широко використовуваним є також метод гетерування за допомогою порушеного шару, заснований на тому, що області порушень кристалічної структури стають стоками для точкових дефектів — вакан-

сій і атомів швидкодифундуючих домішок металів. Зазвичай порушений шар створюється на неробочій стороні пластини, і для цього може використовуватись шліфування [8, 18], ударно-акустична обробка [16, 18], лазерне випромінювання [20—22], ультразвуковий удар [8], дифузійне легування [23, 24], іонна імплантація [17, 25]. Високотемпературний відпал кремнієвих пластин перед термічним окисленням дає можливість зменшити щільність ОДУ, які утворюються в процесі окислювання [8]. Під час післяокислювального високотемпературного відпалу пластин відбувається зменшення щільності ОДУ, розташованих поблизу поверхні [18]. Поширеним способом гетерування у виробництві напівпровідникових приладів є відпал пластин у газовому середовищі, що містить хлор [8, 18]. Дослідження механізму гетерування цим методом показало, що поліпшення параметрів приладів пов'язане з нейтралізацією небажаного впливу домішок металів, які або видаляються з поверхні кремнієвих пластин у вигляді летких сполук, або перетворюються в нейтральні комплекси. Очищення приповерхневої області кремнієвих пластин від небажаних домішок забезпечується використанням методу внутрішнього гетерування [17, 18], заснованому на використанні кисню, що зазвичай присутній у кремнії. В процесі довготривалого відпалу пластин починається виділення кисню на внутрішній частині пластини у вигляді преципітатів складу SiO_x . Навколо них існують механічні напружки, що призводять до утворення дислокацій та інших дефектів, які є ефективними центрами гетерування.

В процесі виготовлення досліджуваного варикапа за базовою технологією для усунення ОДУ застосовується гетерування шляхом додаткової дифузії бору в робочу сторону пластини після розгонки бору (технологічна операція: «(II) загонка бору») [15]. Проведені перед формуванням омичних контактів металографічні дослідження на варикапних структурах, виготовлених із застосуванням додаткової дифузії бору, показали відсутність в них окислювальних дефектів упакування (рис. 3). Слід зазначити, що використання додаткової дифузії бору дало можливість підвищити вихід придатних діодних структур на 10—15%.

Але, як показали дослідження, на вихід придатних діодних структур, навіть за відсутності ОДУ, негативно впливає процес формування нікелевого омичного контакту — цей показник знижується на операції контролю варикапних структур за зворотним

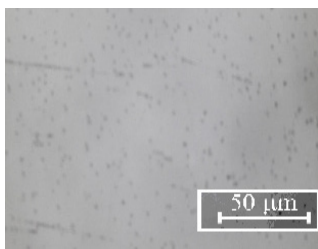


Рис. 3. Поверхня варикапної структури, виготовленої з використанням гетерування, після розгонки бору

струмом. Для підтвердження припущення, що збільшення рівня зворотних струмів пов'язане з нікелем, на відбракованих за зворотним струмом варикапних структурах було проведено дослідження енергетичного спектра носіїв заряду методом DLTS [26]. Воно показало наявність у забороненій зоні кремнію глибоких центрів, які відповідають нікелю.

Вплив процесу формування нікелевого омичного контакту на рівень зворотних струмів варикапу в умовах відсутності ОДУ, вочевидь, можна представити таким чином. Відомо [7, 27], що під час термічного відпалу кремнієвих пластин з плівкою нікелю утворюються силіциди. В загальному випадку, залежно від температури відпалу, мають місце послідовні стадії зростання трьох фаз силіцидів: Ni_2Si , NiSi , NiSi_2 . Процес відпалу плівки нікелю та зростання шару силіциду нікелю супроводжуються відривом атомів кремнію від поверхні та генерацією вакансій на межі розділу «кремній — силіцид». Через це в процесі відпалу плівки нікелю ($T=700^\circ\text{C}$) і зростання шару силіциду нікелю на межі розділу «кремній — силіцид» підтримується висока концентрація вакансій. Не всі атоми нікелю можуть бути залучені до утворення силіциду нікелю NiSi , що є кінцевою фазою відпалу плівки нікелю в атмосфері аргону у діапазоні температури $350—750^\circ\text{C}$ [27]. Значна кількість надлишкових атомів нікелю, які не були залучені до утворення NiSi , з урахуванням високої концентрації вакансій, знаходяться у вузлах кристалічної структури кремнію біля межі розділу $\text{Si}—\text{NiSi}$. Поява надлишкових атомів нікелю та рівень їх концентрації можуть залежати від концентрації точкових дефектів (типу дефектів за Френкелем) під осажденою плівкою нікелю, механічних напружень на межі $\text{Si}—\text{NiSi}$, флуктуації товщини осажденої плівки нікелю по поверхні пластини та між окремими процесами осадження плівки нікелю тощо. В процесі зростання шару силіциду нікелю надлишкові атоми нікелю переходять із вузлів кристалічної решітки кремнію до міжвузлів і по них дифундують в область об'ємного заряду p^+-n -переходу, де завдяки високій концентрації вакансій знову переходять до вузлів кристалічної решітки кремнію і стають електрично активними. Вплив нікелю на зворотний струм $p-n$ -переходу пов'язаний з утворенням ним в забороненій зоні кремнію двох акцепторних рівнів, які викликають додаткову генерацію носіїв струму в області об'ємного заряду $p-n$ -переходу [28].

Для розв'язання проблеми деградації зворотних характеристик варикапа в процесі формування омичного контакту на основі нікелю були випробувані декілька методів низькотемпературного гетерування дефектів (високотемпературний відпал застосувати в нашому випадку не можна через деградацію деяких параметрів варикапа, порушення структури омичного контакту тощо). За результатами експериментальних

досліджень для гетерування було запропоновано після формування омичного контакту проводити додатковий відпал пластин за температури $T = 250\text{—}350^\circ\text{C}$ протягом 20—60 хв в атмосфері аргону. При цьому готовим «власним гетером» є межа розділу Si — NiSi.

Дослідження ефективності технології гетерування

Для випробування запропонованої технології виготовлення структур варикапа були сформовані дослідні партії пластин, кожна з яких ділилася на дві частини: одна була виготовлена за базовою технологією, інша — за розробленою технологією з використанням низькотемпературного гетерування. Додатковий відпал пластин після закінчення формування нікелевого омичного контакту проводився за температури 300°C протягом 40 хв у атмосфері аргону (150 л/год).

Ефективність використання низькотемпературного відпалу оцінювалася за відсотком виходу придатних діодних структур за контролем зворотного струму ($I_{\text{зв}}$). Критерій придатності: $I_{\text{зв}} \leq 0,5$ мкА при зворотній напрузі 35 В.

У таблиці наведено результати розбраковки за зворотним струмом діодних структур, виготовлених за базовою та розробленою технологіями. Тут видно, що використання запропонованої технології підвищує вихід придатних діодних структур у середньому на 7,2%. При цьому, як видно з рис. 4, рівень зворотних струмів таких структур від 2 до 7 разів нижчий в порівнянні з діодними структурами, виготовленими за базовою технологією.

Вихід придатних діодних структур, виготовлених за базовою та розробленою технологією, за значенням зворотного струму

Технологія виготовлення	№ партії	Вихід придатних, %
Базова (без гетерування)	1-а	83,7
	2-а	85,3
	3-а	86,8
Розроблена (з відпалом в атмосфері Ar за $T = 300^\circ\text{C}$ протягом 40 хв)	1-б	92,4
	2-б	91,7
	3-б	93,5

Зворотні ВАХ досліджуваних варикапних структур, виготовлених з використанням гетерування (крива 2 на рис. 4), є типовою для кремнієвого діода, в активних областях якого відсутні структурні дефекти та небажані домішки. І навпаки, варикапна структура, виготовлена за базовою технологією, має так звану «м'яку» ВАХ (крива 1), вигляд якої може вказувати на наявність в активних областях варикапа домішок важких металів.

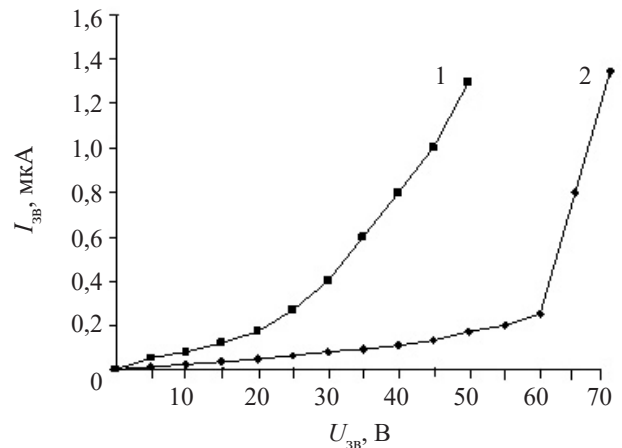


Рис. 4. Типові зворотні ВАХ варикапних структур, виготовлених за базовою технологією (1) та з використанням гетерування (2)

Вплив на параметри варикапа запропоновано-го додаткового відпалу варикапних структур після формування нікелевого омичного контакту, вочевидь, можна пояснити таким чином. Додатковий відпал проводиться після завершення формування силіциду нікелю, тому не супроводжується додатковою генерацією вакансій. За порівняно низької температури відпалу (300°C) суттєво знижується гранична розчинність міжвузлових атомів нікелю та рівноважна концентрація вакансій в p^+ -області варикапів. Межа розділу Si — NiSi слугує стоком (гетером) для атомів нікелю, і надлишкові атоми Ni переходять з вузлів до міжвузлів і по них дифундують до області гетера, покидаючи таким чином область об'ємного заряду p^+ - n -переходу (тут треба враховувати, що коефіцієнт дифузії нікелю в кремнії на декілька порядків вищий, ніж атомів легувальних домішок, таких як бор і фосфор).

Висновки

Спираючись на проведені експериментальні дослідження, можна зробити припущення, що за відсутності в активних областях варикапа структурних дефектів типу окислювальних дефектів упаковки деградація зворотних характеристик варикапних структур в процесі формування омичного контакту на основі нікелю пов'язана з проникненням до області об'ємного заряду p^+ - n -переходу атомів Ni, що не були залучені до утворення силіциду нікелю. Застосування розробленої технології виготовлення структур варикапів з використанням низькотемпературного відпалу в атмосфері аргону після формування омичного контакту на основі нікелю дозволяє вивести з області об'ємного заряду p^+ - n -переходу атоми Ni, у результаті чого знижується рівень зворотних струмів діодів і, як наслідок, підвищується відсоток виходу придатних приладів.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Тимошенко С. П., Бойко А. Н., Гаев Д. С., Калмыков Р. М. Интегральный варикап повышенной емкости на основе пористого кремния. *Известия вузов. Электроника*, 2017, т. 22, №1, с. 15–19.
2. Викулин И.М., Стафеев В.И. *Физика полупроводниковых приборов*. Москва, Радио и связь, 1990, 264 с.
3. Ирха В.И. Флуктуационные процессы в варикапах. *Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова*, 2016, № 1, с. 15–21.
4. Савченко М.П., Старовойтова О.В. Цепь отрицательной обратной связи по шумам для автогенератора с варикапами. *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Физико-математические и технические науки*, 2016, №2, с. 66–69.
5. Спиридонов А.Б., Лицоев С.В., Петручук И.И. Разработка МДП-варикапа с переносом заряда в СВЧ-диапазоне. *Прикладная физика*, 2016, № 3, с. 75–80.
6. Курносов А. И., Юдин В. В. *Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем*. Москва, Высшая школа, 1986. 368 с.
7. Поут Дж., Ту К., Мейер Дж., Розенберг Р. *Тонкие пленки. Взаимная диффузия и реакции* / Под ред. Дж. Поута. Москва, Мир, 1982, 576 с.
8. Литвиненко В.Н., Богач Н.В. Дефекты и примеси в кремнии и методы их геттерирования. *Вісник ХНТУ*, 2017, т. 60, №1, с. 32–42.
9. Рейви К. *Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии*. Москва, Мир, 1984, 472 с.
10. Бахадирханов М.К., Исмаилов Б.К. Геттерирующие свойства кластеров атомов никеля в решетке кремния. *Приборы*, 2020, т. 240, № 6, с. 44–48.
11. Воробей Р.И., Гусев О.К., Тявловский К.Л. и др. Геттерирование эпитаксиальных структур редкоземельными элементами. *Труды 10-й Междунар. конф. «Приборостроение – 2017»*. РБ, Минск, 2017, с. 73–74.
12. Харченко В.А. Геттеры в кремнии. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*, 2018, т. 21, № 1, с. 5–17. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2018-1-5-17>
13. Литвиненко В.М., Богач М.В. Моделювання процесів гетерування швидкодіюючих діодів в технології діодів Шотткі. *Вісник ХНТУ*, 2019, т. 68, №1, с. 25–33.
14. Литвиненко В.М. *Фізика та технологія напівпровідникових діодів*. Херсон, ФОП Вишемирський В.С., 2018, 184 с.
15. Литвиненко В.М. Исследование влияния сезонных факторов на обратные токи кремниевых варикапов. *Вісник ХНТУ*, 2016, т. 56, № 1, с. 39–44.
16. Немцев Г.З. Пекарев А.И., Чистяков Ю.Д., Бурмистров А.Н. Геттерирование точечных дефектов в производстве полупроводниковых приборов. *Зарубежная электронная техника*, 1981, т. 245, вып. 311, с. 3–63.
17. Пилипенко В. А., Горушко В. А., Петлицкий А. Н. и др. Методы и механизмы геттерирования кремниевых структур в производстве интегральных микросхем. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2013, № 2–3, с. 43–57.
18. Лабунов В.А., Баранов И.Л., Бондаренко В.П., Дорофеев А.М. Современные методы геттерирования в технологии полупроводниковой электроники. *Зарубежная электронная техника*, № 11(270), 1983, с. 3–66.
19. Верховский Е.И. Методы геттерирования примесей в кремнии. *Обзоры по электронной технике. Сер. 2. Полупроводниковые приборы*, 1981, вып. 8(838), с. 1–48.
20. Бохан Ю.И., Каменков В.С., Толочко Н.К. Доминирующие факторы лазерного геттерирования кремниевых пластин. *Физика и техника полупроводников*, 2015, т. 49, вып. 2, с. 278–282.
21. Vikulin I.M., Litvinenko V.N., Shutov S.V. et al. Enhancing parameters of silicon varicaps using laser gettering. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*, 2018, no. 2, p. 29–32. <https://doi.org/10.15222/TKEA2018.2.29>
22. Пилипенко В.А., Вечер Д.В., Понарядов В.В. и др. Влияние лазерного геттерирования на структурные и электрические параметры эпитаксиальных слоев кремния. *Вестник БГУ. Сер. 1*, 2007, вып. 2, с. 39–42.
23. Litvinenko V. N., Vikulin I.M., Gorbachev V.E. Improvement of the reverse characteristics of Schottky diodes using gettering. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*, 2019, no. 1–2, p. 34–39. <https://doi.org/10.15222/TKEA2019.1-2.34>
24. Литвиненко В.М., Вікулін І.М. Вплив властивостей поверхні на зворотні характеристики напівпровідникових приладів. *Вісник ХНТУ*, 2018, т. 64, № 1, с. 46–56.
25. Litvinenko V. N., Baganov Ye. A., Vikulin I.M., Gorbachev V.E. Influence of gettering on aluminum ohmic contact formation. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*, 2020, no. 1–2, p. 45–50. <https://doi.org/10.15222/TKEA2020.1-2.45>
26. Воробьев Ю.В., Добровольский В.Н., Стриха В.И. *Методы исследования полупроводников*. Киев, Выща школа, 1988, 232 с.
27. Мьюрарка Ш. *Силициды для СБИС*. Москва, Мир, 1986, 176 с.
28. Милнс А. *Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках*. Москва, Мир, 1977, 562 с.

Дата надходження рукопису
до редакції 25.12 2022 р.

Опис статті для цитування:

Литвиненко В. М., Шутов С. В. Поліпшення зворотних характеристик кремнієвого варикапа за допомогою низькотемпературного гетерування. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*, 2023, № 1–2 с. 43–49. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2023.1-2.43>

Cite the article as:

Litvinenko V. N., Shutov S.V. Improvement of inverse characteristics of silicon varicap by using low-temperature gettering. *Technology and design in electronic equipment*, 2023, no. 1–2, pp. 43–49. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2023.1-2.43>

DOI: 10.15222/TKEA2021.3-4.43
UDC 621.382

V. M. LITVINENKO¹, S. V. SHUTOV²

Ukraine, ¹Kherson State Agrarian and Economic University;
²Kyiv, V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics NAS of Ukraine
E-mail: hersonlvn@gmail.com

IMPROVEMENT OF INVERSE CHARACTERISTICS OF SILICON VARICAP BY USING LOW-TEMPERATURE GETTERING

Varicaps are widely used in radio electronics as a variable capacitance, the value of which is controlled by voltage. However, it should be noted that the cost of varicaps remains relatively high due to a low yield of suitable devices. This is caused by high levels of reverse currents and low breakdown voltages of varicaps, which is determined by the significant dependence of the reverse characteristics of varicaps on the density of structural defects and heavy metal impurities in their active regions.

This study aimed to discover the causes and mechanisms of degradation of the reverse characteristics of varicaps with an ohmic contact based on nickel during annealing of a nickel film during the formation of an ohmic contact. Another goal was to determine the possibility of using gettering operations to prevent degradation of the reverse characteristics of varicaps and increase the yield of suitable devices.

The conducted experimental studies have shown that the reason for the degradation of the reverse characteristics of varicaps during the formation of a nickel-based ohmic contact is that, during the annealing of the nickel film, the excess nickel atoms not involved in the formation of NiSi silicide penetrate into the region of the space charge of the p-n junction.

The authors consider in detail the proposed technology for manufacturing nickel-based varicap structures with an ohmic contact using gettering of excess nickel atoms by carrying out additional low-temperature annealing of varicap structures using a ready-made “intrinsic getter” — the Si-NiSi interface.

It is shown that the developed technology for fabricating varicap structures using gettering makes it possible to clean the active regions of varicaps from nickel atoms, which ensures a significant decrease in the level of varicap reverse currents and an increase in the yield of suitable devices.

Keywords: nickel atoms, ohmic contact, gettering, varicap, structural defects, reverse current.

REFERENCES

1. Timoshenkov S. P., Boyko A. N., Gaev D. S., Kalmykov R. M. Integrated high-capacity varicap based on porous silicon. *Izvestiya vuzov. Elektronika*, 2017, vol. 22, no. 1, pp. 15–19. (Rus)
2. Vikulin I.M., Stafeyev V.I. *Fizika Poluprovodnikovyykh priborov* [Physics of Semiconductor Devices]. Moscow, Radio i Svyaz', 1990, 264 p. (Rus)
3. Irha V.I. Fluctuation processes in varicaps. *Proceedings of the O. S. Popov ONAT*, 2016, no. 1, pp. 15–21. (Ukr)
4. Savchenko M. P., Starovoitova O. V. Negative feedback circuit by noise for an autogenerator with varicaps. *Vestnik Baltiiskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta. Ser.: Fiziko-matematicheskie i tekhnicheskoe nauki*, 2016, no. 2, pp. 66–69. (Rus)
5. Spiridonov A.B., Lytsoev S.V., Petrichuk I.Y. Development of MDP-varicap with charge transfer in the microwave range. *Applied Physics*, 2016, no. 3, p. 75–80. (Rus)
6. Kurnosov A. I., Yudin V. V. *Tekhnologiya proizvodstva poluprovodnikovyykh priborov i integral'nykh mikroskhem* [Fabrication technology of semiconductor devices and integrated circuits]. Moscow, Vysshaya Shkola, 1986, 368 p. (Rus)
7. Pout Dzh., Tu K., Meyyer Dzh., Rozenberg R. *Tonkiye plenki. Vzaimnaya diffuziya i reaktsii* [Thin films. Mutual diffusion and reactions] / Ed by Dzh. Pouta. Moscow, Mir, 1982, 576 p. (Rus)
8. Litvinenko V. N., Bohach N. V. Defects and impurities in silicon and methods for their gettering. *Visnyk of KhNTU*, 2017, vol. 60, iss. 1, pp. 32–42. (Rus)
9. Ravi K.V. *Imperfections and Impurities in Semiconductor Silicon*. John Wiley & Sons, New York, 1981, 379 p.
10. Bakhadirhanov M.K., Ismailov B.K. Gettering properties of clusters of nickel atoms in the silicon lattice. *Devices*, 2020. vol. 240, iss. 6, pp. 44–48. (Rus)
11. Vorobey R.Y., Gusev O.K., Tyavlovsky K.L., Shadurskaya L.I., Rusakevich D.A. Getterization of epitaxial structures with rare earth elements. *10th International Conference “Pryborostroenie-2017”. Section 1. Measuring systems and devices, technical safety means*. Minsk, 2017, pp. 73–74. (Rus)
12. Kharchenko V.A. The getters in silicon. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Materials of Electronics Engineering*, 2018, vol. 21, iss. 1, pp. 5–17. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2018-1-5-17> (Rus)
13. Litvinenko V. M., Bohach M. V. Modeling of heterization processes of fast-diffusing impurities in Schottky diode technology. *Visnyk of KhNTU*, 2019, vol. 68, no. 1, pp. 25–33. (Ukr)
14. Litvinenko V.M. *Fizyka ta tekhnolohiya napivprovodnikovyykh diodiv* [Physics and Technology of Semiconductor Diodes]. Kherson, Vyshemirsky V.S., 2018, 184 p. (Ukr)
15. Litvinenko V.M. Investigation of the influence of seasonal factors on reverse currents of silicon varicaps. *Visnyk of KhNTU*, 2016, vol. 56, iss. 1, pp. 39–44. (Rus)
16. Nemtsev G.Z., Pekarev A.I., Chistyakov Yu.D., Burmistrov A.N. Gettering of point defects in semiconductor device manufacturing. *Foreign Electronic Technology*, 1981, vol. 245, iss. 311, pp. 3–63. (Rus)
17. Pilipenko V.A., Gorushko V.A., Petlitskiy A. N. et al. Methods and mechanisms of gettering of silicon structures in the production

of integrated circuits. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2013, no. 2–3, pp. 43–57. (Rus).

18. Labunov V.A., Baranov I.L., Bondarenko V.P., Dorofeev A.M. Modern methods of gettering in semiconductor electronics technology. *Foreign electronic technology*, 1983, no. 11(270), pp. 3–66. (Rus)

19. Verkhovsky E.I. Methods for gettering impurities in silicon. *Reviews on Electronic Technology. Ser. 2. Semiconductor Devices*, 1981, iss. 8 (838), pp. 1–48. (Rus)

20. Bokhan Yu.I., Kamenkov V.S., Tolochko N.K. Dominant factors of laser gettering of silicon wafers. *Semiconductors Physics and Technology*, 2015. vol. 49, iss. 2, pp. 278–282. (Rus)

21. Vikulin I.M., Litvinenko V.N., Shutov S.V. et al. Enhancing parameters of silicon varicaps using laser gettering. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2018, no. 2, pp. 29–32. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.2.29>

22. Pilipenko V.A., Vecher D.V., Ponaryadov V.V. et al. Influence of laser gettering on the structural and electrical parameters of epitaxial silicon layers. *Vestnik of BSU. Ser. 1*, 2007, iss. 2, pp. 39–42. (Rus)

23. Litvinenko V. N., Vikulin I.M., Gorbachev V.E. Improvement of the reverse characteristics of Schottky diodes using gettering. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2019, no. 1–2, pp. 34–39. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.1-2.34>

24. Litvinenko V.M., Vikulin I.M. Influence of surface properties on reverse characteristics of semiconductor devices. *Visnyk of KhNTU*, 2018, vol. 64, no. 1, pp. 46–56. (Ukr)

25. Litvinenko V. N., Baganov Ye. A., Vikulin I.M., Gorbachev V.E. Influence of gettering on aluminum ohmic contact formation. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2020, no. 1–2, pp. 45–50. <https://doi.org/10.15222/TKEA2020.1-2.45>

26. Vorobyev Yu.V., Dobrovolskyi V.N., Strykha V.Y. *Metody issledovaniya poluprovodnikov* [Semiconductor research methods]. Kyiv, Vyshcha Shkola, 1988, 232 p. (Rus)

27. Murarka S.P. *Silicides for VLSI Applications*. Academic Press, 1983, 200 p.

28. Milnes A. G. *Deep Impurities in Semiconductors*. John Wiley & Sons, New York, 1973, 526 p.

НОВІ КНИГИ

НОВІ КНИГИ

Заячук Д. М. Нанотехнології в медицині та біології. — Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2022.

Викладено основи нанотехнологій в їх застосуванні до потреб медицини й біології: основні поняття наномедицини; візуалізація нанооб'єктів біологічного походження; адресне доставлення ліків та системи її реалізації; питання наноносіїв для транспорту ліків, засобів їх адресації та наведення на мішень; сучасні матеріали для наномедицини: ліпосоми, дендримери, наноструктури карбону — фулереми та нанотрубки, металеві нанооболонки та металовмісні наночастинки, напівпровідникові квантові точки; лабораторії на чипі, їхні переваги та сфери застосування; розглянуто потенційні ризики, які може створювати використання нанотехнологій в медицині. Для студентів, аспірантів та молодих вчених.



К. т. н. В. А. ЗАВАДСЬКИЙ¹, к. т. н. Р. Ю. ХАРЧЕНКО¹, к. т. н. С. М. ДРАНЧУК²,
к. ф-м. н. В. І. ЦАЦКО², Т. О. ГАУР²

Україна, ¹Національний університет «Одеська морська академія»,

²Одеський національний морський університет

E-mail: vaaz@ukr.net

ПРИЛАД ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ СИГНАЛІВ КОНВЕЄРНИХ ВАГ ПРИ ЗАВАНТАЖЕННІ СУДНА СИПУЧИМИ МАТЕРІАЛАМИ

Розроблено пристрій та алгоритм його роботи, які направлені на поліпшення якості та підвищення точності вимірювання за допомогою конвеєрних ваг маси завантаженого на судно сипучого матеріалу. Пристрій дозволяє не тільки одночасно вимірювати поточну вагу сировини, що знаходиться на ваговій платформі, та швидкість пересування стрічки конвеєра, а й враховувати неоднорідність сипучого матеріалу та нерівномірність руху стрічки.

Ключові слова: конвеєрні ваги, точність вимірювання, алгоритм роботи, зважування, сипучий матеріал.

При завантаженні судна сипучими матеріалами найбільш ефективним є використання конвеєрних ваг, що дозволяють сумістити процес завантаження судна з вимірюванням ваги завантаженого матеріалу та проводити моніторинг цього процесу. Перевагою такого засобу є можливість швидкого завантаження та оперативне контролювання процесу завантаження. Сучасні економічні умови вимагають достатньо великої точності вимірювань ваги завантаженого на судно матеріалу (бажано нижче 0,5%) [1], але її досягнення пов'язано як з механічною конструкцією ваг, так і алгоритмом вимірювання [2].

У цій роботі розроблено пристрій та алгоритм його роботи, які дозволять підвищити точність визначення маси сипучого вантажу під час завантаження судна.

Постановка задачі

Зазвичай для вимірювання ваги вантажу в конвеєрну стрічку вбудовується вагова платформа, що розташовується на двох або чотирьох тензOMETричних датчиках, вихідний сигнал яких є аналоговим з вихідною напругою на рівні десятків мілівольт [3]. Оскільки конвеєрні ваги розміщують на пірсі, то отриману інформацію від тензOMETричних датчиків необхідно передавати до комп'ютера оператора, який може знаходитися за сотні метрів від місця завантаження. Це викликає ряд труднощів, пов'язаних з електромагнітними перешкодами та викривленням вихідного сигналу [4].

Для розв'язання цих проблем ефективним є використання блоку аналогового-частотного перетворення (БАЧП), що перетворює вихідний аналоговий сигнал датчика у частотний сигнал типу «мандра» [5]. Такий перетворювач розташовують по-

близу вимірювального датчика, а частотний сигнал, частота якого прямо пропорційна частоті вихідного сигналу датчика, передається на значну відстань до вимірювального пристрою без втрати інформації. Якщо частота такого сигналу не дуже висока (< 1 МГц), то спеціальних вимог до кабелю передачі немає. Більш того, якщо для живлення блока перетворення вихідного аналогового сигналу датчика використовувати джерело струму, то для живлення і блока, і датчика, а також для передачі вихідного сигналу можна використовувати тільки два дроти, тобто сумістити канал живлення з інформаційним каналом [6—9].

Крім того, для визначення поточної ваги сипучого матеріалу за допомогою конвеєрних ваг необхідно знати швидкість пересування смуги конвеєра. Це зазвичай виконується датчиком швидкості (ДШ), вихідний сигнал якого має частоту, пропорційну швидкості пересування смуги конвеєра, і довільну амплітуду.

Основний принцип контролю ваги при завантаженні судна сипучими матеріалами за допомогою конвеєрних ваг полягає в наступному. Матеріал з бункера висипається на стрічку конвеєра (його довжина може складати десятки метрів), яка за допомогою електродвигуна пересувається з постійною швидкістю по роликах, а на іншому кінці конвеєра матеріал під власною вагою зсипається у трюм судна. Для визначення маси вантажу в конвеєрні ваги вбудовується вагова платформа заданої довжини, яка розміщується на тензOMETричних датчиках. Аналоговий сигнал датчиків пропорційний вазі сипучого вантажу, який знаходиться у цей момент на ваговій платформі.

При вимірюванні ваги вантажу за принципом інтегрування маса вантажу, який попадає у трюм судна, визначається за формулою [10]

$$P = Q(t) \cdot t = q(x) V(t) \cdot t, \quad (1)$$

де P — маса вантажу;

t — час завантаження;

$Q(t)$ — питома маса вантажу, [кг/с];

$q(x)$ — погонне навантаження на стрічку конвеєра,

$$q(x) = P_{\text{ВП}} / L \text{ [кг/м];}$$

$P_{\text{ВП}}$ — маса вантажу на ваговій платформі;

L — повна довжина вагової платформи;

$V(t)$ — швидкість переміщення стрічки конвеєра.

З цього виразу випливає, що точність визначення маси вантажу визначається в основному двома факторами: неоднорідністю погонного навантаження вагової платформи у часі та зміненням швидкості пересування стрічки конвеєра при зміненні навантаження.

Швидкість конвеєрної стрічки пропорційна частоті сигналу датчика швидкості $f_{\text{ДШ}}$:

$$V(t) = K_{\text{ДШ}} f_{\text{ДШ}}, \quad (2)$$

де $K_{\text{ДШ}}$ — коефіцієнт перетворення датчика швидкості.

При використанні частотного перетворення аналогового сигналу тензометричних датчиків вагової платформи погонне навантаження на стрічку конвеєра пропорційне частоті вихідного сигналу БАЧП:

$$q = \frac{P_{\text{ВП}}}{L} = \frac{K_{\text{ТД}} (f_{\text{В1}} - f_{\text{В0}})}{L}, \quad (3)$$

де P — коефіцієнт перетворення тензометричного датчика;

$f_{\text{В0}}, f_{\text{В1}}$ — частота вихідного сигналу БАЧП у разі відсутності вантажу на ваговій платформі та за його наявності відповідно.

Тоді вага вантажу, який було завантажено до трюму, буде дорівнювати

$$P = K_{\text{ДШ}} f_{\text{ДШ}} K_{\text{ТД}} \frac{f_{\text{В1}} - f_{\text{В0}}}{L} \cdot t. \quad (4)$$

Аналіз цього виразу показує, що для розрахунку завантаженого на момент часу t вантажу необхідно одночасно вимірювати частоту сигналів від датчика швидкості $f_{\text{ДШ}}$ та від БАЧП $f_{\text{В1}}$ за визначений час t з наступним передаванням результату до комп'ютерної системи оператора, де накопичуються результати кожного вимірювання, і цей процес має бути безперервним. Безперервність процесу вимірювання можна забезпечити використанням двох однакових мікроконтролерів (МК) — А і В, які працюватимуть по черзі: коли мікроконтролер А вимірює частоту сигналу від БАЧП, мікроконтролер В передає результат попереднього вимірювання до комп'ютерної системи, і навпаки.

Вибір методу вимірювання частоти сигналів від датчиків

Частота сигналу від датчика швидкості $f_{\text{ДШ}}$ відносно невелика і при $K_{\text{ДШ}} = 0,252 \text{ м/(Гц} \cdot \text{с)}$ для датчика типу ДКС [11] складає згідно з формулою (2) від 0,8 до 12 Гц (при швидкості стрічки конвеєра від 0,2 до 3,15 м/с відповідно), тому для визначення частоти $f_{\text{ДШ}}$ з найбільшою точністю ефективно використовувати метод вимірювання періоду [12]. Цей метод (рис. 1, а) передбачає вимірювання періоду вхідного сигналу $T_{\text{ДШ}}$ шляхом підрахунку кількості $N_{\text{Т}}$ тактових імпульсів заповнення з періодом $T_{\text{Т}}$ упродовж часу $T_{\text{ДШ}}$ і подальше обчислення частоти вхідного сигналу за формулою

$$f_{\text{ДШ}} = \frac{1}{T_{\text{ДШ}}} = \frac{1}{T_{\text{Т}} N_{\text{Т}}}. \quad (5)$$

Частота сигналу від БАЧП, пропорційного масі вантажу на ваговій платформі, змінюється зазвичай від $f_{\text{В0}} = 2000 \text{ Гц}$ (коли стрічка конвеєра не навантажена) до $f_{\text{В1}} = 20000 \text{ Гц}$ (при максимальному навантаженні вагової платформи), тому для вимірювання частоти сигналу від БАЧП найбільш прийнятним є метод прямого підрахунку (рис. 1, б). Цей метод заснований на підрахунку кількості $N_{\text{В}}$ вхідних імпульсів за фіксований час виміру T_0 і дозволяє отримати достатню точність вимірювання. У цьому випадку вхідна частота дорівнює:

$$f_{\text{В}} = N_{\text{В}} / T_0. \quad (6)$$

Для виконання умови синхронного вимірювання частоти сигналів від датчика швидкості $f_{\text{ДШ}}$ та частоти $f_{\text{В}}$ сигналу від БАЧП необхідно, щоб для визначення кількості імпульсів БАЧП використовувався напівперіод $T_{\text{ДШ}}$ вхідного сигналу типу меандр від датчика швидкості. Причому для мікроконтролера А це буде напівперіод від фронту сигналу до його спаду, а для мікроконтролера В — напівперіод від спаду сигналу до його фронту (рис. 1, в).

Формування та підрахунок кількості $N_{\text{Т}}$ тактових імпульсів заповнення з заданим періодом $T_{\text{Т}}$ який можна виконати внутрішнім перериванням мікроконтролера, дозволяє визначити частоту $f_{\text{ДШ}}$ сигналу від датчика швидкості та тривалість вимірювання t :

$$t = T_{\text{ДШ}} / 2 = N_{\text{Т}} T_{\text{Т}} / 2. \quad (7)$$

Таким чином одночасно будуть замірятися усі необхідні складові для розрахунку маси вантажу згідно з виразом (4): частота сигналів від датчика швидкості $f_{\text{ДШ}}$ та від БАЧП $f_{\text{В}}$ і час вимірювання t .

Визначимо основні параметри цього методу, які забезпечать необхідну точність вимірювання.

Для конвеєрних ваг типу ВК202 максимальна швидкість руху стрічки конвеєра $V_{\text{max}} = 3,15 \text{ м/с}$, тоді мінімальний напівперіод частотного сигналу датчи-

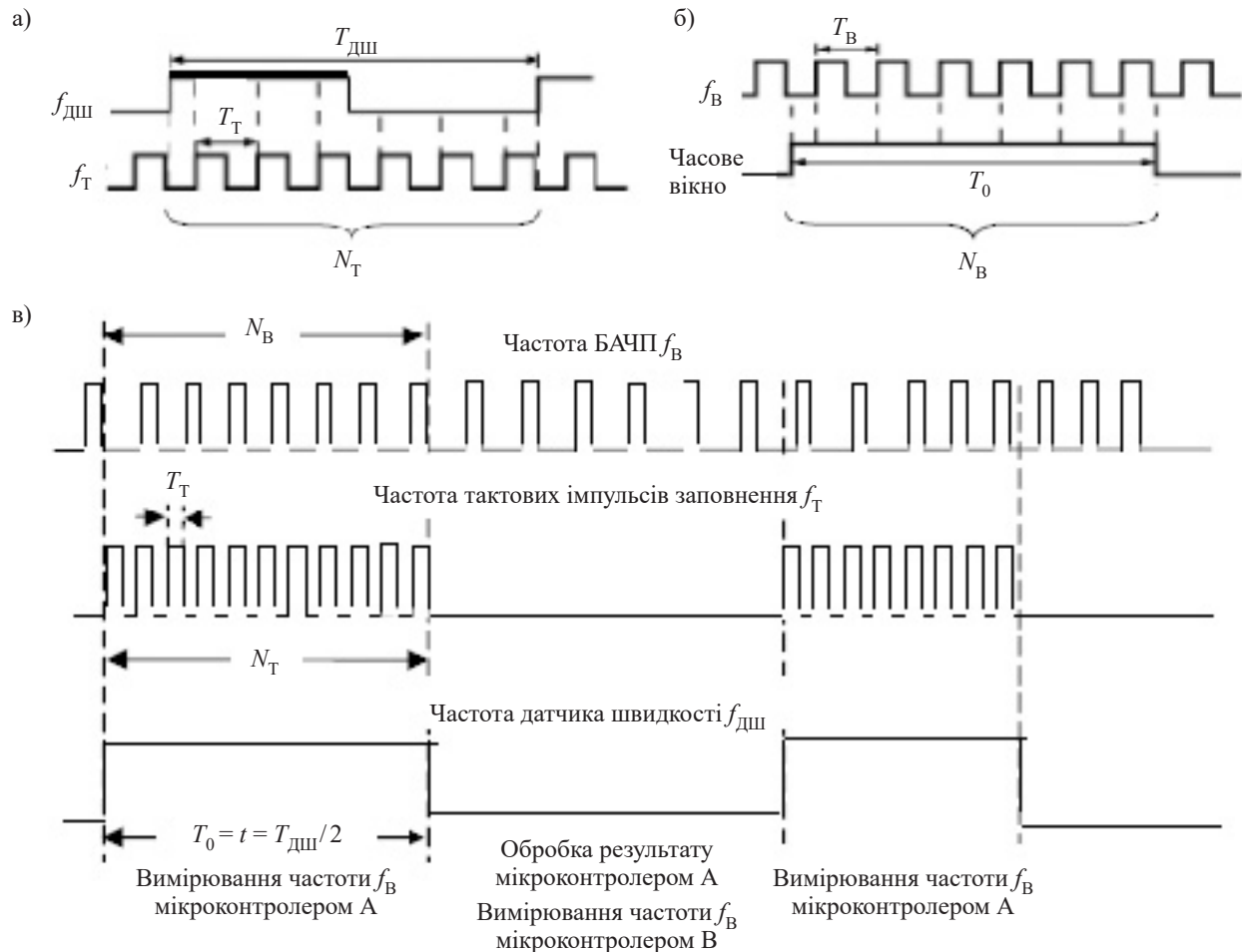


Рис. 1. Ілюстрація до методів вимірювання частоти:

a — метод вимірювання періоду; *б* — метод прямого підрахунку; *в* — синхронне вимірювання частоти датчика швидкості та частоти БАЧП

ка, що визначає час вимірювання частотного сигналу БАЧП, дорівнюватиме

$$T_{\min} = \frac{K_{\text{дш}} n}{2V_{\max}} = \frac{0,252 \cdot 4}{2 \cdot 3,15} = 0,16 \text{ с}, \quad (8)$$

де n — коефіцієнт ділення двійкового лічильника мікроконтролера, $n = 4$.

Якщо точність визначення напівперіоду частотного сигналу датчика швидкості встановлено на рівні $\delta = 0,05\%$, то мінімальний період тактових імпульсів заповнення при вимірюванні напівперіоду має дорівнювати

$$T_{\text{T min}} = \delta \cdot T_{\min} / 100, \quad (9)$$

тобто $T_{\text{T min}} = 0,05 \cdot 0,16 / 100 = 0,00008 \text{ с} = 0,08 \text{ мс}$, що відповідає частоті тактових імпульсів $12,5 \text{ кГц}$ і є припустимим.

Якщо мінімальна швидкість руху стрічки конвеєра, з якої починається вимірювання частоти сигналу БАЧП, складає $V_{\min} = 0,2 \text{ м/с}$, то максимальний час вимірювання цієї частоти БАЧП складає

$$T_{\max} = \frac{K_{\text{дш}} n}{2V_{\min}} = \frac{0,252 \cdot 4}{2 \cdot 0,2} = 2,52 \text{ с}. \quad (10)$$

Якщо максимальна частота $f_{\max}$ БАЧП складає 20 кГц , то протягом часу $T_{\max}$ буде нараховано $N_{\max} = f_{\max} T_{\max} = 20000 \cdot 2,52 = 50400$ імпульсів, що дозволяє використовувати 16-розрядний таймер мікроконтролера при мінімальній швидкості руху стрічки конвеєра.

Якщо мінімальна частота БАЧП, з якої починається вимірювання, складає $f_{\min} = 2500 \text{ Гц}$, то за мінімальний час вимірювання $T_{\min}$ буде нараховано $N_{\min} = f_{\min} T_{\min} = 2500 \cdot 0,16 = 400$ імпульсів частотного сигналу БАЧП, а найменша точність визначення частотного сигналу БАЧП складе $\delta = 100\% / N_{\min} = 0,25\%$, що є допустимим. Точність вимірювання буде зростати зі зниженням швидкості пересування стрічки конвеєра та збільшенням її завантаження.

Для реалізації цього методу вимірювання необхідно використовувати мікроконтролери, які повинні мати не менше двох 16-розрядних таймерів

з зовнішніми перериваннями та достатньо високу швидкість, для чого найбільше підходять RISC-мікроконтролери [13].

Таким чином, для реалізації можливості вимірювання ваги вантажу за допомогою конвеєрних ваг необхідно розробити пристрій, який дозволяв би безперервно вимірювати частоту БАЧП за методом прямого підрахунку імпульсів (ця частота пропорційна миттєвій вазі сипучого вантажу) та частоту імпульсів датчика швидкості за методом підрахунку тактових імпульсів (що відбиває швидкість пересування конвеєра та час вимірювання), обробляти отриману інформацію та передавати дані до комп'ютеризованої системи обліку завантаження судна.

Структурна схема пристрою

Як вже вказувалося вище, пристрій для розв'язання поставленої задачі можна побудувати на основі двох мікроконтролерів, які мають бути оснащені, зокрема, таймером для завдання необхідного інтервалу часу при вимірюванні частоти, системою зовнішніх переривань, інтерфейсом типу USART, що буде використовуватися для зв'язку з комп'ютером по протоколу інтерфейсу RS-485. Цим вимогам задовольняє, наприклад, мікроконтролер RISC фірми Atmel типу ATtiny2313 [14]. Структурну схему пристрою для отримання інформації від конвеєрних ваг наведено на **рис. 2**. Пристрій складається з таких блоків.

Блок подвоєння частоти БАЧП, де за спадом та фронтом частотного сигналу від блока аналогового частотного перетворювання формуються короткі імпульси, що дозволяє підвищити точність вимірювання частоти БАЧП. Для вимірювання частоти БАЧП методом прямого підрахунку ці короткі імпульси поступають на лічильний вхід 16-розрядних таймерів T1 мікроконтролерів А та В. Використання цього входу дозволяє підвищити швидкість обробки сигналів.

Мікропроцесорний блок управління складається з двох мікроконтролерів. Сигнал від датчика швидкості за допомогою перемикача поступає на них у протифазі, тому коли МК А вимірює частоту БАЧП, МК В обробляє та передає отриману інформацію до комп'ютерної системи контролю процесу завантаження судна по інтерфейсу RS485, і навпаки. Таким чином забезпечується безперервність отримання телеметричної інформації. Синхронізація роботи МК А та В виконується за сигналом від датчика швидкості по входах зовнішніх переривань INT0 та INT1 (див. рис. 1, в). По фронту імпульсів на вході INT0 запускається процес вимірювання частоти БАЧП мікроконтролером А, а по спаду імпульсів на вході INT1 він припиняється, і запускається процес обробки та передачі отриманої інформації по інтерфейсу RS485. Програмне забезпечення обох мікроконтролерів однакове, а особливості програм-

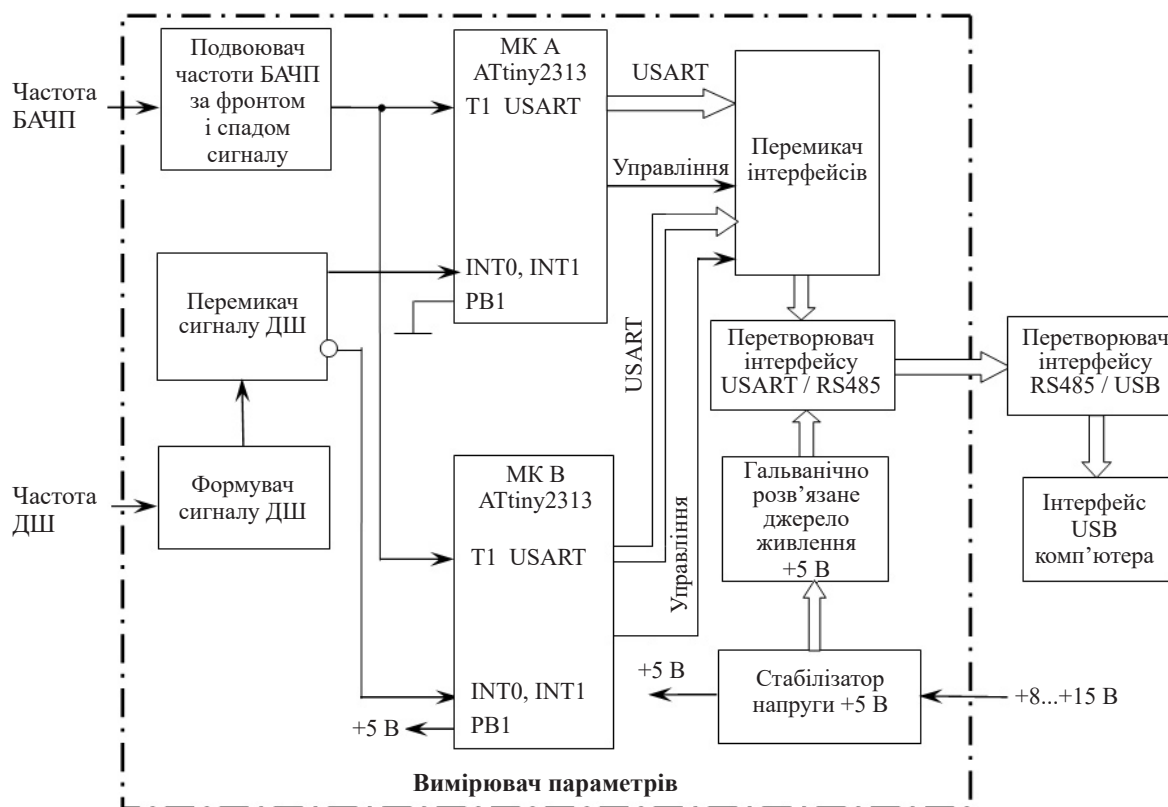


Рис. 2. Структурна схема пристрою для отримання інформації від конвеєрних ваг

ного забезпечення для різних мікроконтролерів визначаються по входу порту PB1.

Перемикач сигналу датчика швидкості перемикає сигнал від датчика швидкості по чергові до одного з МК та формує імпульсний сигнал типу “меандр”. Такий сигнал поступає одночасно на входи зовнішніх переривань INT0 та INT1 мікроконтролерів А та В, що дозволяє синхронізувати їх роботу.

Блок формування сигналу від датчика швидкості, де синусоїдальний сигнал від ДШ, амплітуда та частота якого залежить від швидкості пересування стрічки конвеєра, перетворюється в імпульсний сигнал з рівними танзисторно-транзисторної логіки.

Блок перетворення інтерфейсу USART / RS-485. Мікроконтролери типу ATtiny2313 мають стандарт-

ний інтерфейс типу USART, тому для передачі отриманої з нього інформації до комп'ютерної системи оператора, яка може знаходитися на значній відстані, необхідний перетворювач рівня сигналу з USART у RS-485. Для цього також необхідне гальванічно розв'язане джерело живлення на +5 В.

Стабілізатор напруги. Оскільки пристрій живиться від нестабілізованого джерела постійної напруги від 9 до 15 В, до його складу входить стабілізатор напруги на +5 В.

Алгоритм роботи пристрою

Алгоритм роботи пристрою отримання інформації базується на наступному.

З приходом фронту імпульсу від датчика швидкості на зовнішнє переривання INT0 мікроконтролер А починає підрахунок імпульсів частотного сигналу БАЧП по лічильному входу 16-розрядного таймера T1. Одночасно, за цим же сигналом, який приходить і на зовнішнє переривання INT1, МК В починає передавати отриману перед цим інформацію по інтерфейсу USART.

У той момент, коли спад імпульсу від датчика швидкості приходить на зовнішнє переривання INT1, МК А починає передавати отриману інформацію по інтерфейсу USART. Водночас, коли цей сигнал приходить і на зовнішнє переривання INT0, МК В починає підрахунок імпульсів частотного сигналу БАЧП по лічильному входу 16-розрядного таймера T1.

Розглянемо алгоритм роботи пристрою в основному режимі на прикладі мікроконтролера А (рис. 3).

1. Після включення пристрою встановлюється значення стека та налаштовуються порти.

2. Налаштовуються зовнішні переривання INT0 за фронтом вхідного сигналу від датчика швидкості для початку процесу вимірювання частоти БАЧП.

3. Налаштовуються зовнішні переривання INT1 за спадом вхідного сигналу від датчика швидкості для початку процесу обробки отриманих результатів вимірювання частоти БАЧП.

4. Таймер T1 налаштовується як лічильник зовнішніх імпульсів частотного сигналу БАЧП.

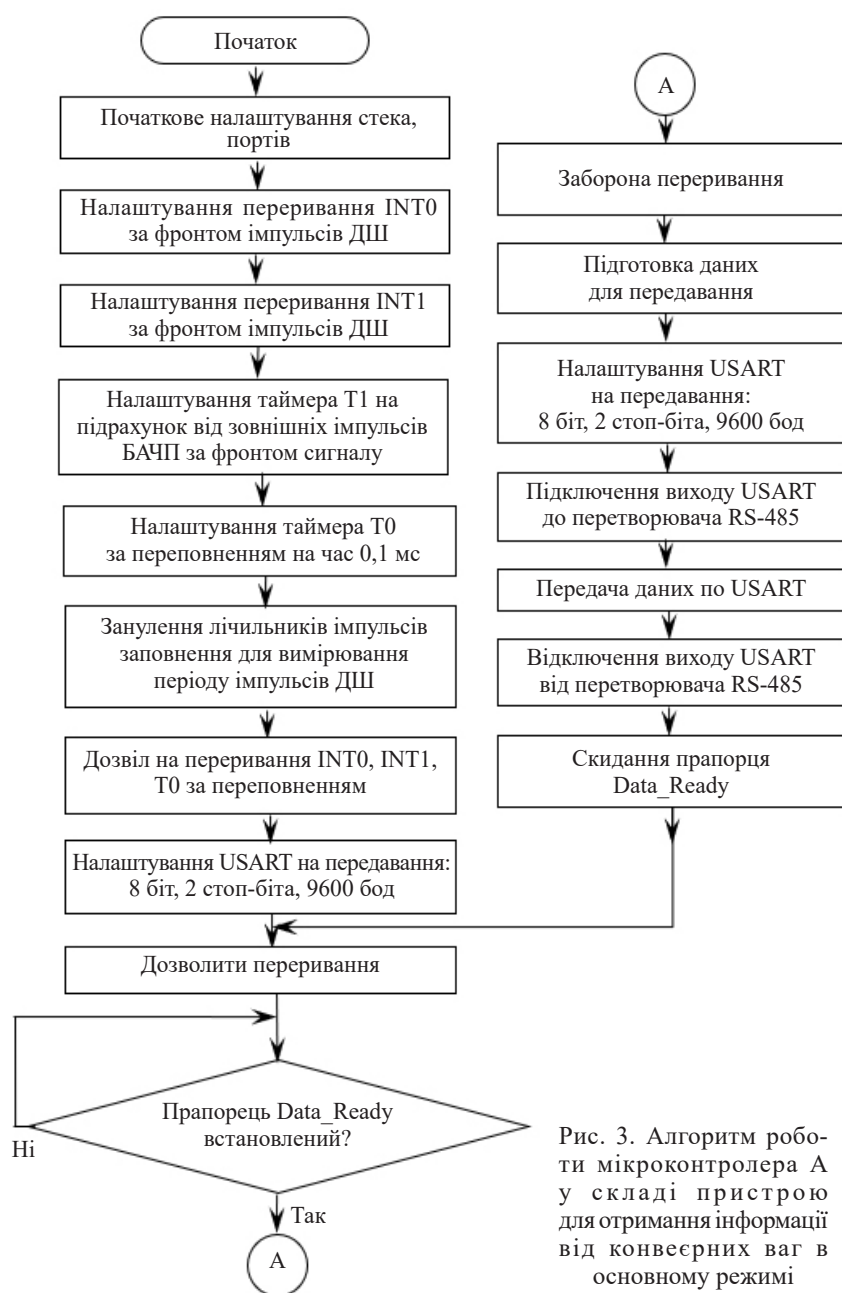


Рис. 3. Алгоритм роботи мікроконтролера А у складі пристрою для отримання інформації від конвеєрних ваг в основному режимі

5. Таймер T0 налаштовується у режим Normal за переповненням на час 0,1 мс.

6. Лічильники накопичення результатів вимірювання кількості тактових імпульсів зануляються для визначення періоду імпульсного сигналу від датчика швидкості.

7. Надається дозвіл на зовнішні переривання INT0, INT1 та внутрішні переривання таймера T0 за переповненням.

8. Порт USART налаштовується на передачу 8 біт, 2 стоп-біта, 9600 бод.

9. Надається дозвіл на загальні переривання.

10. Очікується встановлення прапорця готовності даних вимірювання Data_Ready.

11. Якщо прапорець Data_Ready встановлений, починається процес обробки отриманих даних для передавання до комп'ютерної системи по інтерфейсу USART.

12. Встановлюється заборона на загальні переривання.

13. Підготовлюються дані для передачі отриманої інформації.

14. Вихід порту TxD підключається до перетворювача інтерфейсу USART / RS-485.

15. Отримані дані передаються до комп'ютерної системи у вигляді символьних даних.

16. Вихід порту TxD відключається від перетворювача інтерфейсу USART / RS-485.

17. Знімається прапорець Data_Ready.

18. Надається дозвіл на загальні переривання.

19. Відбувається перехід за циклом очікування встановлення прапорця Data_Ready готовності даних вимірювання, тобто до п. 11. Далі процес циклічно повторюється.

В момент приходу фронту імпульсу від датчика швидкості на зовнішні переривання INT0 мікроконтролер А припиняє виконання основної програми та переходить у режим виконання підпрограми обробки переривання INT0 — запуску нового циклу вимірювання частоти БАЧП. При цьому забороняється виконання будь-яких інших переривань. Алгоритм роботи підпрограми обробки переривання INT0 складається з таких етапів (рис. 4, а).

1. Зберігається регістр стану SREG (щоб не змінити значення необхідних прапорців, встановлених до моменту входу у переривання).

2. Таймер T1 налаштовується у режим лічильника за фронтом (для мікроконтролера В — за спадом) вхідного імпульсу.

3. Зануляється 16-розрядний лічильник таймера T1.

4. Таймер T0 налаштовується у режим Normal за переповненням на час 0,1 мс (визначає тривалість тактових імпульсів при вимірюванні періоду імпульсного сигналу від датчика швидкості, що своєю чергою визначає час вимірювання частоти БАЧП).

5. Зануляються лічильники накопичення результатів вимірювання кількості тактових імпульсів для визначення періоду імпульсного сигналу від датчика швидкості.



Рис. 4. Алгоритм роботи пристрою для отримання інформації від конвеєрних ваг в режимі переривань:

а — підготовка до початку підрахунку імпульсів БАЧП; б — підготовка до обробки отриманих результатів; в — визначення періоду слідування імпульсів ДШ

A	4816	2389	20159,0
B	4841	2400	20170,8
A	4812	2388	20150,7
B	4834	2400	20141,6
A	4821	2395	20129,4
B	4803	2387	20121,5
A	4829	2404	20087,3
B	4820	2395	20125,2
A	4820	2394	20133,7
B	4822	2395	20133,6

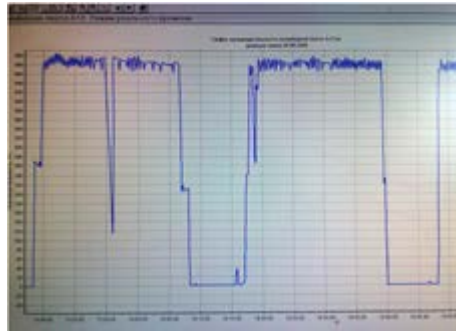


Рис. 5. Приклад виведення результатів контролю процесу завантаження судна в програмі Hyper Terminal та на моніторі оператора у реальному часі при тестуванні розробленого пристрою

6. Відновлюються значення регістру стану SREG (щоб не змінити значення необхідних прапорців, встановлених до моменту входу у переривання).

7. Виконується вихід з переривання INT0.

В момент приходу спаду імпульсу від датчика швидкості на зовнішнє переривання INT1 мікроконтролер А припиняє виконання основної програми й переходить у режим виконання підпрограми обробки переривання INT1 — обробки отриманої інформації та передавання її до комп'ютерної системи. При цьому забороняється виконання будь-яких інших переривань. Алгоритм роботи підпрограми обробки переривання INT1 складається з таких етапів (рис. 4, б).

1. Зберігається регістр стану SREG (щоб не змінити значення необхідних прапорців, встановлених до моменту входу у переривання).

2. Зупиняються таймери T1 та T0.

3. Зберігається значення кількості накопичених тактових імпульсів, що дорівнює періоду слідування імпульсів від датчика швидкості в мс.

4. Встановлюється прапорець готовності даних вимірювання Data_Ready.

5. Відновлюються значення регістру стану SREG (щоб не змінити значення необхідних прапорців, встановлених до моменту входу у переривання).

6. Виконується вихід з переривання INT1.

Переривання за переповненням таймера T0 використовуються для програмного формування тактових імпульсів та їх підрахунку. За цього переривання кожні 0,1 мс забороняється виконання будь-яких інших переривань. Алгоритм роботи підпрограми обробки цього переривання вміщує складається з таких етапів (рис. 4, в).

1. Зберігається регістр стану SREG (щоб не змінити значення необхідних прапорців, встановлених до моменту входу у переривання).

2. Лічильник тактових імпульсів збільшується на 1.

3. Таймер T0 налаштовується у режим Normal за переповненням на час 0,1 мс.

4. Відновлюються значення регістру стану SREG (щоб не змінити значення необхідних прапорців, встановлених до моменту входу у переривання).

5. Виконується вихід з переривання таймера T0 за переповненням.

Наведений алгоритм був реалізований на мові асемблер [15], він забезпечує безперервне вимірювання частотного сигналу БАЧП, пропорційного аналоговому сигналу тензометричних датчиків, який відповідає вазі сипучого вантажу, що знаходиться на ваговій платформі, а також частоті вихідного сигналу датчика швидкості. Заміряні дані передаються по інтерфейсу RS-485 до комп'ютера оператора, де на їх основі розраховується вага сипучого вантажу за кожне вимірювання і накопичується результуюча вага матеріалу, що завантажується у трюм судна [16—19].

До комп'ютерної системи надходять дані вимірювань у символічному вигляді (рис. 5, а) в наступній послідовності: позначення мікроконтролера (А чи В); кількість імпульсів БАЧП N , нарахованих за період імпульсів від датчика швидкості T_0 ; кількість тактових імпульсів за період слідування імпульсів від датчика швидкості N_T ; частота вихідних імпульсів БАЧП f_{BX} у Гц. Результати, що відбивають процес завантаження, виводяться на монітор оператора в реальному часі (рис. 5, б), що дозволяє контролювати цей процес.

Результати тестування пристрою

Тестування розробленого пристрою проводилося на конвеєрних вагах при завантаженні судна мінеральними добривами. Приклад виведення його результатів наведено на рис. 6. Тестування пристрою показало наступне.

1. При завантаженні стрічки конвеєра швидкість її руху зніжується приблизно на 1—2%, а при розвантаженні — приблизно на стільки ж підвищується.

2. Нерівномірність руху стрічки конвеєра складає у середньому 1—1,5%, але може досягати 3% у разі різкої зміни навантаження. Це, відповідно, призводить до зміни часу вимірювання частотного сигналу БАЧП, але це не сильно впливає на результати вимірювання частоти сигналу БАЧП, оскільки у пристрої використовується метод прямого підрахунку імпульсів БАЧП за період частотного сигналу від датчика швидкості.

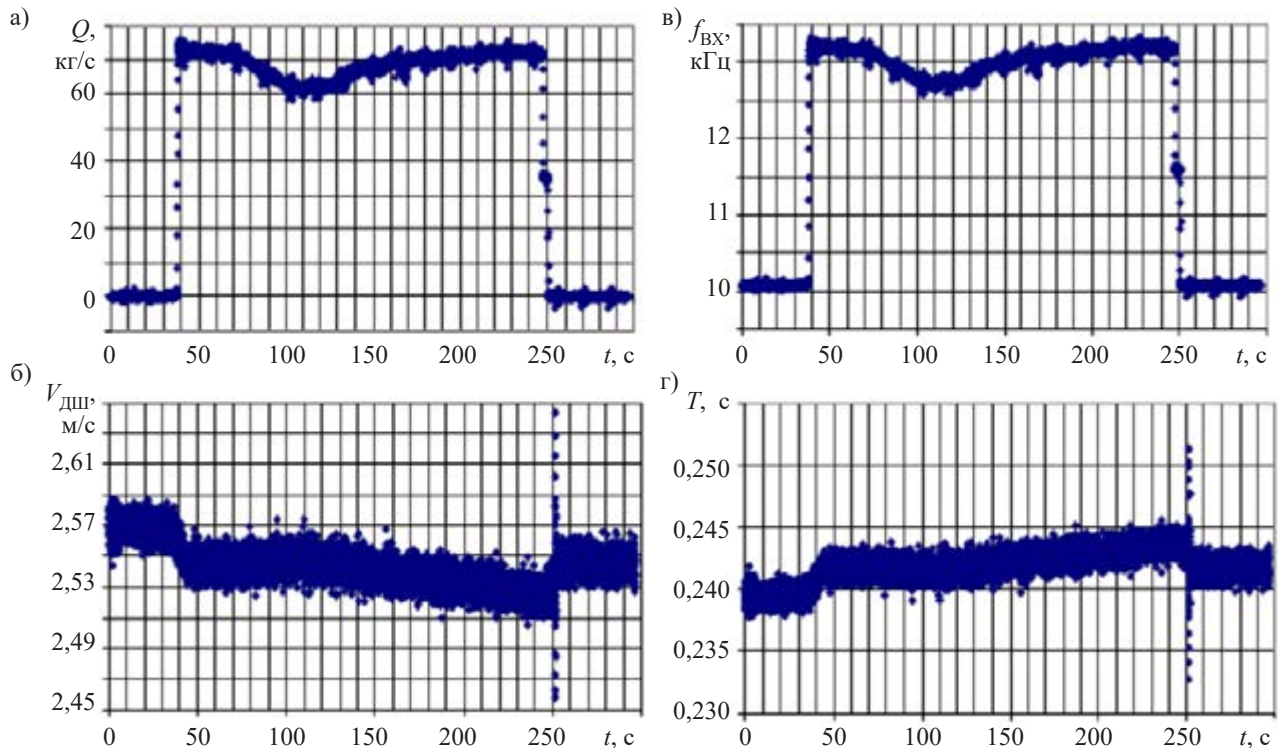


Рис. 6. Результати тестування пристрою при завантаженні судна мінеральними добривами:

a — поточна маса вантажу; *б* — швидкість стрічки конвеєра; *в* — частота сигналу БАЧП; *г* — тривалість вимірювань

3. При розвантаженні стрічки конвеєра можуть виникнути коливання вагової платформи, які затухають впродовж 5—10 с.

4. Точність вимірювання поточної продуктивності конвеєрних ваг знаходиться у межах 0,25—0,50%.

Висновки

Таким чином, розроблений пристрій для вимірювання маси сипучого матеріалу за допомогою конвеєрних ваг та алгоритм його роботи дозволяють одночасно і безперервно контролювати поточну масу вантажу та швидкість стрічки конвеєра з точністю від 0,25 до 0,50%. Цей пристрій дозволяє отримати також характеристики процесу зважування, що можна використати для удосконалення механічних конструкцій конвеєрних ваг.

Подальші дослідження мають бути направлені на підвищення точності зважування завдяки удосконаленню розробленого пристрою.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Калашников Е.Е., Кошевой Н.Д., Черепашук Г.А. Экспериментальное исследование весоизмерительной системы непрерывного действия. *Зб. наук. праць ХАІ «Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології»*, Харків, 2007, №3 (35), с. 196–199.
2. Кошевой Н.Д., Черепашук Г.А., Калашников Е.Е. Оценка точности непрерывного дозирования сыпучих материалов. *Радиоэлектронні і комп'ютерні системи*, 2008, №1 (28), с. 143–147.
3. Фрайден Дж. *Современные датчики. Справочник*. Москва, Техносфера, 2005, 592 с.

4. Мирский Г. Я. *Электронные измерения*. Москва, Радио и связь, 1986, 440 с.

5. Дерябин В. Преобразователи напряжение-частота. *Chip News Инженерная электроника*, 2004, № 8, с. 13–23.

6. Дранчук С.М., Завадський В. А., Чайка А.В. Аналогово-частотний перетворювач для тензометричних датчиків суднового обладнання. *Матер. IX міжнар. наук.-техн. конф. «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика»*, Україна, Одеса, 2019, с. 50–54.

7. Дранчук С. М., Завадський В. А., Харченко Р. Ю. Моніторинг швидко змінних у часі процесів в суднових машинах, з подальшим аналізом результатів. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*, 2019, № 31(107). <https://doi.org/10.15276/eltecs.31.107.2019.11>

8. Завадський В. А., Харченко Р. Ю., Дранчук С. М., Цацко В. І. Пристрій для дослідження температурної сталості характеристик перетворювачів напруги в частоту. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2021, № 3–4, с. 9–16. <https://doi.org/10.15222/teka2021.3-4.09>

9. Дранчук С. Н., Завадський В. А., Харченко Р. Ю. Моніторинг процесів в суднових машинах, які швидко змінюються у часі, з послідовним аналізом результатів, *XXIV Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика»*, 2019, Україна, Одеса.

10. Жуковський В.И. *Основы теории и принципы построения автоматических весоизмерительных комплексов в горно-рудной промышленности*. Днепропетровск, МОН України, НГУ, 2014, 243 с.

11. Датчик контролю швидкості ДКС-1К <http://usk.ua/datchik-kontrolja-skorosti-dks-1k.html> (15 березня 2023)

12. Ратхор Т.С. *Цифровые измерения. Методы и схемотехника*. Москва, Техносфера, 2004, 363 с.

13. Трапперт В. *Измерение и регулирование с помощью AVR микроконтроллеров*. Киев, МК-Пресс, 2007, 208 с.
14. Евстигнеев А.В. *Микроконтроллеры AVR семейств Туну и Мегат фирмы «Atmel»*. Москва, Додека-XXI, 2006, 589 с.
15. Ревич Ю.В. *Практическое программирование микроконтроллеров Atmel AVR на языке ассемблера*. СПб. БХВ-Петербург, 2008, 384 с.
16. Shi L., He J., Wu G. et al. Measuring system and method for auto-loading of bulk cargo. *Proceedings Volume 7128, Seventh International Symposium on Instrumentation and Control Technology: Measurement Theory and Systems and Aeronautical Equipment*, 2008, 71280Z. <https://doi.org/10.1117/12.806622>
17. Blokus-Roszkowska A. Reliability analysis of the bulk cargo loading system including dependent components. *AIP Conference Proceedings*, 2016, vol. 1738, iss. 1, 440002. <https://doi.org/10.1063/1.4952220>

18. Mansur V., Pershin V. F. Development of a method for weight continuous dosing of bulk materials and its implementation analysis. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2023, no.1 (754), pp. 33–41. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-1-33-41>

19. Шилин Д.В., Шестов Д.А., Ганин Е. Повышение точности взвешивания сыпучих материалов в дозаторном прямоточном расходомере с двумя тензодатчиками. *Вестник МЭИ*, 2019, № 3(3), с. 116–123.

Дата надходження рукопису
до редакції 11.03 2023 р.

DOI: 10.15222/TKEA2023.1-2.50
UDC 629.5.064.5

V. A. ZAVADSKY¹, R. YU. KHARCHENKO¹,
S. M. DRANCHUK², V. I. TSATSKO², T. O. HAUR²

Ukraine, Odesa, ¹National University «Odessa Maritime Academy»,
²Odessa National Maritime University
E-mail: rvaaz@ukr.net

DEVICE FOR MEASURING SIGNALS OF CONVEYOR WEIGHTS WHEN LOADING A VESSEL WITH BULK CARGO

In the maritime industry, it is common to load a vessel with bulk materials using conveyor scales. To determine the amount of cargo loaded into the hold of the vessel, it is necessary to simultaneously measure both the current weight on the weighing platform and the speed of the conveyor belt. In addition, the loading process is affected by both the heterogeneity of the bulk material and the uneven movement of the conveyor belt. Therefore, it is necessary to simultaneously and synchronously measure these parameters. The purpose of this work was to develop a device and an algorithm for its operation, which will improve the accuracy of determining the mass of cargo when loading a vessel.

Such a converter is located near the measuring sensor, and the frequency signal, the frequency of which is directly proportional to the output signal of the sensor along the line, is transmitted over a considerable distance without loss of information to the measuring device. The developed device for measuring the mass of bulk material using conveyor scales and the algorithm of its operation make it possible to simultaneously and continuously measure the current mass of the cargo and the speed of the conveyor belt, and, accordingly, the current mass of the cargo. The measurement accuracy was 0.25...0.5%. This device also allows you to get the characteristics of the weighing process to improve the mechanical conveyor designs of the scales.

Testing of the developed device was carried out on conveyor scales when loading the ship with mineral fertilizers. Testing showed that the developed device for obtaining tensometric information and the algorithm of its operation make it possible to control the process of loading a ship with bulk materials using conveyor scales with the planned accuracy, which, in turn, allows it to be used in computer systems for monitoring ship loading.

The developed device and the algorithm of its operation can improve the quality of measuring the mass of cargo and increase the accuracy of measurement, which is important from an economic point of view.

Keywords: conveyor scales, frequency measurement, operation algorithm, sensor, weighing.

REFERENCES

1. Kalashnikov E.E., Koshevoy N.D., Cherepashchuk G.A. [Experimental study of a continuous weighing system]. *Open Information and Computer Integrated Technologies*, Kharkiv, KhAI, 2007, №3 (35), pp.196–199. (Rus)
2. Koshevoy N.D., Cherepashchuk G.A., Kalashnikov E.E. [Evaluation of the accuracy of continuous dosing of bulk materials]. *Radioelektronni i kompiuterni systemy*, 2008, №1 (28), pp. 143–147. (Rus)
3. Friden J. *Sovremennyye datchiki. Spravochnik* [Modern sensors. Directory]. Moscow, Tehnosfera, 2005, 592 p. (Rus)
4. Mirskiy G. Ya. *Elektronnyye izmereniya*. [Electronic measurements]. Moscow, Radio i svyaz, 1986, 440 p. (Rus)

5. Deryabin V. [Voltage-frequency converters]. *Chip News Inzhenernaya Elektronika*, 2004, №8, pp.13–23. (Rus)
6. Zavadsky V. A., Dranchuk S. M., Chaika A. V. Analog-frequency converter for ship equipment strain gauges, *Materials of the 9th International Scientific and Practical Conference “SEEA-2019”*, Ukraine Odesa, 2019, pp. 50–54. (Ukr)
7. Dranchuk S. M., Zavadsky V. A., Kharchenko R. Yu. Monitoring processes in ship machines that change rapidly over time, with subsequent analysis of results. *Electrotechnic and Computer Systems*, 2019, no. 31(107), 118–127. <https://doi.org/10.15276/eltecs.31.107.2019.11> (Ukr)
8. Zavadsky V. A., Kharchenko R. Yu., Dranchuk S. M., Tsatsko V. I. Device for investigating thermal stability of characteristics of voltage-to-frequency converters. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye*

v *Elektronnoi Apparature*, 2021, no. 3–4, pp. 9–16. <https://doi.org/10.15222/kea2021.3-4.09> (Ukr)

9. Dranchuk S. M., Zavadsky V. A., Kharchenko R. Yu. Monitoring processes in ship machines that change rapidly over time, with subsequent analysis of results. electrical and computer systems. *XXIV International Scientific and Technical Conference «The Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice»*, 2019, Ukraine, Odesa. (Ukr)

10. Zhukovitsky V. I. *Osnovy teorii i printsipy postroyeniya avtomaticheskikh vesoizmeritel'nykh kompleksov v gornorudnoy promyshlennosti* [Fundamentals of the theory and principles of construction of automatic weighing complexes in the mining industr]. Dnepropetrovsk, MON of Ukraine, NGU, 2014, 243 p. (Rus)

11. *Speed control sensor ДКС-1К* (15 March 2023) (Rus)

12. Ratkhov T. S. *Tsifrovyye izmereniya. Metody i skhemotekhnika* [Digital measurements. Methods and circuitry]. Moscow, Tehnosfera, 2004, 363 p. (Rus)

13. Trampert V. *Izmereniye i regulirovaniye s pomoshch'yu AVR mikrokontrollerov* [Measurement and regulation with AVR microcontrollers. Kyiv, MK-Press, 2007, 208 p. (Rus)

14. Yevstigneyev A. V. *Mikrokontrollery AVR semeystv Tyny i Mega firmy «Atmel»* [AVR microcontrollers of the Tyny and Mega families from Atmel]. Moscow, Dodeka-HHI, 2006, 589 p. (Rus)

15. Revich Yu. V. *Prakticheskoye programmirovaniye mikrokontrollerov Atmel AVR na yazyke assemblera* [Practical programming of Atmel AVR microcontrollers in assembly language. SPb. BHV-Peterburg, 2008, 384 p. (Rus)

16. Shi L., He J., Wu G. et al. Measuring system and method for auto-loading of bulk cargo. *Proceedings Volume 7128, Seventh International Symposium on Instrumentation and Control Technology: Measurement Theory and Systems and Aeronautical Equipment*, 2008, 71280Z. <https://doi.org/10.1117/12.806622>

17. Blokus-Roszkowska A. Reliability analysis of the bulk cargo loading system including dependent components. *AIP Conference Proceedings*, 2016, vol. 1738, iss. 1, 440002. <https://doi.org/10.1063/1.4952220>

18. Mansur V., Pershin V. F. Development of a method for weight continuous dosing of bulk materials and its implementation analysis. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2023, no.1 (754), pp. 33–41. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-1-33-41>

19. Shilin D. V., Shestov D. A., Ganin E. Improving the Accuracy of Weighing Bulk Materials in a Dispenser On-Stream Flow Meter with Two Strain Gauges. *Vestnik MEI*, 2019, no. 3(3), pp. 116–123. <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2019-3-116-123> (Rus)

Опис статті для цитування:

Завадський В. А., Харченко Р. Ю., Дранчук С. М., Цацко В. І., Гаур Т. О. Прилад для вимірювання сигналів конвеєрних ваг при завантаженні судна сипучими матеріалами. Технологія та конструювання в електронній апаратурі, 2023, № 1–2, с. 50–59. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2023.1-2.50>

Cite the article as:

Zavadsky V. A., Kharchenko R. Yu., Dranchuk S. M., Tsatsko V. I., Haur T. O. Device for measuring signals of conveyor weights when loading a vessel with bulk cargo. *Technology and design in electronic equipment*, 2023, no. 1–2, pp. 50–59. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2023.1-2.50>

РЕЦЕНЗЕНТИ НОМЕРА

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

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

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

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

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

Трофімов Володимир Євгенович, канд. техн. наук, доцент, Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса

ПОКАЖЧИК СТАТЕЙ, ОПУБЛІКОВАНИХ У ЖУРНАЛІ У 2022 РОЦІ

Нові компоненти для електронної апаратури

Вплив температури навколишнього середовища на електричні властивості варисторно-позисторної структури. *Іванченко О. В., Тонкошкур О. С.* 1–3

Резистивні сенсори вологи на основі плівок наноцелюлози для біорозкладної електроніки. *Лапшуда В. А., Ліневич Я. О., Душейко М. Г., Коваль В. М., Барбаш В. А.* 4–6

НВЧ-техніка

Особливості проектування поздовжньо-співвісних хвильоводно-мікросмужкових з'єднувачів. *Глушеченко Е. М.* 4–6

Системи передавання та обробки сигналів

Імпульсний метод оперативного контролю та управління зарядним процесом накопичувача енергії. *Плаксіні С. В., Житник М. Я., Левченко Р. Ю., Остаповська С. Я.* 1–3

Реалізація кодека Манчестер для систем передавання інформації на основі мікроконтролерів AVR- та ARM-архітектури. *Садченко А. В., Кушніренко О. А., Кушніренко Н. П., Садченко О. В., Троянський О. В.* 4–6

Енергетична електроніка

Імпульсні перетворювачі зі зниженою пульсацією вихідного струму. *Бондаренко О. Ф., Голубенко О. П., Яма О. С., Зінченко А. Ю.* 4–6

Використання повного факторного експерименту для моделювання генерації електроенергії сонячними батареями. *Єфіменко А. А., Логвінов О. В., Присяжнюк Л. І.* 4–6

Мікропроцесорні пристрої та системи

Розрахунок дискретної кореляційної функції у фасетних системах технічного зору. *Боровицький В. М., Антоненко В. А.* 1–3

Сенсоелектроніка

Цифрова обробка в ПЛІС імпульсів газового детектора гамма-випромінювання для придушення акустичних завад. *Пудов О. О., Соколов С. О., Абизов О. С., Рибка О. В., Кутній В. Є.* 1–3

Технологічні процеси та обладнання

Процеси кристалізації тонких полікристалічних шарів стибніту галію для термофотovoltaїчного застосування. *Баганов Є. О., Шутков С. В., Цибуленко В. В., Левицький С. М.* 4–6

Матеріали електроніки

Вплив домішок і дефектів структури на властивості детекторів на основі CdTe та CdZnTe. *Кондрік О. І., Ковтун Г. П.* 1–3

Електропровідність термочутливої склокераміки на основі нанорозмірного діоксиду ванадія. *Колбунов В. Р., Тонкошкур О. С., Вашерук О. В.* 1–3

Оцінка чистоти Cd, Zn, Pb шляхом безконтактного вимірювання питомого електроопору за температури рідкого азоту. *Кондрік О. І., Ковтун Г. П., Щербань О. П., Солопихін Д. О.* 4–6

Вплив природи електроліту на електрохімічні властивості вуглецевого матеріалу рослинного походження. *Семків І. В., Ващинський В. М., Кашуба А. І., Ільчук Г. А., Соловйов М. В.* 4–6

Метрологія. Стандартизація

Особливості визначення показників надійності термоелектричних генераторних модулів за експериментальними даними. *Горський П. В.* 1–3

Порівняння надійності термоелектричних генераторних модулів з різними схемами сполучення термоелементів. *Горський П. В.* 4–6

До історії науки та техніки

До 50-річчя Науково-виробничого підприємства «Електрон-Карат». *Ваків М. М.* 1–3

Бібліографія

Показчик статей, опублікованих у журналі у 2021 році 1–3

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

Підписано до друку 30.05 2023 р. Формат 60×84 1/8. Друк. арк. 8,0. Тираж 100 прим. Зам. № 153/154
Оригінал-макет виготовлено у видавництві «Політехперіодика»
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3232 від 09.07.2008 р.
(65044, м. Одеса, а/с 17)

Надруковано ФОП Побута М. І. з готового оригінал-макета
(65044, м. Одеса, пр-т. Шевченка, 1а)

