

PHYSICS OF DEVICES, ELEMENTS AND SYSTEMS ФІЗИКА ПРИЛАДІВ, ЕЛЕМЕНТІВ І СИСТЕМ

УДК 629.7.064.5

DOI:10.30837/rt.2024.4.219.10

*В.М. БОРЩОВ, д-р техн. наук, О.М. ЛІСТРАТЕНКО, канд. техн. наук,
М.А. ПРОЦЕНКО, канд. техн. наук, І.Т. ТИМЧУК, канд. техн. наук,
О.В. КРАВЧЕНКО, К.Г. БІЛОУСОВ, І.Т. ПЕРЕКОПСЬКИЙ*

НОВІ ПІДХОДИ ДО СТВОРЕННЯ НАДЛЕГКИХ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ ДЛЯ НАДМАЛИХ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ

Вступ

Останнім часом спостерігається значне зростання кількості запусків надмалих космічних апаратів (КА), маса яких не перевищує 10–30 кг. Сфера застосування таких КА також постійно розширюється і особливу роль у цьому напрямку відіграє стандарт CubeSat. Стандарт CubeSat дає змогу розробляти й створювати мініатюрні КА за короткий проміжок часу та за відносно невеликих витрат. При цьому зростають можливості й надійність компонентів для КА CubeSat, а також розвивається їх інфраструктура.

Для досягнення конкурентних переваг розробники й виробники сучасних надмалих КА прагнуть до покращення питомих енергомасових та ресурсних характеристик джерел енергії бортових систем, зокрема батарей сонячних (БС). При цьому постійно вирішуються основні завдання з удосконалення БС, а саме: підвищення ефективності фотоелектричних перетворювачів (ФП), зменшення маси, площі й вартості БС, підвищення їх радіаційної стійкості, ресурсу, а також розширення сфери їх застосування. Характеристики БС значною мірою визначають економічну та цільову ефективність КА CubeSat, тому особлива увага приділяється використанню в БС високоефективних ФП, які мають високі енергомасові показники та тривалий ресурс в умовах впливу руйнівних чинників космічного простору. При цьому енергомасові показники несучих панелей (каркасів) БС оптимізуються з метою забезпечення мінімізації масових характеристик БС. Конструкції БС і панелей БС розробляються з урахуванням максимально можливого використання напрацьованих технічних рішень та освоєних промисловістю матеріалів і комплектуючих. При цьому конструкції БС оптимізуються з урахуванням зручності монтажу груп ФП на панелях БС і їх підключення до електричних схем із застосуванням стандартних інструментів та оптимальних технологічних рішень для їх виготовлення [1, 2].

Мета роботи – розробка нових підходів для вибору конструктивно-технологічних рішень (КТР) полегшених високоефективних БС на основі надлегких жорстких вуглепластикових панелей, а також умовно гнучких надлегких сонячних модулів на гнучких алюміній-поліімідних (Al-Pi) платах із застосуванням радіаційно-стійких тонких (80–110 мкм) багато-перехідних арсенід-галієвих (GaAs) ФП із коефіцієнтом корисної дії (ККД) 30–32 % для КА CubeSat з покращеними питомими енергомасовими характеристиками.

1. Надлегкі БС для КА CubeSat

1.1. Жорсткі надлегкі панелі для БС

Під час розробки нових, більш досконалих конструкцій БС основними факторами, що впливають на їх енерговіддачу з одиниці площі, є параметри застосовуваних ФП, а на енерговіддачу з одиниці маси – конструкція та матеріали панелі БС.

В якості жорстких панелей для БС КА CubeSat на теперешній час найчастіше застосовуються жорсткі вуглесотопластові та алюмінієві панелі, а також панелі на основі фольгованих склотекстолітів. Наприклад, голландська компанія Innovative Solutions in Space (ISIS), яка спеціалізується на технологіях для малих КА масою від 1 до 30 кг, у своїх БС переважно

використовує алюмінієві та вуглесотопластові панелі [3]. Британська компанія Clyde Space Ltd застосовує для панелей БС високоякісний фольгований склотекстоліт FR4 з поліімідним покриттям [4]. Використання матеріалу FR4 для виготовлення панелей БС для КА CubeSat-3U практично забезпечило створення відносно легких БС із потужністю близько 7 Вт і масою від 135 до 190 г при загальній масі КА не більше 4 кг [5, 6]. В Україні у 2019 р. ДП «КБ «Південне» у рамках роботи з реалізації програми розвитку супутникових технологій також була проведена розробка надмалого КА «GS-1» класу CubeSat-3U. Штатні зразки БС для цього апарату з потужністю близько 7,25 Вт були виготовлені компанією ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ». Панелі для БС виготовлялися з вітчизняного фольгованого міддю (35 мкм) склотекстоліту СТЕФ-1 із загальною товщиною 1,5 мм і питомою щільністю близько 1,9 г/см³. Розміри БС становили 327 × 82 мм при загальній масі близько 110 г (маса панелі ~80 г), питомій потужності по площі близько 280 Вт/м² та питомій потужності по масі близько 66 Вт/кг на кінець терміну активного існування (ТАІ). У БС застосовувалися високоефективні фотоелектричні комірки 3G30A компанії Azur Space Solar Power із ККД 30 % [7].

Водночас для підвищення енерговіддачі з одиниці маси БС для КА CubeSat сучасні розробники також застосовують надтонкі панелі з титану та алюмінієвих сплавів. Питома щільність алюмінію (2,7 г/см³) вдвічі менша, ніж у титану (4,5 г/см³), проте титан має більшу міцність порівняно з алюмінієм. Тому компанія ISIS розробила й виготовила високоефективні БС для КА CubeSat серії EXA DSA, у яких використовується титанова панель для механізму розгортання і яка забезпечує при товщині 0,25 мм міцну конструкцію БС при суттєвому зменшенні її маси. Таким чином, маса панелі з титану товщиною 250 мкм для БС КА CubeSat-1U не перевищила 8 г, а маса панелі для БС КА CubeSat-3U – не більше 25 г [8].

Для подальшого збільшення енерговіддачі з одиниці маси у більш досконалих БС для надмалих КА оптимальним рішенням є застосування у БС тонких і ультралегких вуглепластикових панелей із питомою щільністю близько 1,5–2,0 г/см³. При цьому тонкі багат шарові вуглепластикові панелі товщиною, наприклад, близько 0,5 мм з високомодульних, високоміцних і відносно недорогих вуглецевих волокон, у порівнянні з титановими панелями, не поступаючись їм у міцності, забезпечують майже в три рази меншу питому щільність. У свою чергу вуглепластик, незважаючи на майже рівну питому щільність, має удвічі більшу питому міцність і майже вчетверо вищу жорсткість порівняно зі склопластиками. Встановлення БС з надлегкими вуглепластиковими панелями на жорсткі та міцні шасі-каркаси з алюмінієвих сплавів у КА CubeSat дозволяє суттєво підвищити їх енерговіддачу з одиниці маси. Особливо з використанням в БС сучасних новітніх комірок ФП на основі тонких (80–110 мкм) багатоперехідних GaAs ФП із ККД 30–32 % [8, 9].

1.2. ФП та комірки ФП для БС

Багато світових космічних держав на сьогодні освоїли промислове виробництво високоефективних триперехідних фотоелектричних перетворювачів із ККД близько 30 %. Однак лише три провідні компанії у світі раніше за усіх пройшли повноцінну космічну кваліфікацію триперехідних ФП та захищених фотоелектричних комірок ФП із ККД 30 %, які серійно випускаються і мають польотну історію понад 20 років. Це такі компанії, як Emcore, з 2014 р. – SolAero Technologies Corp. (США), Spectrolab (США), а також Azur Space Solar Power (Хайльбронн, Німеччина). Усі ці компанії пройшли однаковий шлях у розробці ФП, хоча й у різний час; і всі три компанії на фінальному етапі досягли серійного виробництва високоефективних ФП космічної кваліфікації з ККД до 30 %. При цьому найкращий у світі результат продемонструвала німецька компанія Azur Space, чії триперехідні ФП 3G30-Advanced досягли значення ККД близько 29,7 %. Наразі Azur Space продовжує впевнено утримувати світове лідерство та успішно освоїла серійну технологію виробництва ФП із ККД 31–32 %.

З точки зору спрощення та зменшення трудомісткості процесів складання БС, останнім часом надається перевага ФП великої площі, які мають у своїй структурі або інтегровані (монолітні) захисні діоди, або ФП із зовнішніми захисними діодами. Основна перевага ФП із зовнішніми або інтегрованими захисними діодами – це можливість спростити технологію складання ФП у групи та секції БС. Під час складання БС основною складальною одиницею стає так звана комірка ФП, яка являє собою або ФП з інтегрованим захисним діодом, до якого приварені виводи (міжелементні з'єднання) та приклеєне захисне скло, або ФП із встановленим зовнішнім захисним діодом, до якого приварені виводи та приклеєне захисне скло (СІС – coverglass-interconnectors-cell). Такий підхід дозволяє суттєво зменшити трудомісткість складальних операцій (до 50 %) під час виготовлення БС.

Наприклад, гетероструктурні комірки ФП 3G30A із зовнішнім захисним діодом великої площі були розроблені компанією Azur Space і призначалися для надійної експлуатації КА на геостаціонарних орбітах Землі до значень поглиненої дози (флюенсу) 1×10^{15} е/см² на кінець ТАІ тривалістю до 15 років. На сьогодні саме ФП 3G30 і комірки ФП 3G30A компанії Azur Space обирають багато виробників низькоорбітальних супутників у всьому світі. Це пов'язано з тим, що ФП 3G30 і комірки 3G30A успішно пройшли повний обсяг кваліфікаційних випробувань на відповідність стандарту ESA ECSS-E-ST-20-08C. Комірки ФП компанії Azur Space у складі БС на широко використовуваних жорстких вуглесотопластових каркасах мають успішну та тривалу історію застосування на всіх орбітах функціонування КА починаючи з 1996 р. для високоефективних одно- і двоперехідних арсенід-галієвих ФП та з 2002 р. – для триперехідних ФП [10].

Також у 2012–2013 рр. на німецькому технологічному КА ТЕТ-1 в складі експериментальної БС були проведені та успішно пройшли льотні кваліфікаційні випробування більш тонкі триперехідні GaAs ФП компанії Azur Space. Кваліфікаційні випробування проходили на круговій сонячно-синхронній орбіті на висоті 506 км. Експериментальна БС представляла собою вуглепластикову панель з розміщеними на ній інноваційними комірками ФП розмірами 40×80 мм та комірками ФП розмірами 20×20 мм. Комірки ФП мали зовнішні захисні діоди та скляні захисні покриття CMX100 компанії Qiortiq (Велика Британія). При цьому ФП для комірок з розмірами 40×80 мм мали різні товщини від 150 до 20 мкм. Експериментальні комірки з меншими товщинами ФП показали кращі результати ефективності протягом усього часу польоту супутника, які навіть перевищували результати наземних лабораторних випробувань. За результатами льотної кваліфікації в компанії Azur Space у 2017 р. було розпочато серійне виробництво нових вдосконалених більш тонких ФП 3G30С з товщиною 80 мкм і комірок ФП на їх основі. Ця розробка забезпечила зниження маси одного ФП 3G30 з 2,75 до 1,5 г (більше 40 %), що дозволило також значно зменшити масу фотогенеруючої частини та збільшити енерговіддачу з одиниці маси розроблюваних перспективних БС [8, 11].

Таким чином, сучасні високоефективні комірки ФП великої площі з зовнішнім захисним діодом, з тонкими багатоперехідними ФП розмірами 40 x 80 мм та ККД 30–32 % компанії Azur Space є найкращим і широко застосованим варіантом у розроблених БС останніх поколінь для КА CubeSat з метою покращення їхніх питомих енергомасових характеристик.

1.3. Умовно гнучкі сонячні модулі

Застосування умовно гнучких сонячних модулів з покращеними енергомасовими та ресурсними характеристиками на основі високоефективних тонких багатоперехідних GaAs ФП з ККД 30–32 % та гнучких носіїв також дозволяє розробити та виготовити значно полегшені БС для сучасних надмалих КА з покращеними питомими енергомасовими характеристиками.

До складу умовно гнучких сонячних модулів з різними геометричними розмірами входять гнучкі безадгезивні носії, що забезпечує простоту їх виготовлення та дозволяє автоматизувати процеси електричного з'єднання ФП у модулях. З'єднання ФП у модулях як послідовно, так і паралельно здійснюється за допомогою плоских (стрічкових) алюмінієвих

выводів (міжз'єднань) як зварюванням розщепленим електродом, так і точковим ультразвуковим зварюванням. Якщо у модулі застосовані ФП з інтегрованими захисними діодами, то до ФП в модулях приклеюються лише захисні скляні покриття. У разі, якщо в модулі застосовані незахищені ФП, то до кожного ФП приспонується зовнішній захисний діод, а потім приклеюється захисне скло до фронтальної поверхні ФП за допомогою оптично прозорих адгезивних матеріалів. На гнучкому носії (гнучкій друкованій платі) на Al провідниках формуються локальні багатошарові Ni-SnBi контакти для забезпечення послідовного та паралельного з'єднання сонячних модулів у БС методом паяння.

Застосування умовно гнучких сонячних модулів у конструкції розроблюваних БС дозволяє забезпечити підвищення їх стійкості до впливу механічних навантажень, зменшити деформації, що виникають через циклічні зміни температури, та покращити теплові режими експлуатації ФП. При цьому спрощується процес позиціонування ФП в модулях, мінімізуються зазори між ФП для підвищення заповнення БС. Такий технічний результат досягається за рахунок застосування для комутації ФП гнучкої друкованої плати, виготовленої з Al-Pi лакофольгованого безадгезивного діелектрика власного виробництва компанії ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ». Наприклад, фольгованого поліімідного діелектрика марки ЛТУ-ФПА30-20 (Al – 30 мкм, Pi – 20 мкм) або ЛТУ-ФПА15-10 (Al-15 мкм, Pi – 10 мкм) з питомою щільністю шаруватих матеріалів порядку 2,0 – 2,1 г/см³. Система Al-Pi забезпечує підвищену стійкість БС до впливу механічних навантажень і зменшення деформацій, що виникають через циклічні зміни температури, завдяки високій еластичності та механічній міцності при вигині та інших механічних впливах. В електричних ланцюгах ФП повністю виключаються короткі замикання, оскільки всі комутуючі провідні елементи плати ізолювані один від одного поліімідом. Ізолювання поліімідом поверхні плоских алюмінієвих гнучких виводів-компенсаторів для послідовного з'єднання ФП і зазорів між ФП в модулях призводить до багаторазового збільшення повного опору протікання струмів витoku, що значно знижує ймовірність короткого замикання в електричних ланцюгах. Всі міжелементні з'єднання здійснюються за допомогою алюмінієвої фольги. Цей матеріал має фізико-хімічні властивості, які перешкоджають корозії. Окисна плівка на алюмінії надійно захищає алюмінієві шари від подальшого окислення при впливі атомарного кисню в верхніх шарах атмосфери та в космічному просторі. Застосування для захисту поверхні алюмінію бар'єрних антикорозійних шарів з нікелю в зонах зварювання в контактних парах Ag-Ni, а також Au-Ni корозія не виникає навіть при дуже жорстких умовах експлуатації сонячних модулів. Це дозволяє здійснювати міцні зварні з'єднання типу Al-Ni-Ag алюмінієвих плоских виводів з токопровідними шинами в БС, покритими сріблом, або здійснювати надійні з'єднання типу Al-Ni-Ag з срібними контактами ФП, а також з'єднання типу Al-Ni-Au алюмінієвих плоских виводів з срібними контактами ФП із золотими покриттями за допомогою ультразвукового зварювання [12, 13].

Високоєфективні триперехідні GaAs ФП у БС потребують надійного індивідуального захисту від впливу зворотної напруги на ФП у нештатних ситуаціях. Використання зовнішнього захисного (байпасного) діода є одним із найбільш поширених способів захисту ФП від зворотної напруги. Однак цей спосіб має технічні та виробничі проблеми, які іноді роблять таке рішення незручним і не вигідним. Зокрема, коли для виготовлення БС використовуються триперехідні ФП малої площі в великій кількості, застосування зовнішніх байпасних діодів суттєво збільшує вартість складання та зменшує розміри фотогенеруючої області БС. Наприклад, для захисту від зворотної напруги в малорозмірних триперехідних ФП марки SCTJ25 % компанією CESI було розроблено та запатентовано інноваційне технічне рішення [14]. Основна ідея нового методу захисту полягала у створенні в ФП інтегрованого монолітного захисного пристрою включення/вимкнення, який активується, коли ФП переходить у стан зворотної зміщення. У цьому випадку немає необхідності в обрізанні ФП в кутку для установки зовнішнього захисного діода. Струмопровідний захисний пристрій розміщується безпосередньо в ФП і, отже, не потрібно застосовувати додаткове міжз'єднання, як у випадку використання зовнішнього байпасного діода. Це знижує вартість складання та дозволяє збільшити ступінь заповнення БС. Інноваційні ФП SCTJ25 % у 2013 р. успішно пройшли кваліфікаційні

льотні випробування в складі БС демонстраційного мікросупутника TechDemoSat-1 (TDS-1) компанії Surrey Satellite Technology Ltd (SSTL), світового лідера у виробництві малих супутників.

На рис. 1 представлений діючий тестовий технологічний зразок умовно гнучкого Al-Pi сонячного модуля, виготовлений фахівцями ТОВ «НВП «ЛІТУ» на одноперехідних GaAs ФП марки SJ компанії ENE (Бельгія). Одноперехідні ФП SJ зі структурою GaAs/Ge мають розміри 40 x 20 мм, товщину 160 мкм, ККД 18 %. Фронтальні та тильні контакти ФП виготовлені з напиленого срібла, покритого золотом. Маса одного ФП не перевищує 1 г.

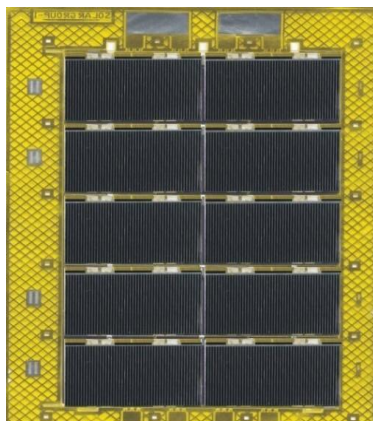


Рис. 1. Тестовий технологічний зразок умовно гнучкого, ультралегкого сонячного модуля з GaAs ФП без захисних стекол та без захисних діодів

Тестовий технологічний зразок умовно гнучкого, ультралегкого сонячного модуля складається з 10 ФП. В якості гнучкого носія використано фольгований поліімідний діелектрик ФДІ-А-50. ФП розміщуються в вікнах поліімідного шару тильною стороною до алюмінію, що дозволяє забезпечити простоту позиціонування ФП на носії та їх електричну ізоляцію. Гнучкі Al-Pi міжелементні з'єднання виконуються у вигляді петель з метою зменшення деформацій у модулі під час термоциклювання в умовах космічного польоту та забезпечення його тривалого терміну існування (рис. 2).

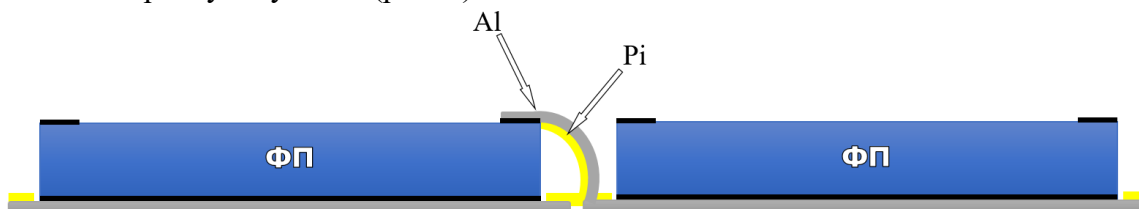


Рис. 2. Схематичне зображення з'єднання гнучкого плоского Al виводу з контактами ФП

З'єднання контактів ФП з Al виводами гнучкого носія здійснювалося ультразвуковим зварюванням електродами діаметром 100 мкм. Міцність зварних з'єднань на відрив, як для тильних, так і для фронтальних контактів ФП, складає 15 – 30 г (більше 200 кг/см²), що забезпечує високу надійність зварних з'єднань. Коефіцієнт заповнення тестового технологічного зразка сонячного модуля складає не менше 0,95.

2. КТР БС з покращеними питомими енергомасовими характеристиками для КА CubeSat-3U

2.1. КТР надлегких углепластикових панелей БС

Відомо, що ефективність розроблених конструкцій для космічної техніки значною мірою залежить від міцнісних та фізико-механічних характеристик усіх її елементів та їх стабільності, що забезпечується технологією виробництва [15]. Одним з основних конструкційних матеріалів для нових або модернізованих панелей БС космічного призначення

на сьогодні є високоміцні та високомодульні полімерні композиційні матеріали з супертонкими моношарами на основі вуглецевих волокон. У роботі [16] наведено результати експериментальних досліджень та виготовлення компанією ТОВ «Карболайн» (м. Харків, Україна) багатошарової вуглепластикової основи експериментальної панелі БС з препрегів з використанням вуглецевого волокна марки IMS 65 (Японія). Для отримання моношару товщиною 20 мкм односпрямований джгут з вуглецевого волокна лінійної щільності на спеціально виготовленому обладнанні розкочували, а після розкочування проводили просочення вуглеволокна епоксидним зв'язуючим ЕДТ-10П. Далі просочені моношари укладалися в пакети у прес-форму за заданою схемою армування. Виготовлення вуглепластикових основ здійснювалося вакуумно-автоклавним способом у плоскому автоклаві. При товщині багатошарової основи 0,3 мм її висока міцність і мінімізація прогину забезпечувалися за рахунок схеми армування $[90^\circ, 0^\circ, 90^\circ]$. Маса виготовленого зразку вуглепластикової основи з розмірами 420 x 430 мм (0,18 м²) склала 16,32 г, а питома маса по площі – 90,6 г/м². Прогин експериментальної надлегкої вуглепластикової основи в робочому положенні БС не перевищував 23 мкм при встановленні на неї багатоперехідних GaAs ФП.

На світовому ринку на теперішній час у вільному продажі з'явилася значна кількість різних нових типів серійно виготовлюваних міцних і легких пластин із вуглепластику. Наприклад, плоскі тонкі вуглепластики розмірами 500 x 500 мм і товщиною від 0,2 до 1 мм та більше компанії Sunlike (Китай), які виготовляються за технологією 3K Twill із питомою щільністю близько 1,5 г/см³. Такі вуглепластики призначені для виготовлення полегшених конструкцій різних типів для літальних апаратів, зокрема деталей для дронів. Вони також можуть бути використані як вуглепластикові основи панелей БС для КА класу CubeSat, що дозволяє суттєво покращити їхні питомі енергомасові характеристики. При цьому вартість таких вуглепластиків є відносно невисокою і становить близько 150 Євро/кг.

Під час створення вдосконалених панелей БС на вуглепластикових надлегких основах для КА класу CubeSat-3U в компанії ТОВ «НВП «ЛТУ» були запропоновані наступні КТР, які забезпечують високі міцнісні та фізико-механічні характеристики розроблюваних полегшених панелей БС для малих КА:

1) Надлегка панель БС являє собою плоску конструкцію розміром 327 x 82 мм (0,027 м²). Основа панелі складається з багатошарового вуглепластику з питомою густиною близько 1,5 г/см³ за схемою армування $[90^\circ, 0^\circ, 90^\circ]$. Товщина вуглепластикової основи становить не більше 0,5 мм, а маса – близько 20 г;

2) На фронтальну поверхню вуглепластикової основи за допомогою RTV-силікону полідиметилфенілсилоксанового типу марки RTV-S691 компанії Wacker Chemie AG (Німеччина) приклеюється електрично ізолююча поліімідна плівка марки DuPont™ Kapton® HN товщиною близько 50 мкм. При цьому шар клеєвого з'єднання вуглепластикової основи з діелектричною ПП плівкою має товщину близько 25 мкм.

Таким чином, КТР та обрані матеріали для вдосконалених жорстких надлегких вуглепластикових панелей БС для КА CubeSat – 3U мають забезпечити сумарну товщину панелі БС не більше 0,6 мм при загальній масі не більше 23 г та питомій масі за площею близько 852 г/м².

2.2. КТР надлегких сонячних модулів на гнучких Al-Pi носіях

Сучасні конструктори КА та літальних апаратів із використанням БС надають перевагу багатоперехідним ФП, виготовленим із декількох шарів світлопоглинальних гетероструктурних матеріалів, які ефективно перетворюють ділянки сонячного спектра з певними довжинами хвиль в енергію, використовуючи ширший спектр сонячного випромінювання. В аерокосмічній промисловості зазвичай застосовуються триперехідні ФП через їх високе співвідношення ефективності до вартості порівняно з іншими типами ФП. На рис. 3 наведено доступні наразі технології виготовлення серійних ФП із різними значеннями енергоефективності від провідних світових виробників.

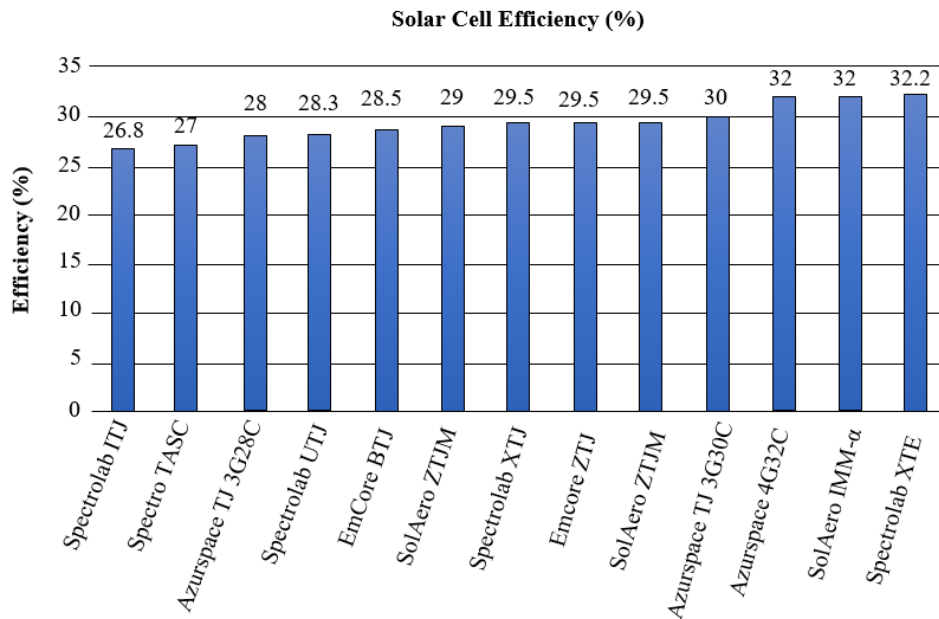


Рис.3. Ефективність серійних ФП провідних світових виробників [8]

З графіку на рис. 3 випливає, що у теперішній час компанія Azur Space Solar Power пропонує на світовому ринку різноманітні серійні багатоперехідні ФП великих розмірів з ефективністю від 28 до 32 %. Ці ФП виготовляються з наногетероструктурних матеріалів III і V груп періодичної таблиці з різними варіантами розмірів. Такі ФП з розміром 40 x 80 мм найчастіше застосовуються в малих КА та БС для інших застосувань. Найбільш ефективні чотириперехідні ФП 4G32C мають ККД близько 32 % при розмірах 40 x 80 мм ± 0,1 мм, із підвищеною робочою напругою до 3,0 В [8]. Проте багато виробників низькоорбітальних КА у всьому світі надають перевагу триперехідним ФП 3G30C з ККД 30 % та зібраним на їх основі коміркам ФП 3G30A із зовнішнім захисним діодом, виробництва компанії Azur Space. Це зумовлено тим, що ФП 3G30C і захищені фотоелектричні комірки 3G30A повністю пройшли кваліфікаційні випробування на відповідність стандарту ESA ECSS-E-CT-20-08C. Комірки ФП компанії Azur Space у складі БС на широко використовуваних жорстких вуглестових каркасах мають успішну та тривалу льотну історію для застосування на всіх орбітах функціонування КА. Починаючи з 1996 р. вони використовуються для високоефективних одно- та двоперехідних GaAs ФП, а з 2002 р. – для триперехідних ФП [17]. Також, за результатами успішної льотної кваліфікації, компанія Azur Space з 2017 р. розпочала серійне виробництво нових вдосконалених тонких ФП 3G30C з товщиною 80 мкм та комірок ФП на їх основі. Ця розробка дозволила знизити масу одного ФП 3G30C з 2,75 до 1,5 г (більше ніж на 40 %), що суттєво зменшує масу фотогенеруючої частини та збільшує енерговіддачу з одиниці маси перспективних БС [18].

Протягом останніх 10 років компанія ТОВ «НВП «ЛТУ» здобула успішний досвід співпраці з компанією Azur Space у виготовленні БС як для малих, так і для надмалих КА, розроблених ДП «КБ «Південне». Тому при виборі нових підходів для розробки умовно гнучких ультралегких сонячних модулів на основі Al-Pi гнучких друкованих плат було надано перевагу високоефективним ФП компанії Azur Space. Зокрема, було обрано триперехідні ФП 3G30C-advanced із ККД 30 % з інтегрованим захисним діодом, а також триперехідні тонкі ФП 3G30C-advanced товщиною 80 мкм із ККД 30 % і чотириперехідні ФП товщиною 110 мкм 4G32C із ККД 32 %.

У табл. 1 наведено основні характеристики ФП 3G30C advanced товщиною 80 мкм, тонких ФП 4G32C, а також ФП 3G30C advanced з інтегрованими захисними діодами компанії Azur Space.

Основні характеристики ФП за умов АМ0, $T=28\pm 2^\circ\text{C}$ на початок ТАІ

Тип ФП	ФП 3G30C Advanced з інтегрованим захисним діодом	ФП 3G30C Advanced, 80 мкм	ФП 4G32C
Розміри, мм	40 x 80		
Площа фотогенеруючої області, cm^2	30,18		
Напруга холостого ходу, В, не менше	2,7	2,69	3,45
Струм короткого замикання, А, не менше	0,520	0,520	0,457
Середній ККД, %, не менше	29,5	30	32
Напруга в точці максимальної потужності, В	2,41	2,41	3,0
Струм в точці максимальної потужності, А, не менше	0,504	0,502	0,433
Максимальна потужність, Вт	1,20	1,20	1,3
Коефіцієнт форми ВАХ (FF)	0,86	0,86	0,86
$dU_{\text{опт}}/dT$, мВ/ $^\circ\text{C}$ (флюєнс $5 \cdot 10^{14}$ е/см 2)	-7,2	-6,3	-8,8
$dI_{\text{опт}}/dT$, мА/ $^\circ\text{C}$ (флюєнс $5 \cdot 10^{14}$ е/см 2)	0,24	0,24	0,14
Питома маса ФП по площі, мг/см 2	≤ 86	≤ 50	≤ 56
Товщина ФП (без контактів), мкм	150	80	110
Маса ФП, г	2,75	1,5	$\leq 1,78$
Питома потужність по площі ФП, Вт/м 2	$\sim 400,0$	$\sim 400,0$	$\sim 433,0$
Питома потужність по масі ФП, Вт/кг	$\sim 436,0$	$\sim 800,0$	$\sim 730,0$

Параметри інтегрованого захисного діода ($T = 250^\circ\text{C} \pm 30^\circ\text{C}$):

- $U_{\text{пр}} (620\text{мА}) < 2,5 \text{ В}$;
- $I_{\text{зворот}} (2,8\text{В}) < 100 \text{ мкА}$;
- $I_{\text{прямий}} \text{ максимальний не менше } 2 \text{ А}$.

З розглянутих у табл. 1 характеристик ФП випливає, що за електричними параметрами найкращим є чотирикаскадний ФП 4G32C, який демонструє найвищі значення напруги холостого ходу і, відповідно, збільшення потужності та ККД на початок ТАІ. Крім того, при робочих температурах до плюс 65°C , які характерні для ряду КА класу CubeSat, потрібна менша кількість ФП у послідовному ланцюгу для необхідної робочої напруги БС, що сприяє підвищенню її надійності та технологічності виготовлення. Однак відсутність більш детальної офіційної інформації про результати використання ФП 4G32C у низькоорбітальних БС дозволяє розглядати їх застосування у теперішній час лише як перспективне. При виборі КТР для умовно гнучких надлегких сонячних модулів найкращі розрахункові оціночні значення питомої потужності за масою ~ 800 Вт/кг на початок ТАІ підтвердили найбільш ефективні триперехідні тонкі ФП марки 3G30C – advanced товщиною 80 мкм.

Таким чином, при розробці вдосконалених умовно гнучких ультралегких сонячних модулів на гнучких Al-Pi платах були обрані наступні КТР, що забезпечують їх високі міцнісні та фізико-механічні характеристики при суттєво покращених енергомасових показниках. Зокрема, запропоновані нові рішення для формування гнучкої Al-Pi комутаційної друкованої плати, встановлення та з'єднання ФП в електричну схему на гнучкій платі за допомогою УЗ зварювання, герметизації зварних з'єднань, а також приклеювання захисних скляних пластин на фронтальні поверхні ФП.

Гнучка комутаційна друкована плата для умовно гнучких надлегких сонячних модулів виготовляється методом фотолітографії з Al-Pi лакофольгового діелектрика власного вироб-

ництва компанії ТОВ «НВП «ЛТУ» марки ЛТУ-ФПА15-10. Al-Pi плата має розміри 327 x 82 мм з загальною товщиною не більше 25 мкм (товщина Al – 15 мкм, товщина Pi – 10 мкм) та масою не більше 1,4 г. У шарі алюмінію формуються гнучкі плоскі виводи для послідовного з'єднання ФП в модулі, в яких формуються області зварювання для електричного з'єднання гнучкої друкованої плати з тильними та фронтальними контактами ФП, виконаними з срібла, яке вкрито золотом (товщина срібла – 5 мкм, товщина золота – 180 нм). Далі в шарі алюмінію формуються перфораційні вікна з розміром (4x5) мм з кроком розміщення 10 мм та контактні площини для послідовного та паралельного з'єднання модулів у сонячній батареї. У шарі полііміда формуються посадочні вікна для позиціонування ФП, вікна для формування петель термомеханічних компенсаторів та вікна для зварювання з фронтальними контактами ФП. У зонах зварювання на шар алюмінію наноситься додатковий шар нікелю товщиною 2–4 мкм для створення стійкого до корозії з'єднання гнучкої друкованої плати з ФП. Обрана товщина покриття нікелю забезпечує максимальну міцність з'єднання при ультразвуковому зварюванні (діаметр електрода 170 мкм, ширина алюмінієвого плоского виводу в зоні зварювання 150 мкм). На контактні площинки в шарі алюмінію для з'єднання модулів між собою в БС методом пайки наноситься покриття Ni-SnBi товщиною близько 25 мкм.

На гнучку комутаційну плату встановлюються тонкі ФП 3G30C – Advanced (80 мкм) з ККД 30 %. Група з семи послідовно включених тонких ФП розмірами 40 x 80 мм між собою об'єднується в електричну схему типу 7S1P за допомогою Al міжз'єднань і токопровідних шин у гнучкій комутаційній платі шляхом ультразвукового зварювання. Для цього на ФП, які розташовані в технологічній оснастці тильною стороною вгору, укладається і позиціонується гнучка друкована плата так, щоб ФП збіглися з посадковими вікнами в шарі полііміду. Ультразвуковим зварюванням електродом діаметром 170 мкм здійснюється з'єднання областей зварювання на платі з тильними контактами ФП. Гнучка друкована плата з ФП перевертається фронтальною стороною ФП вгору. Гнучкі комутуючі виводи для послідовного з'єднання ФП у модулі формуються по вікнах в шарі полііміду та позиціонуються над фронтальними контактами ФП з одночасним формуванням петель термокомпенсаторів і зварюванням їх через вікна в полііміді.

На фотогенеруючу поверхню ФП оптично прозорим клеєм приклеюються захисні скляні пластини. Захисні скляні пластини виготовлені зі скла марки CMX товщиною 100 мкм і розмірами 40 x 80 мм компанії Qiortiq Space Technology (Велика Британія). Питома щільність скла становить 2,6 г/см³, коефіцієнт теплового лінійного розширення (КТЛР) – $6 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Маса одного скла не перевищує 0,83 г. Захисне скло приклеюється прозорим силіконовим адгезивним матеріалом марки RTV-S690 компанії Wacker Chemie AG (Німеччина). Питома щільність клею – 1,06 г/см³. Розміри клеєвого шару: площа – 30 см², товщина – не менше 30 мкм. Маса клеєвого шару для приклеювання одного скла складає близько 0,09 г.

Кремнієві захисні діоди трикутної форми типу S By-pass diode компанії AZUR SPACE Solar Power встановлюються на гнучку комутаційну плату сонячного модуля за допомогою ультразвукового зварювання (діаметр електрода 170 мкм, ширина алюмінієвих плоских виводів у зоні зварювання 150 мкм). Високоєфективні кремнієві діоди призначені для захисту триперехідних GaAs ФП марки 3G30C – Advanced (80 мкм). Площа діода складає 1,19 см²; маса – менше 0,03 г; товщина – 130±30 мкм; товщина срібних контактів – 3 – 11 мкм.

У табл. 2 представлені оціночні розрахункові значення основних фізико-технічних та питомих електроенергетичних характеристик різних варіантів умовно гнучких ультралегких сонячних модулів на гнучких алюміній-поліімідних платах.

Оціночні значення основних фізико-технічних та питомих електроенергетичних характеристик умовно гнучких сонячних модулів

Тип модуля	Характеристики					
	Розміри, мм x мм	Товщина, мкм	Маса, г	Питома енерговіддача на початок ТАІ для АМ0, T=25°C		
				По площі модуля, Вт/м ²	По масі модуля, Вт/кг	
1. Умовно гнучкий сонячний модуль на ФП (7 шт) великої площі з ФП 3G30C – Advanced з інтегрованим захисним діодом с ККД 30 %.	327 × 82	305	27,1	~ 336	~ 309	
	40 x 80	~ 150	~ 2,75			
	40 x 80	~ 100	~ 0,83			
	40 x 80	30,0	0,09			
1.1. Захисне скло марки Qiortiq CMX (7 шт).	40 x 80	~ 100	~ 0,83			
1.2. Адгезивний шар з прозорого силікону марки RTV-S690 (7 шт).	40 x 80	30,0	0,09			
1.3. Гнучка основа модуля з теплопровідного фольгованого поліімідного діелектрика марки ЛТУ-ТФПА15-10 (Al-15 мкм, Pi – 10 мкм) з теплопровідністю від 0,8 до 2,0 Вт/м•К.	327 × 82	25,0	1,4			
2. Умовно гнучкий сонячний модуль на комірках ФП (7 шт) великої площі з тонкими ФП 3G30C – Advanced, 80 мкм з ККД 30 %.	327 × 82	235	18,55	336	453	
	40 x 80	80,0	~ 1,5			
	2.1. Захисне скло марки Qiortiq CMX (7 шт).	40 x 80	100			~ 0,83
	2.2. Адгезивний шар з прозорого силікону марки RTV-S690 (7 шт).	40 x 80	30			0,09
	2.3. Кремнієвий зовнішній захисний діод типу S By-pass diode компанії Azur space (7 шт).	10,9x10,9	30,0			0,03
	2.4. Гнучка основа модуля з теплопровідного фольгованого поліімідного діелектрика марки ЛТУ-ТФПА15-10 (Al-15 мкм, Pi – 10 мкм) з теплопровідністю від 0,8 до 2,0 Вт/м К.	327 × 82	25,0			1,4
3. Умовно гнучкий сонячний модуль на комірках ФП (7 шт) великої площі з тонкими ФП 4G32C з ККД 32 %.	327 × 82	265	20,51	364	444	
	40 x 80	110	1,78			
	3.1. Захисне скло марки Qiortiq CMX (7 шт).	40 x 80	100			~ 0,83
	3.2. Адгезивний шар з прозорого силікону марки RTV-S690 (7 шт).	40 x 80	30			0,09
	3.3. Кремнієвий захисний діод типу S By-pass diode компанії Azur space (7 шт).	10,9x10,9	30			0,03
	3.4. Гнучка основа модуля з теплопровідного фольгованого поліімідного діелектрика марки ЛТУ-ТФПА15-10 (Al-15 мкм, Pi – 10 мкм) з теплопровідністю від 0,8 до 2,0 Вт/м•К.	327 × 82	25			1,4

3. КТР вдосконалених БС на углепластикових надлегких панелях та Al-Pi сонячних модулях для КА CubeSat – 3U

При виборі КТР нових вдосконалених БС на углепластикових надлегких панелях для КА класу CubeSat – 3U були запропоновані наступні технічні рішення, що забезпечують їх високі міцнісні та фізико-механічні характеристики при суттєво покращених енергомасових показниках.

Надлегка панель БС представляє собою плоску конструкцію на основі багатошарового углепластика з розмірами 327 x 82 мм і сумарною товщиною не більше 600 мкм. Загальна маса панелі БС не перевищує 23 г (0,7 кг/м²). На фронтальну поверхню углепластикової основи панелі БС приклеєна електрично ізолююча теплопровідна Pi плівка виробництва компанії ТОВ «НВП «ЛТУ» марки ЛТУ-ТПМ30 з теплопровідністю в діапазоні від 0,8 до 2,0 Вт/(м•К) з товщиною порядку 30 мкм [19]. Pi плівка приклеєна за допомогою RTV-силікону марки RTV-S691 Wacker Chemie AG (Німеччина) з теплопровідністю 0,39 Вт/(м•К) і питомою щільністю порядку 1,42 г/см³. При цьому клейовий шар з адгезивного матеріалу RTV-S691 має товщину близько 25 мкм.

На теплопровідну Pi плівку, яка покриває углепластикову панель БС, встановлений умовно гнучкий надлегкий сонячний модуль на основі ФП марки 3G30C – Advanced, 80 мкм. надлегкий сонячний модуль з ККД 30 % має товщину близько 235 мкм та масу приблизно 18,55 г. Сонячний модуль приклеєний до Pi плівки на панелі БС за допомогою адгезивного матеріалу RTV-S691 з товщиною клейового шару близько 25 мкм. Жорстка надлегка углепластикована панель БС з теплопровідним Pi покриттям забезпечує покращені теплові характеристики ФП у сонячному модулі та гарантує високу надійність і тривалість експлуатації БС, зокрема за плюсових температур до 85 °С.

Нові підходи при створенні вдосконалених надлегких БС для надмалих КА на углепластикових панелях та Al-Pi сонячних модулях для КА класу CubeSat – 3U дозволяють забезпечити можливість виготовлення БС з розмірами 327 x 82 мм з загальною товщиною не більше 840 мкм. При цьому загальна маса БС може бути не більше 42 г. Розрахункова питома енерговіддача БС на основі захищених тонких ФП марки 3G30C – Advanced, 80 мкм на початок ТАІ для умов АМ0, T= 25°C по площі становить близько 336 Вт/м². Розрахункова питома енерговіддача БС по масі становить не менше 200 Вт/кг.

Висновок

Нові підходи для вибору КТР вдосконалених умовно гнучких надлегких сонячних модулів на гнучких Al-Pi платах з застосуванням у них найбільш сучасних тонких багатоперехідних GaAs ФП нового покоління з ККД 30 – 32 % підтверджують принципову можливість виготовлення умовно гнучких надлегких сонячних модулів площею близько 250 см² з питомою потужністю по площі близько 336 – 364 Вт/м² та суттєво збільшеною питомою потужністю по масі не менше ніж 309 – 453 Вт/кг (для ФП з ККД 30 та 32 % відповідно) на початок ТАІ для БС надмалих КА класу CubeSat, а також для сонячних модулів для БС стратосферних БПЛА (квазісупутників).

Запропонована авторським колективом технологія може бути застосована також для виготовлення вдосконалених надійно захищених БС на вуглепластикових надлегких панелях і умовно гнучких сонячних модулях на основі тонких ФП марки 3G30C – Advanced товщиною 80 мкм з ККД 30 % компанії AZUR SPACE Solar Power для КА класу CubeSat – 3U. Вибрані нові підходи дозволяють забезпечити можливість виготовлення БС з сумарною товщиною до 840 мкм та масою не більше 42 г, що в 2,5 рази менше, ніж у вітчизняного надмалого КА «GS-1» класу CubeSat – 3U. При цьому розрахункова питома енерговіддача таких БС на початок ТАІ для умов АМ0, T= 25°C по площі може становити близько 336 Вт/м². Розрахункова питома енерговіддача БС по масі може становити не менше 200 Вт/кг при питомій масі БС по площі близько 1,55 кг/м².

Список літератури:

1. Храмов Д.А. Мініатюрні супутники стандарту CubeSat // Космічна наука і технологія. 2009. Т. 15. № 3. С. 21–31.
2. Науково-технічні засади розробки, виготовлення та експлуатації систем електропостачання космічних апаратів : моногр. / К.В. Безручко, В.М. Борщов, М.В. Замірець, О.М. Лістратенко та ін. Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. Н. С. Жуковського «ХАІ», 2011. 218 с.
3. CubeSat Solar Panels <https://www.isispace.nl/product/isis-cubesat-solar-panels> // офіційний сайт.
4. Clyde Space Ltd. Small Satellite Solar Panels // High Efficiency Solar Arrays For all Types Small Satellites and CubeSats, <http://www.clyde-space.com>. // офіційний сайт.
5. CubeSat Solar Panels, <http://dhvtechnology.com/pages/products/cubesat-solar-panel> // офіційний сайт.
6. CubeSat Solar Panels, <https://www.endurosat.com/cubesat-category/cubesat-solar-panels> // офіційний сайт
7. Борщов В.М., Лістратенко А.М., Проценко М.А., Тимчук І.Т. та ін. Сучасні комплектуючі та матеріали для вітчизняних сонячних батарей (СБ) космічного призначення // Радіотехніка. 2019. Вип. 199. С.12–28.
8. Сучасні технології малих космічних апаратів <https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa-2020/power>.
9. Сонячні батареї автоматичних космічних апаратів (компонування на КА, конструкція вузлів, проектні розрахунки) / К.В. Безручко, В.Ф. Гайдуков, С.В. Губін, В.І. Драновський та ін. : навч. посіб. для техн. вишів і спец. аерокосм. профілю. Харків : Нац. аерокосм. ун-т, 2001. 276 с.
10. Strobl G.F.X., Fuhrmann D., Guter W., Khorenko V., Köstler W. and Meusel M. About AZUR's 3G30-advanced Space Solar Cell and next Generation Product // Proc. of the 27th EUPVSEC, Frankfurt, p. 1B010.3, 2012.
11. Strobl G.F.X., Ebel L., Fuhrmann D., Guter W., Kern R., Khorenko V., Köstler W., Meusel M. Development of lightweight space solar cells with 30 % efficiency at end of life // Proc. of the 40th IEEE PVSC Conference, Denver/Colorado, June 8-13, 2014.
12. Борщов В.Н., Антонова В.А., Лістратенко А.М., Тимчук І.Т. Модуль фотоперетворювачів на основі поліімідного носія для сонячних батарей космічного застосування // Технологія приладобудування. 2002. №1. С.19–21.
13. Патент України на винахід № 85333 “Спосіб виготовлення гнучкого модуля сонячної батареї”/ Борщов В.М., Лістратенко О.М., Антонова В.А., Тимчук І.Т., Буєров Г.В., Костишин Я.Я., Проценко М.А. Дата реєстрації 12.01.2009 р.
14. CESI Patent 0001356624- 3/3/2009.
15. Коваленко В.А. Фундаментальні характеристики полімерних композиційних матеріалів та їхній вплив на показники якості конструкцій ракетно-космічної техніки // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології : зб. наук. пр. Нац. аерокосм. ун-ту ім. М.С. Жуковського «ХАІ». Вип. 51. Харків : ХАІ, 2011. С. 66–74.
16. Гаврилко В.В., Коваленко В.А., Кондрат'єв О.В., Потапов О.М. Розробка макетного зразку та технології виготовлення тестової панелі сонячної батареї космічного апарату // Питання проектування та виробництва конструкцій літальних апаратів : зб. наук. пр. Нац. аерокосм. ун-ту ім. М.С. Жуковського «ХАІ». Вип. 3 (71). Харків : ХАІ, 2012. С. 110–117.
17. Strobl G.F.X., Fuhrmann D., Guter W., Khorenko V., Köstler W. and Meusel M. About AZUR's 3G30-advanced Space Solar Cell and next Generation Product // Proc. of the 27th EUPVSEC, Frankfurt, p. 1B010.3, 2012.
18. Strobl G.F.X., L. Ebel, Fuhrmann D., Guter W., R. Kern, Khorenko V., Köstler W., Meusel M. Development of lightweight space solar cells with 30 % efficiency at end of life.
19. Заявка на корисну модель України № u 2024 01467 «Спосіб виготовлення гнучкого теплопровідного лакофольгового поліімідного матеріалу». Дата реєстрації 19.03.2024 р. Винахідники: Нікітський Г.І., Лістратенко О.М., Кравченко О.В., Борщов І.В.

Надійшла до редколегії 07.10.2024

Відомості про авторів:

Борщов Вячеслав Миколайович – д-р техн. наук, професор, ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ», перший заступник директора – головний конструктор; Україна; e-mail: viatcheslav.borshchov@cern.ch; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5579-8932>

Лістратенко Олександр Михайлович – канд. техн. наук, ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ», провідний науковий співробітник; Україна; e-mail: sasha.listratenko.12@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7643-5295>

Проценко Максим Анатолійович – канд. техн. наук, ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ», начальник відділення – заступник головного конструктора; Україна; e-mail: max.protsenko.1978@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9313-1701>

Тимчук Ігор Трохимович – канд. техн. наук, ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ», головний технолог; Україна; e-mail: ihortymchuk78@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6436-7253>

Кравченко Олександр Вікторович – ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ», начальник відділу; Україна; e-mail: kravcenkoaleksandr671@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7145-4304>

Білоусов Костянтин Георгійович – ДП «КБ «Південне», головний конструктор; Україна; e-mail: cgbelousov@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6436-3359>

Перекопський Іван Терентійович – ДП «КБ «Південне», начальник сектору; Україна; e-mail: perekop25@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5420-1280>