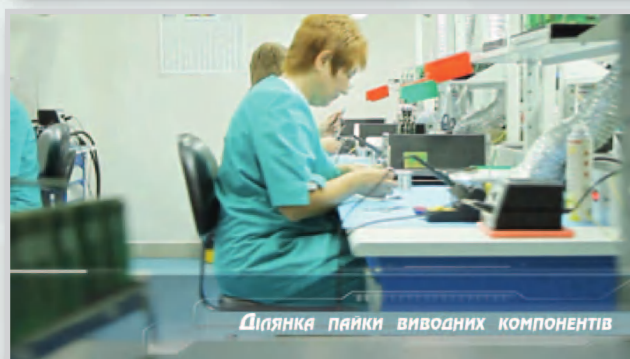




Прототипування друкованих плат за кілька годин
з обладнанням компанії LPKF

У номері:

- Особливості корпусів багатокристалльних модулів
- Корпуси для фотонних ІМС та пристроїв
- **Настанова з інноваційних рішень компанії LPKF для створення прототипів електронної апаратури**
- Технологія інтелектуальних будівель: розумний шлях зниження викидів парникових газів
- Локалізація автономного мобільного робота
- Як забезпечити відповідність систем управління стандартам промислової функціональної безпеки
- Пульсова діагностика та засоби візуалізації і обробки пульсової хвилі
- Набір для розробки програмного забезпечення Raspberry Pi Pico
- Raspberry Pi камера зі штучним інтелектом
- Програма моделювання аналогових та цифрових пристроїв QSPICE, частина 4



КОНТРАКТНЕ ВИРОБНИЦТВО ЕЛЕКТРОНІКИ

Повний цикл контрактного виробництва електроніки:

- проектування та виготовлення друкованих плат та трафаретів за стандартом IPC-A-600J
- комплексне постачання комплектуючих елементів
- автоматизований монтаж компонентів за технологією SMT та THT, включаючи монтаж у азотному середовищі, відповідно до стандарту IPC-A-610G (до 2 500 000 SMD-компонентів на добу)
- монтаж друкованих плат будь-якої складності при серійному та дрібносерійному виробництві
- нанесення лазерного маркування на друковані плати
- 100% автоматичний оптичний контроль якості монтажу
- внутрішньосхемний контроль готових виробів
- нанесення акрилових, силіконових, поліуретонових конформних (захисних) покриттів
- проведення кліматичних випробувань
- проведення механічних випробувань на вібростенді
- різання та зачистка проводів, обтискання контактів, виготовлення кабельних джгутів.

Система менеджменту якості фірми сертифікована на відповідність вимогам стандартів ISO 9001:2015, ISO 14001:2015, IATF 16949:2016 і ISO 13485:2016.

Автоматизована паяння вивідних компонентів виконується на установці селективного паяння PowerSelective виробництва компанії SEHO. Паяння виконується міні-хвильово в азотному середовищі. Швидкість паяння 1...5 секунди на точку. Швидкість паяння роз'ємів 3 мм за секунду.

Україна, 03061, Київ,
вул. Михайла Донця, 6

тел./факс: (044) 201-0202, (057) 719-6718, (0562) 319-128, (095) 283-8246,
(048) 734-1954, (095) 274-6897, info@vdmiais.ua; www.vdmiais.ua

**ЕЛЕКТРОННІ
КОМПОНЕНТИ
І СИСТЕМИ**2024 жовтень–грудень
№ 4 (248)МАСОВИЙ
НАУКОВО-
ТЕХНІЧНИЙ
ЖУРНАЛ**Засновник і видавець:**
НАУКОВО-ВИРОБНИЧА
ФІРМА VD MAISЗареєстрований
Міністерством інформації
України 24.07.96 г.
Свідоцтво про реєстрацію:
серія KB, № 2081Б
Видається з травня 1996 г.**Директор фірми VD MAIS:**
В.О. Давиденко**Головний редактор:**
В.О. Романов**Редакційна колегія:**
В.О. Давиденко
В.В. Макаренко
Д-р Ілля Брондз,
Norwegian Drug Control
and Drug Discovery Institute
(NDCDDI) AS, Ski, Norway**Адреса редакції:**Україна, Київ,
вул. М. Донца, 6**Тел.:** (0-44) 492-8852, 201-0202**Факс:** (0-44) 202-1110**E-mail:** ekis@vdmajs.ua**Інтернет:** www.vdmajs.ua
www.ekis.kiev.ua**Адреса для переписки:**

Україна, 03061 Київ, вул. М. Донца, 6

КОРПУСИ ДЛЯ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ ІМСМ. Мота
Особливості корпусів багатокристалних модулів3П. О'брайен
Корпуси для фотонних ІМС та пристроїв6**ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ****Настанова з інноваційних рішень компанії LPKF для створення прототипів електронної апаратури, частина 112****ТЕХНОЛОГІЇ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ**Дж. Ланнан
Технологія інтелектуальних будівель: розумний шлях зниження викидів парникових газів20С. Пімпалкар
Локалізація автономного мобільного робота за допомогою інерціального вимірювального вузла: нова технологія для точної навігації24Б. Боррес, К. Макатангей
Як забезпечити відповідність систем управління стандартам промислової функціональної безпеки за допомогою високоефективного супервізора напруги, частина 130В. Лаврентьев, О. Вороненко
Пульсова діагностика та засоби візуалізації і обробки пульсової хвилі38В. Макаренко
Набір для розробки програмного забезпечення Raspberry Pi Pico44В. Макаренко
Raspberry Pi камера зі штучним інтелектом51**МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ**В. Макаренко
Програма моделювання аналогових та цифрових пристроїв QSPICE, частина 460**ЗМІСТ EKIC****Зміст журналу за 2024 рік63**Перепечатка опублікованих в журнале
матеріалів допускається с разрешения редакції.
За рекламную інформацію відповідальність несеєт
рекламодагель.

CASES FOR SPECIALIZED INTEGRATED MICROCIRCUITS

M. Mota
Multi-Die Chip Design: Multi-Chip Module Packaging Types..... 3

P. O'Brien
Packaging Integrated Photonic Devices - A Comprehensive Guide 6

TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

TechGuide of LPKF's innovative prototyping solutions, part 1 12

INTERNET OF THINGS TECHNOLOGIES

J. Lannan
Intelligent building technology: the smart way to lower greenhouse gas emissions 20

S. Pimpalkar
Enhancing Robotic Localization with IMUs: A Fundamental Technology for Precise Navigation 24

B. Borres, C. Macatangay
Improving Industrial Functional Safety Compliance with High Performance Voltage Supervisors, Part 1 30

V. Lavrentjev, O. Voronenko
Pulse diagnostics and means of visualization and pulse wave processing 38

V. Makarenko
Raspberry Pi Pico SDK 44

V. Makarenko
Raspberry Pi AI Camera 51

V. Makarenko
Mean Well stand-alone inverters 51

MODELING OF ELECTRONIC DEVICES

V. Makarenko
QSPICE is a free program for simulating analog and digital devices, part 4 60

CONTENT EKIS

Content EKIS 2024..... 63



ELECTRONIC COMPONENTS AND SYSTEMS

October-December 2024
 No.4 (248)

Scientific and Technical Journal

Founder and Publisher:
 Scientific-Production Firm
VD MAIS

Director
 V.O. Davidenko

Head Editor
 V.O. Romanov

Editorial Board
 V.O. Davidenko
 V.V. Makarenko
 Dr. I. Brondz,
 Norwegian Drug Control
 and Drug Discovery Institute
 (NDCDDI) AS, Ski, Norway

Address:
 M. Dontsia Str., 6,
 03061 Kyiv, Ukraine
Tel.:
 (380-44) 201-0202,
 492-8852 (multichannel)
Fax:
 (380-44) 202-1110

E-mail:
 ekis@vdmajs.ua
Web address:
 www.vdmajs.ua
 www.ekis.kiev.ua
 Printed in Ukraine

ОСОБЛИВОСТІ КОРПУСІВ БАГАТОКРИСТАЛЬНИХ МОДУЛІВ *

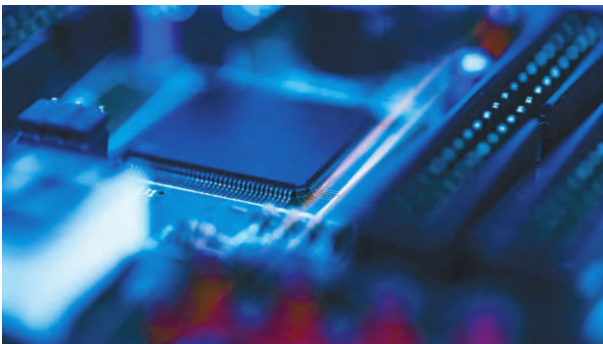
На сьогодні стандартні корпуси інтегральних мікросхем вже не задовольняють розробників кристалів. Поява багатокристалівних мікросхем, мікросхем НВЧ, оптичних мікросхем викликало появу нових конструктивних рішень. Один з таких напрямків розглядається у цій статті.

М. Мота

MULTI-DIE CHIP DESIGN: MULTI-CHIP MODULE PACKAGING TYPES

Abstract – Now standard packages of chips are no longer satisfying the chip developers. The appearance of multi-die chips, microwave frequency chips, optical chips and so on caused new design solutions. One of these areas is considered in this article.

М. Мота



Сучасна мікроелектронна промисловість знаходиться на переломній точці, де перетин розмірів кристалів та системної складності дає можливість переосмислити та вдосконалити архітектуру напівпровідникових чіпів, щоб відповідати вимогам сьогодення та найближчого майбутнього. З одного боку, кристали або чіпи стають дедалі складнішими, що обумовлено потребами з інтенсивних обчислень, які виникають у високопродуктивних суперкомп'ютерах (high-performance computers – HPC) та системах з штучним інтелектом. У той же час розробники ІМС прагнуть забезпечити оптимальні потужність, продуктивність, площу кристалів з мінімальними затримками. У цьому нові технології корпусів ІМС відіграють важливу роль. Конструкція ІМС, що містить декілька кристалів, виявилася на сьогодні гідним варіантом для досягнення поставлених цілей. Багатокристалівна система в одному корпусі (system-in-package – SiP) забезпечує ряд наступних переваг:

- створення ІМС з більшою функціональністю
- швидке створення кількох простих кристалів замість одного досить складного

- зменшення проєктного ризику при використанні вже перевірених на практиці кристалів
- зменшення потужності системи зі збільшенням пропускної здатності порівняно з використанням двох окремих мікросхем в окремих корпусах
- оптимальні розміри складної системи з нижчою вартістю
- підвищена продуктивність системи завдяки низькій затримці в порівнянні з використанням двох або кількох окремих мікросхем.

Сучасні технологічні можливості мають декілька варіантів для підтримки проєктних рішень із кількома кристалами, починаючи від стандартних 2D корпусів до розширених 2.5D і складних 3D корпусів. Насправді немає єдиного корпусу, який би був оптимальним для всіх типів нових ІМС з різними функціями та призначенням. Вибір, як правило, ґрунтується на цілях проєкту, а також витратах на розробку. У цій статті автором аналізується декілька найновіших типів корпусів багатокристалівних ІМС або модулів з урахуванням технології, яка підтримує процес проєктування кінцевого виробу на базі цих корпусів.

Чотири основні вдосконалені типи корпусів мікросхем. Сучасний напрямок у системному проєктуванні являє собою створення у нових корпусах багатокристалівних модулів на основі невеликих чіпів. Це, по суті, невеликі чіпи, які спеціально розроблені для об'єднання у великі і складні ІМС. Такі мікросхеми містять функціональні схемні вузли, які називаються малими кристалами або чіплетами, і інтегровані багатокристалівні модулі. Типи корпусів розрізняються за щільністю та складністю.

На рис. 1 показано основні типи корпусів, а також

* Mota M. *Multi-Die Chip Design: Multi-Chip Module Packaging Types*. <https://www.synopsys.com/blogs/chip-design/multi-chip-module-packaging-types.html>. Скорочений переклад з англійської і коментарі В. Романова.

Технології корпусів сучасних ІМС

Чотириохватна інтеграція ІМС до кінця 2024 року (приблизно 2.5D)

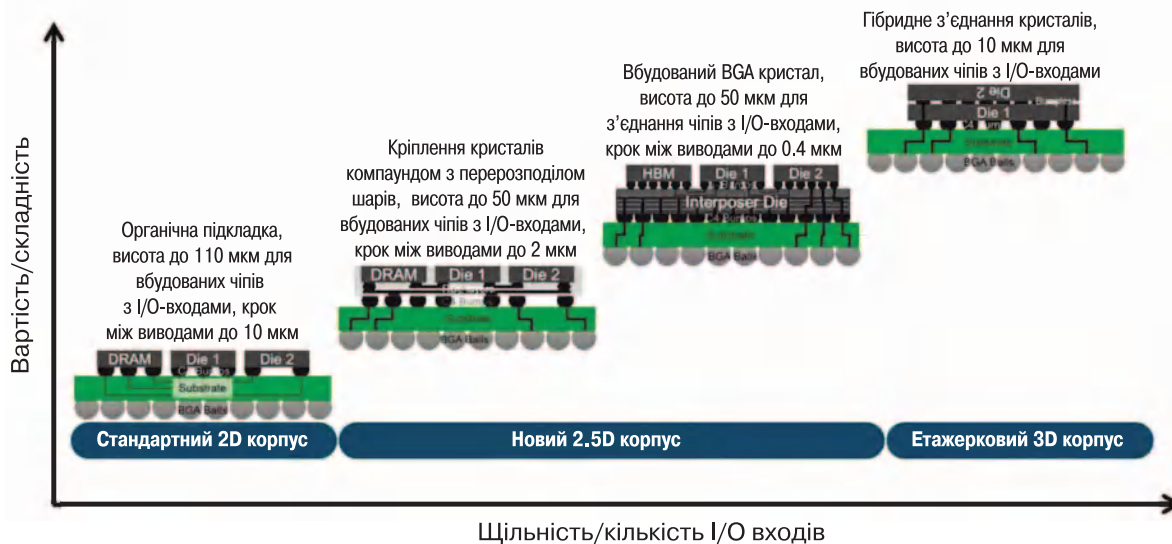


Рис. 1. Чотири типи корпусів для багатокристалів ІМС

розглянуті їхні переваги та недоліки для різних застосувань.

Корпус з органічною підкладкою. Ці багатокристалівні ІМС мають найменшу кількість можливих з'єднань. Вони являють собою двомірний стандартний корпус, є відносно недорогими і мають на сьогодні широке використання. Ці модулі підтримують функції тестування з недорогим скринінгом рівня пластини для завідомо справного кристала, але функції тестування та ремонту несправних з'єднань у цих ІМС, як правило, відсутні. Органічні підкладки також відзначаються хорошим розсіюванням тепла, низьким викривленням і можливістю великої інтеграції кристалів без суттєвих технологічних обмежень.

Корпус з кріпленням кристалів компаундом з перерозподілом шарів – RDL Fan Out. Ця конструкція корпусу не набула широкого поширення, відносно нові корпуси типу RDL fan-out забезпечують щільність, подібну до щільності багатокристалівних ІМС з вбудованими BGA виводами, але мають меншу складність та меншу вартість. Це вдосконалений тип корпусу, який об'єднує кілька кристалів, що забезпечує кращу продуктивність і більше операцій вводу-виводу для різноманітних IoT, мережевих і обчислювальних застосувань. У цьому корпусі з'єднувальні провідники можуть бути направлені всередину та назовні. Це дозволяє створювати тонкі корпуси з великою кількістю операцій вводу-виводу.

Багатокристалівний модуль з проміжним

кремнієвим кристалом з BGA виводами. У кремнієвому проміжному модулі міститься з'єднувальний кристал, який називається інтерпозером. Цей тип корпусу 2.5D забезпечує щільне з'єднання за допомогою спеціальних мікроступів – технології вертикального з'єднання для складених кристалів. Через складну збірку цього типу корпусів, а також через вплив технологічних мікронерівностей існує проблема з забезпеченням необхідної продуктивності.

Постачальники корпусів вирішують це за допомогою заходів із забезпечення якості, а також механізмів тестування та ремонту в міжкристалівному інтерфейсі. Кремнієві інтерпозери можуть мати тисячі паралельних ліній зв'язку, і ці лінії розроблені з можливістю перевірки надійного підключення, визначення наявності розриву та перенаправлення зв'язку за потреби.

Наприклад, якщо інтерфейс має 1000 ліній зв'язку, є можливість закласти у з'єднувальний кристал таких ліній на 10% більше, наприклад, 1100, забезпечуючи надлишковість для перемаршрутизації сигналів у разі виникнення відмов. Однак із кремнієвими проміжними елементами у такому корпусі важко екранувати окремі кристали. Крім того, цей тип корпусу має знижене у порівнянні з іншими корпусами розсіювання тепла.

Корпус з гібридним з'єднанням. Тип тривимірного корпусу який забезпечує найвищу щільність разом із високою енергоефективністю. В ньому існують наскрізні кремнієві переходи для підключення

ня. Завдяки двом кристалам, з'єднаним разом і працюючим як одне ціле, немає необхідності витрати енергії під час керування каналами, а потужність кожного каналу вводу-виводу можна зменшити за потреби. Порівняно з інтерпозерами, корпус з гібридним з'єднанням зараз представляє більшу складність і вартість. Він ідеально підходить для таких застосувань, як системи з штучним інтелектом, які потребують значних можливостей обробки даних разом із малою затримкою сигналів. Розташування пам'яті над процесором у такому корпусі забезпечує необхідну продуктивність і мінімально можливу затримку.

У минулому розробники спочатку проектували свою систему на кристалі (SoC), а потім займалися розробкою корпусу. Сьогодні – це вже застарілий підхід. Проєкт сучасної системи на кристалі (SiP) полягає в одночасному об'єднанні усіх складових, а саме системи як структури, архітектури і принципової схеми, відповідних кристалів для реалізації системи та оптимальної конструкції корпусу. Деякі елементи такого підходу розглянемо далі.

Інтерфейс die-to-die або міжкристальний інтерфейс багатокристалного модуля. Це невеликий вузол, який забезпечує зв'язок між двома або більше кристалами, розташованими в одному корпусі. Інтерфейс потрібно розробляти для кожного конкретного типу корпусу.

Наприклад, проміжний інтерфейсний вузол або інтерпозер не призначений для підтримки високих швидкостей обміну даними між кристалами, а високошвидкісний IP-інтерфейс між кристалами підтримує високу швидкість передачі даних. Подібним чином характеристики каналів передачі даних є кращими в корпусах з органічною підкладкою.

Індустрія міжкристальних інтерфейсів (die-to-die) відносно молода, багато розроблених інтерфейсів запатентовано, що обмежує їх використання іншими розробниками. Тому використання стандартних IP-інтерфейсів є більш привабливим для використання у нових розробках. Чотири різних об'єднання підтримують п'ять системних стандартів для сучасних корпусів ІМС:

- ICO-OIF відповідає за стандарт XSR зі швидкістю передачі даних 112Гб/224Гб для корпусів 2D, призначених для оптичних мереж
- CHIPS ALLIANCE відповідає за стандарт AIB,

який підтримує швидкість передачі даних 6G для перемикання кристалів у корпусі, зазвичай призначених для систем mil-aero

- Universal Chiplet Interconnect Express визначає вимоги до корпусів 2D, 2.5D багатокристалних модулів з швидкістю передачі даних 16Гб/32Гб.

- Open Compute відповідає за стандарти BOW і OHBI, обидва визначені для корпусів D і 2.5D з швидкістю передачі даних 8Гб/16Гб.

З часом деякі з цих стандартів можуть стати менш актуальними на основі потреб ринку. На думку автора, стандарт Universal Chiplet (UCle) має можливість у майбутньому стати універсальним для інтерфейсів die-to-die. Підтримуючи необхідні параметри щодо обміну даними, він охоплює найбільш широкий спектр використання, а також усі типи сучасних корпусів для багатокристалних системних проєктів. Завдяки підтримці швидкості передачі даних до 32 Гбіт/с на один контакт стандарт UCle також придатний до використання і у майбутніх корпусах.

ВИСНОВКИ

Корпуси ІМС з багатьма кристалами на сьогодні забезпечують проєкти з інтенсивних обчислень для суперкомп'ютерів і систем з штучним інтелектом та підтримують високу продуктивність практично без підвищення вартості системи. Інновації в технологіях корпусів багатокристалних модулів, а також нові інтерфейси, що базуються на діючих стандартах, дають змогу корпусам із кількома кристалами надійно працювати у високопродуктивних обчислювальних системах. Передові технології корпусів ІМС є лише одним із прикладів безперервних інновацій в мікроелектронній галузі, викликаних зростаючою складністю сучасних систем.

VD MAIS Контрактне виробництво електроніки (по стандарту IPC-A-610)



- автоматизований монтаж ЕП/Ю-компонентів (до 2,5 млн на добу)
 - автоматизоване селективне паяння компонентів, що монтуються в отвори
 - монтаж прототипів друкованих плат
 - 100% автоматичний оптичний контроль якості монтажу
 - виготовлення дослідних зразків виробів
 - дрібно- та великосерійне виробництво
 - 10-річний досвід контрактного виробництва
 - гарантія якості
- Сертифікація на відповідність вимогам стандартів ISO 9001:2015, ISO 14001:2015, IATF 16949:2016 і ISO 13485:2016.
Ціни оптимальні.

Україна, 03061 Київ, вул. М. Донця, 6
Тел.: (0-44) 201-0202, 492-8852, факс: (0-44) 202-1110
e-mail: info@vdmiais.ua, www.vdmiais.ua

КОРПУСИ ДЛЯ ФОТОННИХ ІМС ТА ПРИСТРОІВ *

PACKAGING INTEGRATED PHOTONIC DEVICES - A COMPREHENSIVE GUIDE

Останніми роками фотонні або оптичні ІМС та пристрої фотоніки показують швидкий розвиток завдяки постійному зростанню попиту на високошвидкісну передачу даних, засоби зондування, медичні прилади, оборонні програми та інші. Оскільки фотонні інтегральні схеми стають все більш складними, проблема корпусів для таких ІМС стає все більш критичною. У цій статті розглянуто різні аспекти корпусів для інтегрованих фотонних пристроїв, включаючи волоконний зв'язок, лазерну та електронну інтеграцію, управління температурою та особливості проєктування таких засобів.

П. О'Брайен

Abstract - *The field of integrated photonics has seen tremendous growth in recent years, driven by the ever-increasing demand for high-speed data communication, sensing, and other applications. As photonic integrated circuits become more complex and sophisticated, the challenge of packaging these devices becomes increasingly critical. In this article, it is considered the various aspects of packaging integrated photonic devices, including fiber coupling, laser integration, electronic integration, thermal management, and design features.*

P. O'Brien

На сьогодні галузь ІМС для фотоніки переживає величезний розвиток. Фотонні інтегральні мікросхеми стають все більш складними, проблема проєктування корпусів цих пристроїв стає все більш критичною. Корпуси відіграють важливу роль у забезпеченні належного функціонування, надійності та життєздатності інтегрованих фотонних пристроїв.

Оптична інтеграція або оптичне з'єднання. Однією з головних проблем корпусів ІМС фотонних пристроїв є забезпечення ефективного зв'язку між субмікронними хвилеводами ІМС та оптичним волокном. Існує два основні підходи до з'єднання во-

локном або пристроїв оптичного зв'язку між волокном і кристалом: крайове з'єднання, яке забезпечує зв'язок світла у площині за рахунок прямого вирівнювання між волокном та гранями інтегрованого хвилеводу; та ґратчасте або решіткове з'єднання, при якому оптичне волокно розташоване перпендикулярно площині кристала, рис. 1, 2.

Крайове з'єднання є досить простим, але вимагає точного вирівнювання та часто призводить до високих втрат через невідповідність мод між волокном і хвилеводом.

Решіткове з'єднання передбачає використання

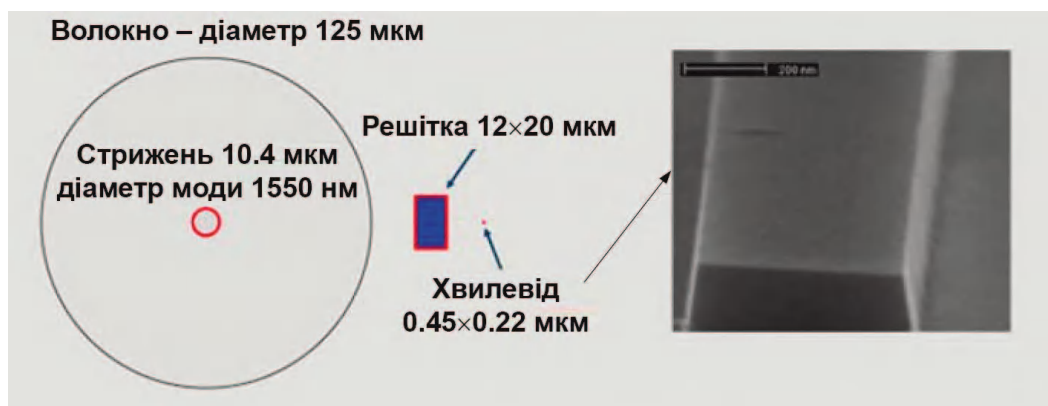


Рис. 1. Оптичне з'єднання

* *Packaging Integrated Photonic Devices - A Comprehensive Guide.*
[https://www.latitudeds.com/post/packaging-integrated-photonic-devices-a-comprehensive-guide.](https://www.latitudeds.com/post/packaging-integrated-photonic-devices-a-comprehensive-guide)
 Скорочений переклад з англійської і коментарі В. Романова.

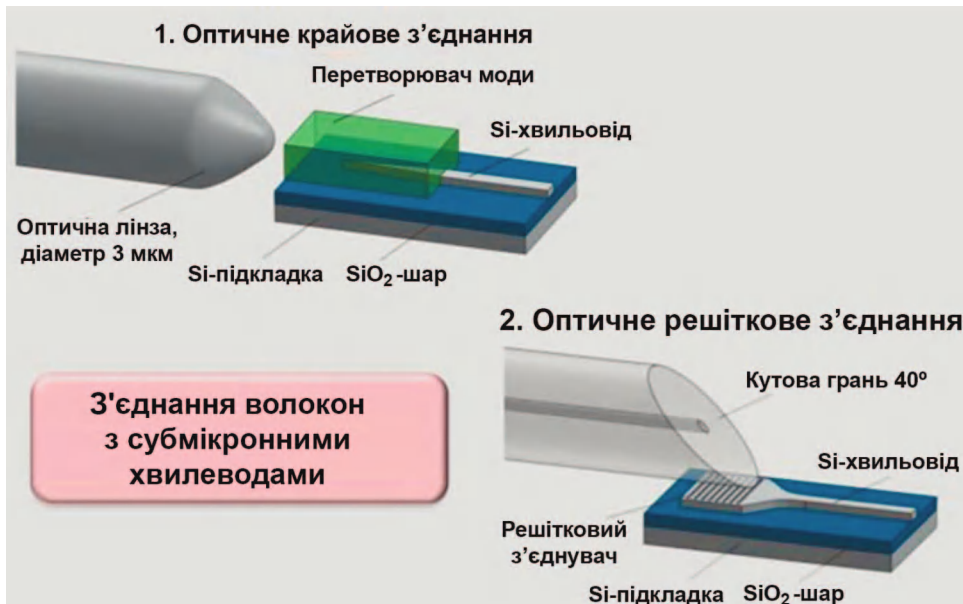


Рис. 2. Оптичне з'єднання волокна з кристалом

структури дифракційної решітки у фотонній ІМС для вертикального з'єднання потоку світла між хвилеводом і оптичним волокном. Цей підхід забезпечує послаблення допусків на центрування та, як правило, може забезпечити менших втрат на зв'язок. Однак це вимагає ретельного проектування та виготовлення спеціальної конструкції решітки.

Дослідники з Tyndall National Institute розробили методику ефективного з'єднання решіток за допомогою полірованих під кутом волокон. Ця технологія забезпечила низькі внесені втрати до $1 \text{ dB} \pm 2 \text{ мкм}$ у

широкому діапазоні довжин хвиль для кремнієвих фотонних хвилеводів.

Для з'єднання волокон з високою щільністю волоконно-матричні масиви можна з'єднувати з фотонною ІМС за допомогою методу складання фліпчипів (метод складання фліпчип – це метод перевернутого чіпу). Цей підхід передбачає точне вирівнювання та приєднання волоконного масиву до фотонної ІМС з використанням методу активного вирівнювання та застосуванням спеціалізованого технологічного обладнання, рис. 3.

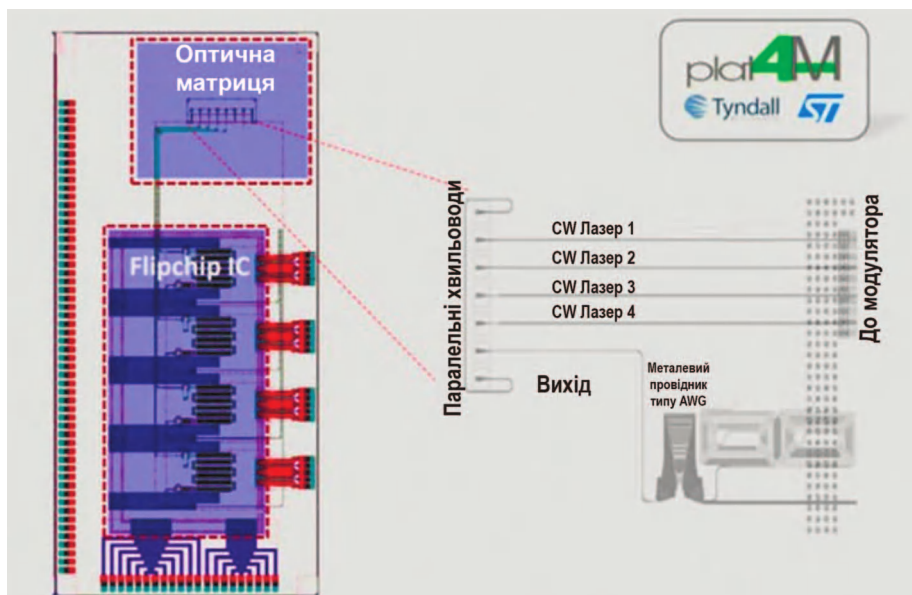


Рис. 3. З'єднання оптичної матриці з кремнієвим кристалом

Багато інтегрованих фотонних проектів вимагають інтеграції лазерних джерел із фотонними ІМС. Ця інтеграція створює кілька проблем, зокрема точне оптичне вирівнювання, управління температурою та електричне з'єднання. Один із підходів до лазерної інтеграції передбачає використання кулькових лінз і оптичних отворів, рис. 4, 5. Кулькові лінзи повинні бути точно вирівняні та встановлені на фотонну ІМС, а оптичні отвори забезпечують шлях для вертикального з'єднання лазерного променя з ІМС.

Для інтеграції лазерів з фотонною ІМС можна використовувати спеціалізоване обладнання, яке забезпечує електричні з'єднання, управління температурою та відповідні оптичні шляхи для ефективного з'єднання лазера, рис. 5.

Дослідники з Tyndall National Institute розробили гібридну інтеграцію лазера (з регульованою довжиною хвилі) з кремнієвою фотонною ІМС, рис. 6.

Більшість інтегрованих фотонних пристроїв потребує електронних компонентів для управління, модуляції та контролю. Інтеграція звичайних ІМС з

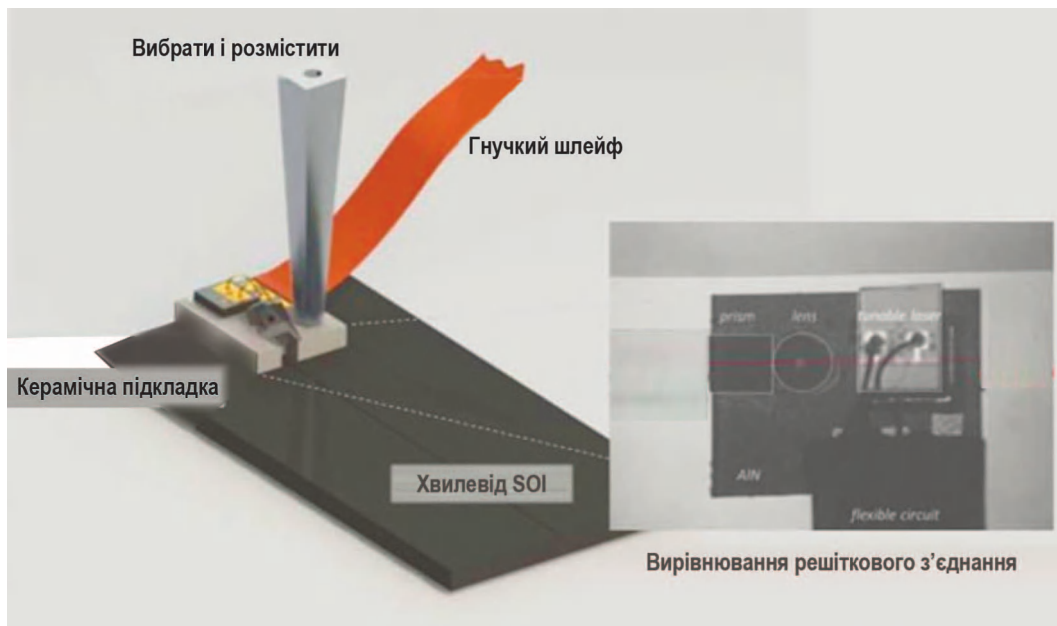


Рис. 4: Оптичне з'єднання ІМС з лазером

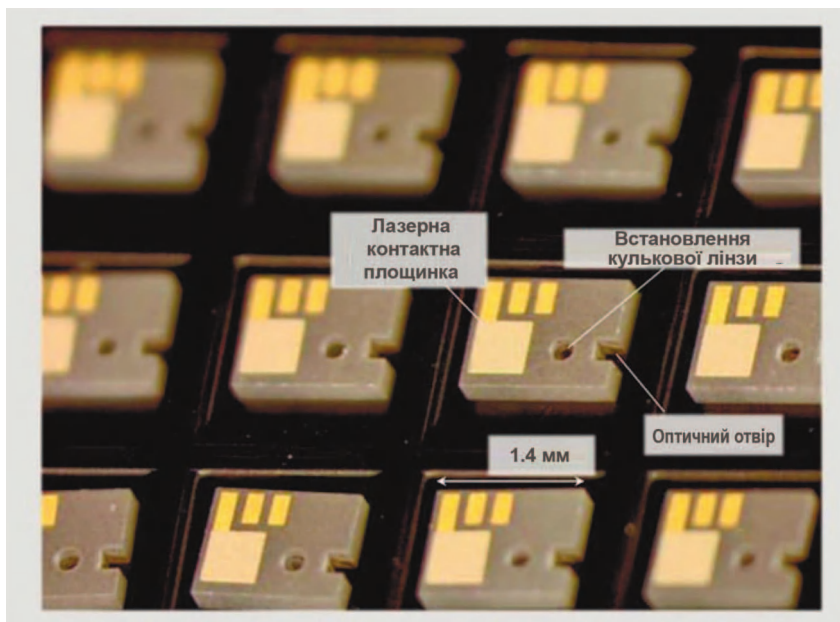


Рис. 5. Спеціалізоване обладнання для з'єднання лазера з фотонною ІМС

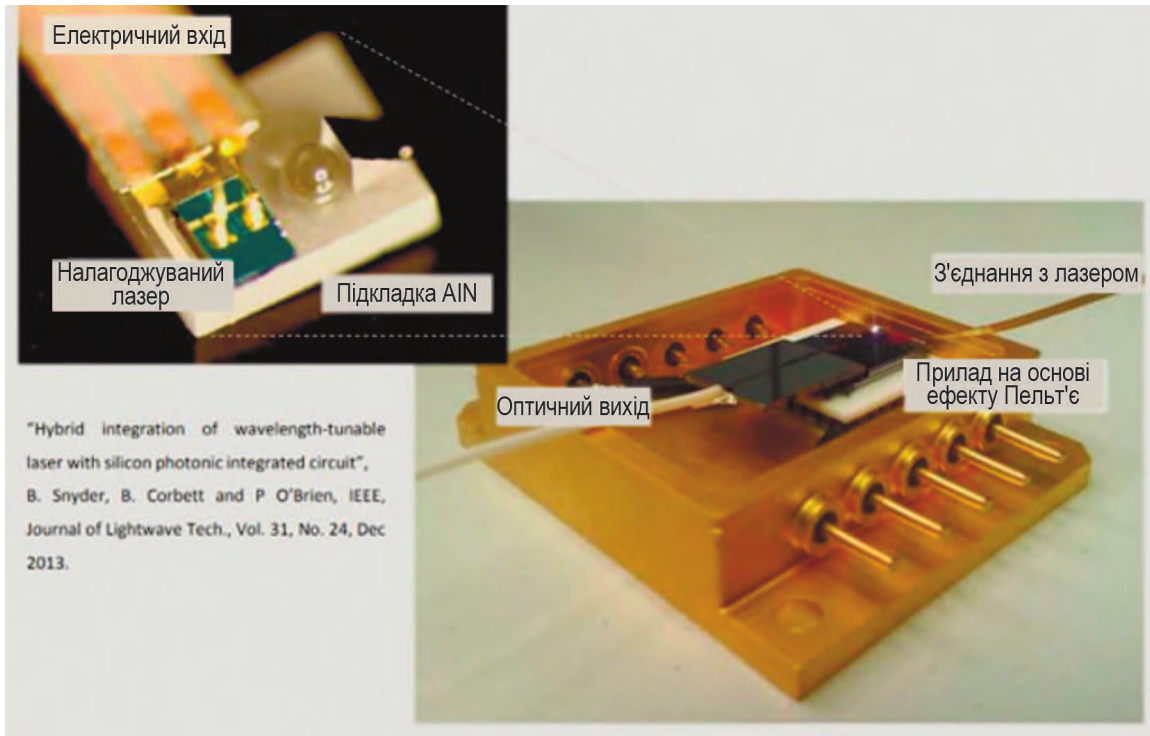


Рис. 6. Технологія з'єднання лазера з фотонною ІМС

фотонними ІМС є важливою для створення функціонально завершених та компактних систем. Один із підходів до такої інтеграції включає методи складання типу фліпчип, де звичайні ІМС з'єднуються з фотонними ІМС. Такий підхід забезпечує високу щільність електричних з'єднань і дає можливість створити спільний корпус для розміщення в ньому як фотонних, так і електронних компонентів, рис. 7.

Спеціалізовані багатoshарові друковані плати можна використовувати для маршрутизації елек-

тричних сигналів і надання додаткових функцій, таких як управління температурою. Спеціальна технологія з обладнанням для безфлюсового паяння показана на рис. 8.

Управління температурою має вирішальне значення для підтримки продуктивності та надійності роботи фотонних ІМС. Такі методи, як термоелектричні охолоджувачі і активне охолодження з використанням радіаторів або рідинних каналів, можуть бути використані для розсіювання тепла та підтрим-

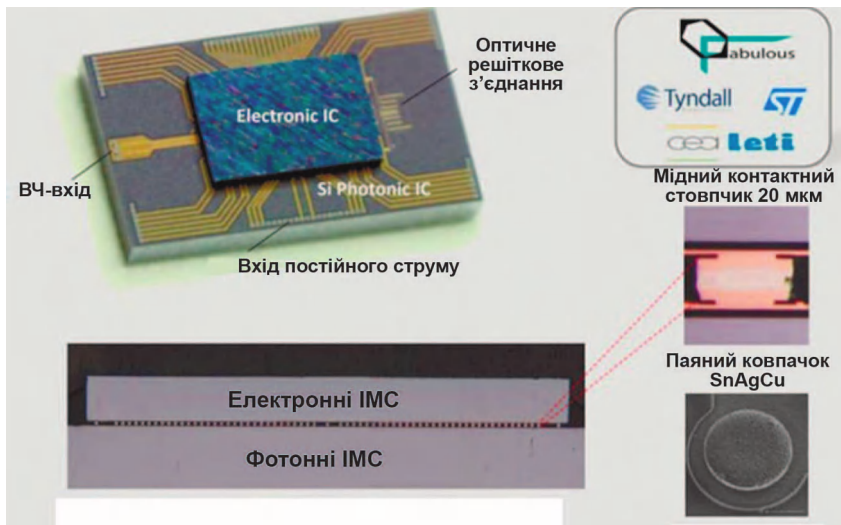


Рис. 7. Об'єднання електронних та оптичних компонентів у фотонній ІМС

ки оптимальної робочої температури фотонних ІМС і відповідних електронних компонентів. Приклади таких пристроїв наведені на рис. 9.

Унікальні можливості інтегрованої фотоніки відкриваються у медичній галузі в приладах для діагностики. Одним із таких застосувань є розробка аналізаторів кровотоку з використанням оптичних волокон, вбудованих у судини. На рис. 10 наведені компанії, які виробляють медичні прилади на основі фотонних ІМС, наприклад, для доплеровських досліджень судин та визначення жорсткості та наявності

стенозу судин, рис. 10.

Дослідники з Tyndall National Institute розробили інноваційні методи інтеграції оптичних волокон, зберігаючи при цьому необхідну гнучкість і розміри для моніторингу стану кровоносних судин. Ці пристрої дозволяють у режимі реального часу контролювати кровообіг і можуть допомогти в діагностиці та лікуванні судинних захворювань, рис. 11.

Оскільки інтегровані фотонні пристрої стають складнішими, потреба в стандартизованих інструкціях і настановах, засобах проєктування та відповід

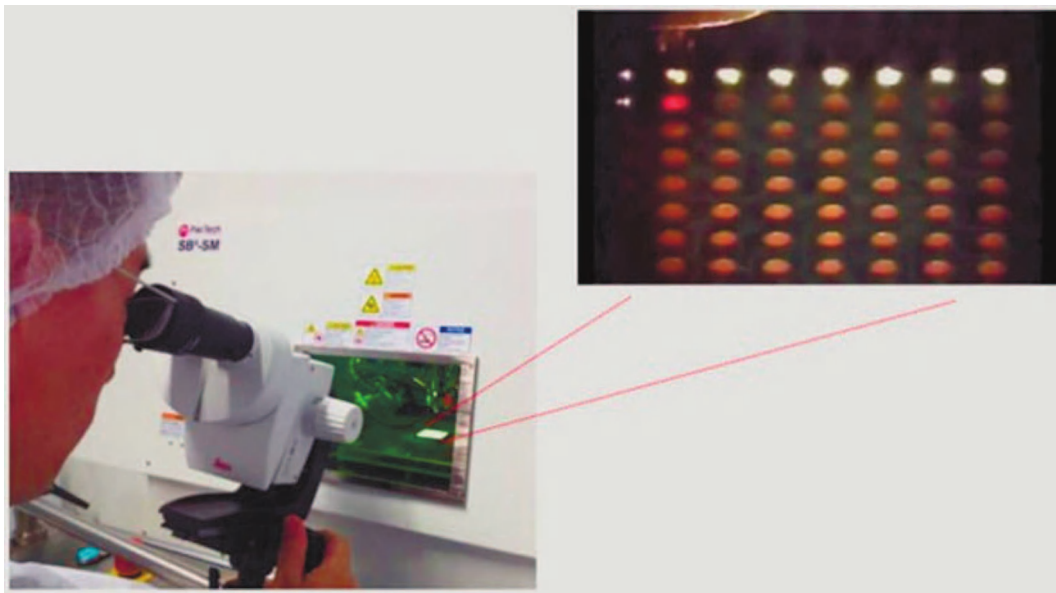


Рис. 8. Спеціальна технологія безфлюсового паяння

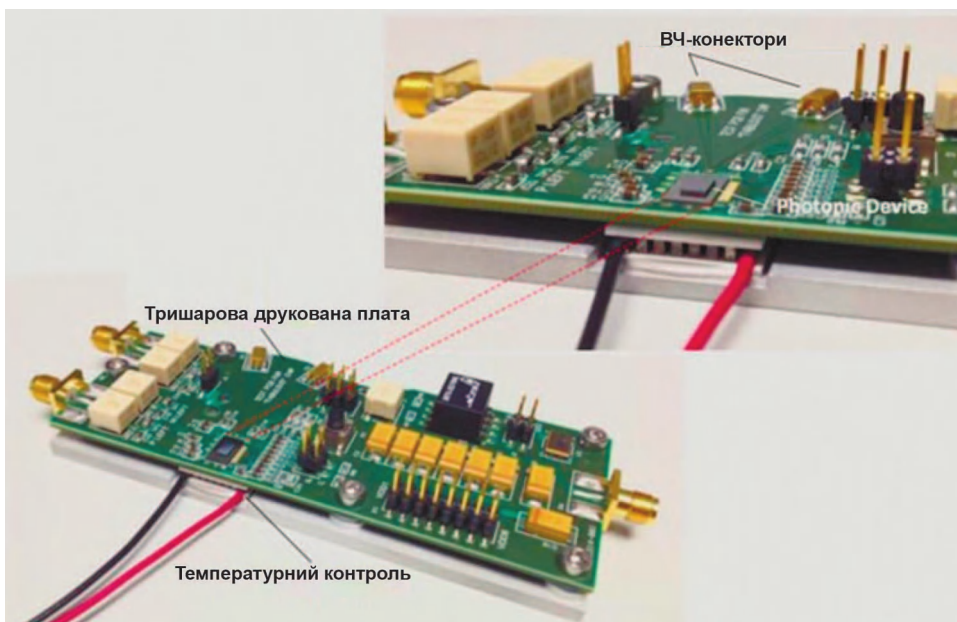


Рис. 9. Плати з фотонними ІМС і температурним контролем



Рис. 10. Інтеграція фотонних ІМС у медичні пристрої виробництва різних компаній



Рис. 11. Вбудована у стегнову артерію фотонна ІМС для дослідження стану судин

них послугах для розробників фотонних ІМС стає важливою та актуальною. Об'єднання європейських підприємств інтегрованої фотоніки (European Integrated Photonics Foundries) пропонує комплексну платформу для надання послуг з проектування та виготовлення фотонних ІМС, включно їх корпусів. Основні підприємства цього об'єднання наведені на рис. 12.



Рис. 12. Європейські підприємства з виробництва фотонних ІМС

Комплекти апаратно-програмних засобів для проектування та відповідні інструкції з проектування фотонних ІМС мають важливе значення для забезпечення сумісності кристалів фотонних ІМС з корпусами, включно процеси складання кінцевого виробу. Ці інструкції охоплюють такі аспекти, як з'єднання волокон, електронну інтеграцію, засоби управління

температурою тощо. Дотримуючись рекомендацій цих інструкцій та використовуючи послуги та настанови Об'єднання європейських підприємств з інтегрованої фотоніки, розробники фотонних ІМС мають змогу уникнути коштовних і трудомістких проблем із виготовлення корпусу такої ІМС та спростити шлях кінцевого виробу від ідеї до ринку [1].

ВИСНОВКИ

Розробка корпусу фотонної ІМС є критично важливим аспектом, який дозволяє реалізувати високопродуктивні, надійні та життєздатні фотонні прилади та системи. У статті розглядаються різні аспекти розробки фотонних ІМС, а саме проблеми з'єднання волокон, лазерна інтеграція з електронними компонентами, управління температурою, приклади медичних пристроїв на основі фотонних ІМС, проектування корпусів, а також перелік послуг включно інструкції та настанови з проектування, які можна отримати від Об'єднання європейських підприємств з інтегрованої фотоніки. Оскільки галузь фотонних ІМС досить швидко розвивається, оптимізація корпусів таких ІМС відіграватиме важливу роль у розкритті повного потенціалу кінцевих пристроїв для широкого спектру застосування, а саме у засобах телекомунікацій, оптичних датчиках, медичній та оборонній апаратурі тощо.

ЛІТЕРАТУРА

1. Packaging of micro-lens arrays to photonic integrated circuits using beam shape evaluation. Kamil Gradkowski, Padraic E. Morrissey and Peter O'Brien. https://www.researchgate.net/publication/381709770_Packaging_of_micro-lens_arrays_to_photonic_integrated_circuits_using_beam_shape_evaluation

VD MAIS

Розробка та серійне виробництво електроніки



- розробка електричних схем
- проектування та виготовлення друкованих плат
- комплектація виробів електронними компонентами та конструктивами
- контрактне виробництво (за стандартом IPC-A-600J):
 - автоматизований монтаж SMD-компонентів, автоматизована селективна пайка компонентів, що монтується у отвори
 - виготовлення дослідних зразків виробів
 - дрібно- та великосерійне виробництво
 - багаторічний досвід розробки і виробництва
 - гарантія якості.
- Сертифікація на відповідність вимогам стандартів ISO 9001:2015, ISO 14001:2015, IATF 16949:2016 і ISO 13485:2016.
- Ціни оптимальні.

Україна, 03061 Київ, вул. М. Донця, 6
Тел.: (0-44) 201-0202, 492-8852, факс: (0-44) 202-1110
e-mail: info@vdmiais.ua, www.vdmiais.ua

НАСТАНОВА З ІННОВАЦІЙНИХ РІШЕНЬ КОМПАНІЇ LPKF ДЛЯ СТВОРЕННЯ ПРОТОТИПІВ ЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ, ЧАСТИНА 1 *

TECHGUIDE OF LPKF'S INNOVATIVE PROTOTYPING SOLUTIONS, PART 1

Настанова з інноваційних рішень компанії LPKF для створення власних прототипів електронної апаратури у лабораторних умовах із численними прикладами та поясненнями включно виробництво друкованих плат представлена у цій публікації.

Abstract – This TechGuide of a practice-oriented overview of LPKF's innovative prototyping solutions with numerous application examples and explanations, and exhaustive range of prototyping methods, and PCB production prototypes in-house is considered.

Перехід від розробки до готового прототипу за кілька годин, а також виконання на власному виробництві невеликих партій радіоелектронної апаратури «на вимогу» – все це можливо з обладнанням та технологіями компанії LPKF. Створення власних (in-house) прототипів у лабораторних умовах, які відрізняються високою надійністю, може бути виконано у найкоротші терміни з мінімальним впливом на навколишнє середовище. Технічна інформація, що міститься в цій настанові, призначена для розкриття особливостей продукції компанії LPKF і містить орієнтований на практичне використання огляд інноваційних рішень цієї компанії для створення власних прототипів із численними прикладами застосування. Завдяки вичерпному набору методів та засобів створення та складання прототипів друкованих плат їх можна виготовляти безпосередньо розробниками радіоелектронної апаратури у лабораторних умовах. Для створення прототипів друкованої плати від ідеї до готового виробу компанія LPKF надає все необхідне обладнання, включно прикладне програмне забезпечення (ПЗ), що дає змогу перетворити розроблений виріб у діючий прототип.

За такою технологією на першому етапі плоттер або лазерна система ізолює провідникові (як правило, мідні) доріжки на діелектричному матеріалі підкладки друкованої плати.

На наступних етапах створюється друкована плата з електронними компонентами як завершений виріб.

Структурування друкованих плат. Плоттери

ProtoMat, рис. 1, для друкованих плат компанії LPKF є світовим стандартом з точності, гнучкості та простоти експлуатації. Ці плоттери фрезерують друковані плати та значно скорочують час виготовлення прототипів друкованих плат, що дозволяє суттєво зменшити час розробки нових електронних виробів. Високошвидкісні шпинделі зі швидкістю від 30 000 до 100 000 обертів за хвилину, механічна роздільна здатність до 0,25 мкм і надзвичайно висока повторюваність технологічних процесів гарантують, що найтонші структури плати можуть бути надійно створені включно для радіочастотних і мікрохвильових застосувань. Системи ProtoMat також можуть свердлити отвори для двосторонніх і багатошарових друкованих плат для монтажу електронних компонентів. Системи ProtoLaser забезпечують безконтактне структурування без механічних засобів і вже попередньо можуть бути налаштовані для багатьох типів підкладок і електропровідних шарів. Завдяки своїм можливостям при створенні друкованих плат на основі керамічних матеріалів для радіочастотних застосувань системи ProtoLaser не мають аналогів в світі. У цих системах точне лазерне структурування поверхні плати доповнюється операціями механічного свердління та різання завдяки додатковому шпинделю.

Технологія поверхневого монтажу (SMT-технологія), це технологія, за якою електронні SMD-компоненти встановлюються безпосередньо на поверхню друкованої плати. Процес виготовлення прототипу за SMT-технологією включає друк паяльною

* TechGuide of LPKF's innovative prototyping solutions, part 1 https://www.lpkf.com/fileadmin/medi-afiles/Download-Center/en/2_DQ_TechGuide_EN.pdf.

Скорочений переклад з англійської і коментарі В. Романова.



Рис. 1. Плоттер ProtoMat S104

пастою, а також монтаж SMD-компонентів. Створення власних прототипів за SMT-технологією в лабораторних умовах економить час і гарантує, що результати оригінальної розробки залишаться недоступними для третіх сторін. Обладнання компанії LPKF забезпечує необхідну точність для виробів за SMT-технологією.

Свердління та обробка наскрізних отворів.

Одним з етапів процесу є покриття наскрізних отворів. Системи ProtoMat або ProtoLaser, рис. 2, свердлять отвори в двосторонніх або багат шарових друкованих платах. Наскрізне покриття отворів може бути виконано шляхом гальванічного нанесення струмопровідної пасти або за допомогою технології клепок залежно від області застосування друкованих плат. Компанія LPKF пропонує професійні системи для всіх цих методів.

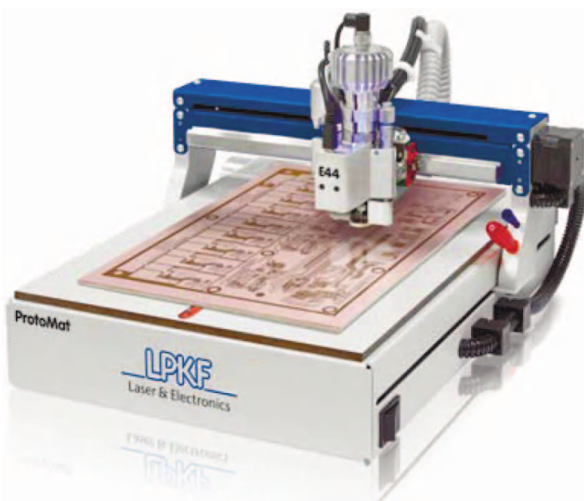


Рис. 2. Система ProtoLaser

Багат шаровість. Навіть багат шарові друковані плати можуть бути виготовлені у лабораторних

умовах за короткий період на професійному рівні. Система MultiPress S4 надає розробникам найсучасніший прес для багат шарового ламінування (включно з вакуумізацією) для використання у лабораторних умовах.

Відокремлення друкованих плат є ще одним процесом, який виконує система ProtoMat. Одна або кілька друкованих плат, які розташовані на базовій підкладці, можуть бути відокремлені за допомогою механічного фрезерного інструменту або оптичною системою ProtoLaser.

Паяльні маски. Використання паяльних масок часто є необхідним процесом SMT-технології. Нанесення паяльної маски на плату запобігає подальшому короткому замиканню та корозії друкованої плати. Система ProMask – це просте у використанні рішення для нанесення захисної маски. Система Legend Printing також пропонує екологічне та просте у використанні рішення для маркування компонентів друкованої плати або нанесення власного логотипу виробника.

Трафарети з паяльною пастою. Пасту для SMD-компонентів наносять на всі контактні площинки за допомогою трафарету з паяльною пастою. Трафарети для прототипу можна виготовити за допомогою системи ProtoMat або лазерної системи. Потім вони друкуються за допомогою спеціального трафаретного принтера, такого як ProtoPrint S4.

Монтаж SMD-компонентів. Монтаж SMD-компонентів на друкованій платі вимагає високої точності. Ручна та повністю автоматична система складання, така як ProtoPlace E4 або ProtoPlace S4, використовується для прототипів друкованої плати, де точне розміщення компонентів контролюється за допомогою системи камер або за допомогою комбінації камери та відповідного програмного забезпечення.

Пайка оплавленням. Останнім виробничим етапом створення прототипів за SMT-технологією є пайка оплавленням. Печі оплавлення ProtoFlow S4 нагрівають паяльну пасту з попередньо встановленими електронними компонентами і відрегульованими температурними профілями. Після затвердіння паяльної пасти компоненти з'єднуються з платою, в результаті чого отримуємо повністю готовий виріб.

Односторонні друковані плати. Основний матеріал односторонньої друкованої плати складається з електроізоляційної підкладки, покритої провідним матеріалом. Підкладки FR4 (армована скловолокном епоксидна смола) є найпоширеніши-

ми на сьогодні, а для провідного шару зазвичай використовується мідь. Мідний шар позначається в мікрометрах або у вазі міді в унціях на квадратний фут. Типова товщина шару становить 35 мкм (вага 1 унція). У деяких випадках поверхня міді покривається додатковим металом, наприклад, нікелем, оловом або золотом. Товщина підкладки FR4 коливається від 0.25 до 3.125 мм, а найбільш поширена товщина підкладки становить 0.8 або 1.6 мм.

Двосторонні друковані плати. Верхня та нижня поверхні двосторонніх друкованих плат (рис. 3) покриті провідниковим матеріалом (зазвичай міддю). Плоттери для друкованих плат компанії LPKF оснащені механічними довірчими системами або камерами для автоматичного визначення положення, які допомагають у свердлінні та фрезеруванні двосторонніх друкованих плат. Це гарантує, що структури провідникових доріжок з обох сторін плати збігаються.

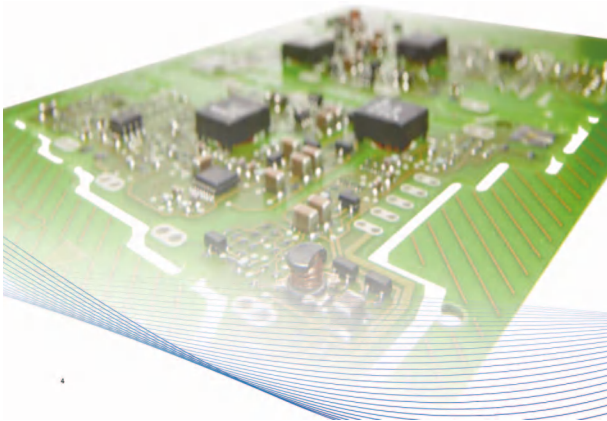


Рис. 3. Двостороння друкована плата

Кожна система ProtoLaser постачається з вакуумним столом і камерою опорного вирівнювання. Друкована плата не тільки механічно підтримує електронні компоненти, але й з'єднує їх через мережу провідників, забезпечує екранування від електромагнітних перешкод і розсіювання тепла. У все більш складному технологічному процесі в одному просторі доводиться розміщувати все більше і більше провідників і компонентів. Для цього при створенні прототипу пропонуються різні технічні рішення і підходи.

Багатошарові друковані плати. Системи ProtoMat і ProtoLaser забезпечують швидку розробку багатошарових друкованих плат (рис. 4). Вони можуть складатися з двосторонніх внутрішніх плат і одностороннього зовнішнього шару. Для електричного з'єднання шарів застосовуються отвори з покриттям.

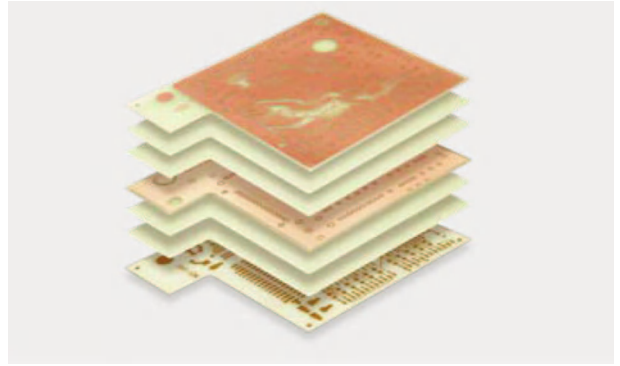


Рис. 4. Багатошарова друкована плата

Плати для радіочастотних та мікрохвильових схем. Ці плати складаються з матеріалів зі спеціальними електричними та механічними властивостями (рис. 5), наприклад, полімерної смоли, армованої скловолокном. Підкладки типу RO4000® додатково містять керамічні частинки. Обробка поверхонь таких підкладок вимагає максимальної точності: плоттери ProtoMats із високою швидкістю шпинделя або лазерні плоттери ProtoLasers забезпечують точне виготовлення таких плат відповідно до вимог технічної документації.

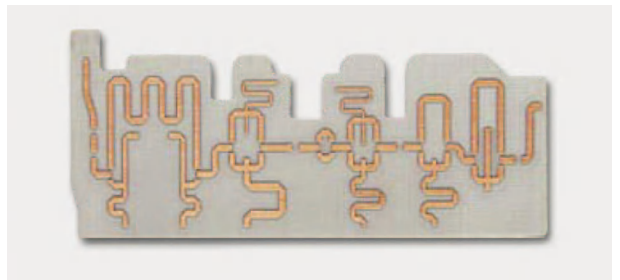


Рис. 5. Радіочастотна друкована плата

Гнучкі та жорсткі друковані плати. Гнучкі друковані плати (рис. 6) зазвичай виготовляються з полімідних плівок із мідними провідниками. Жорстко-гнучкі друковані плати утворюються шляхом об'єднання гнучких і жорстких підкладок. Процес виготовлення жорстких і гнучких друкованих плат подібний до процесу виготовлення багатошарових друкованих плат. Лазерне різання (випаровування) металевого шару виконується на гнучких підкладках за допомогою плотерів ProtoLasers.

Програмне забезпечення (ПЗ) компанії LPKF Smart Prototyping Assistant. Під час інсталяції ПЗ CircuitPro може адаптувати етапи процесу у відповідності від кількості потрібних прототипів. ПЗ CircuitPro імпортує проектні дані з систем CAD/EDA. Віртуальний експерт з планування процесу виробництва

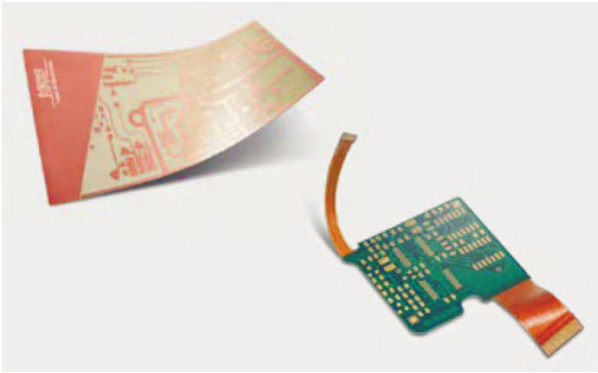


Рис. 6. Гнучка і жорстко-гнучка друковані плати

(Мастер) пропонує користувачеві ввести такі дані, як кількість шарів, тип матеріалу підкладки і вимоги до подальшої обробки. ПЗ спрощує створення друкованої плати за допомогою зрозумілих покрокових процедур.

Програмне забезпечення CircuitPro включає розширені алгоритми для механічного фрезерування або лазерної обробки металевих шарів. Передбачена перевірка технологічних процесів, яка може бути виконана відповідним обладнанням. САМ ПЗ CircuitPro — це покоління потужного програмного забезпечення, яке гарантує потрібну точність обробки. ПЗ розроблене компанією LPKF і поєднує підготовку даних і управління обладнанням за допомогою однієї програми. На наступному кроці ПЗ CircuitPro генерує у діалоговому вікні набір інструментів для ізоляції провідникових доріжок і створює контури друкованої плати.

Подальше управління проектуванням бере на себе віртуальний експерт або майстер, який крок за кроком супроводжує користувача через увесь виробничий процес. Після переходу від перегляду технологічних операцій з САМ-процесу до вибору відповідного обладнання компанії LPKF ПЗ CircuitPro пропонує користувачеві ввести необхідні властивості матеріалу підкладки та визначає розташування обладнання над робочою поверхнею плати. Потім це відображається на віртуальній робочій поверхні плати на моніторі комп'ютера і з цього моменту можна починати процес її виробництва. На одній підкладці можна розташувати декілька друкованих плат.

Під час обробки плати віртуальний експерт підказує користувачеві, коли необхідне ручне втручання. Ці втручання можуть включати перевертання плати, покриття отворів або заміну інструменту. Якщо дані конкретного технологічного циклу будуть збережені, вони улюбий час можуть бути доступни-

ми для запуску наступного технологічного процесу. Це дозволяє системам ProtoMats і ProtoLasers значно прискорити весь робочий процес.

Структурування та обробка друкованих плат. Після розробки топології друкованої плати ПЗ CircuitPro імпортує її для обробки поверхні плати. Залежно від конструктивних вимог можна вибрати потрібний метод обробки друкованої плати: механічний – шляхом фрезерування різними системами ProtoMat або оптичний – лазерними системами ProtoLaser.

Створення провідникових доріжок шляхом механічного фрезерування. За допомогою процесу фрезерування створюються зовнішній і внутрішній шари друкованої плати. При цьому провідний матеріал видаляється з ізоляційного шару за допомогою високошвидкісного шпинделя та фрезерних інструментів. Чим вища швидкість, тим точніші інструменти можна використовувати для фрезерування. Це особливо корисно для радіочастотних та мікрохвильових застосувань. Двигуни шпинделя підтримують низьке биття, що забезпечує точне виготовлення провідникових доріжок, включно відстані між ними. Усі доріжки та місця пайки ізолювані за допомогою фрезерного інструмента. Це гарантує чистоту країв, що позитивно впливає на електричні властивості друкованої плати. Менші фрезерні інструменти використовуються лише в місцях з меншими відстанями. На початку процесу фрезерування глибина фрезерування встановлюється відповідно до глибини проникнення в матеріал діелектричної підкладки. Для регулювання глибини фрезерування можна використовувати різні методи: якщо встановлено автоматичну заміну інструментів, то інструменти для свердління та фрезерування автоматично замінюються в процесі виготовлення друкованої плати. Заміна інструменту поєднується з автоматичним регулюванням глибини фрезерування. При ручній заміні інструменту глибина фрезерування регулюється мікрометричним гвинтом. Термін служби різних інструментів зберігається у програмному забезпеченні. Попереджувальне повідомлення вказує, коли необхідна заміна інструменту. Шумопоглинаючий корпус плоттера мінімізує шум і забезпечує оптимальну безпеку праці в будь-якому робочому середовищі. Приклади друкованих плат, створених методом фрезерування, наведені на рис. 7, 8, 9.

Лазерне структурування. Лазер забезпечує найкращі умови для прямого структурування друкованих плат з мідним покриттям. Висока точність характеризує лазерний процес для структурування радіочастотних прототипів. Лазерна мікрообробка

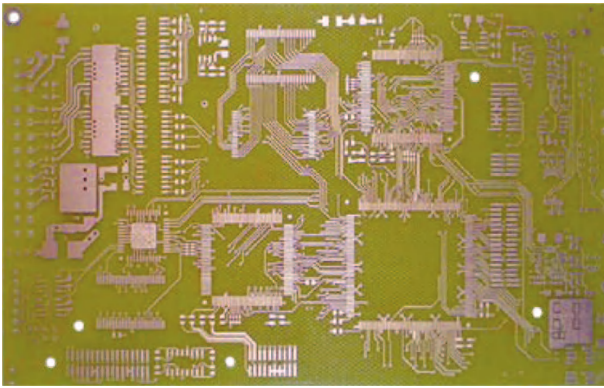


Рис. 7. Одношарова друківана плата

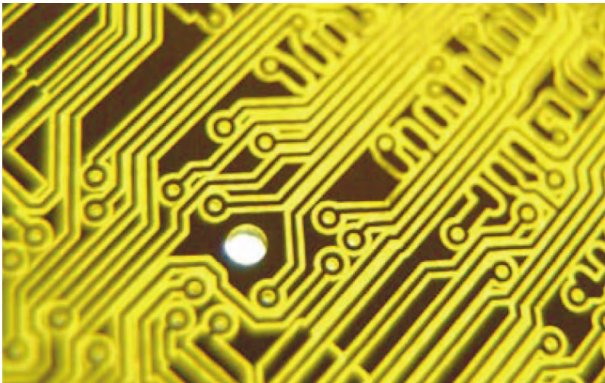


Рис. 8. Провідникові доріжки, створені методом фрезерування

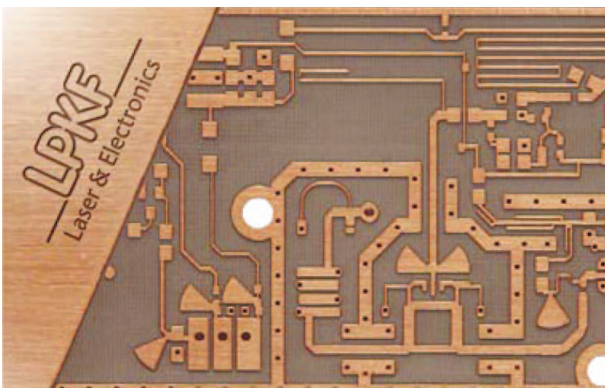


Рис. 9. Радіочастотна друківана плата

забезпечує високу щільність енергії на найменшій площі, високі можливості фокусування та контроль параметрів лазера. Оскільки шари в композитних матеріалах мають різні пороги абляції (абляція – це видалення надлишкового металу з металевого шару шляхом випаровування), у лазерному структуруванні використовується запатентований процес цілеспрямованого випаровування або розшарування.

У структуруванні керамічних підкладок провідні металеві шари не розшаровуються, а випаровуються завдяки високій енергії лазера. Лазерне випаро-

вування може досягати ізоляційних відстаней до 15 мкм. Для свердління та розділення товстих багатшарових друківаних плат рекомендується використовувати механічні інструменти. Системи ProtoLaser S4, U4 і R4 (рис. 10) також можуть свердлити лазером і різати до певних обмежень, залежних від матеріалу підкладки (рис. 11).

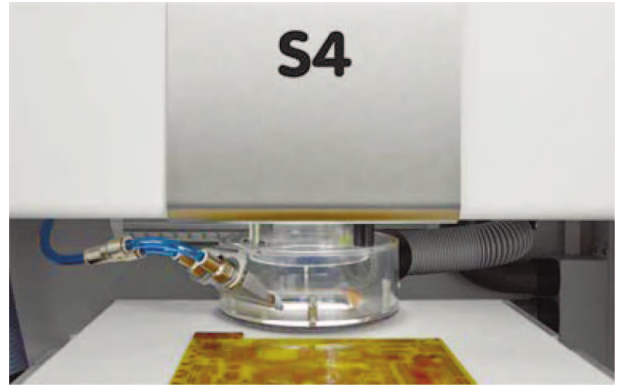


Рис. 10. Плоттер ProtoLaser S4

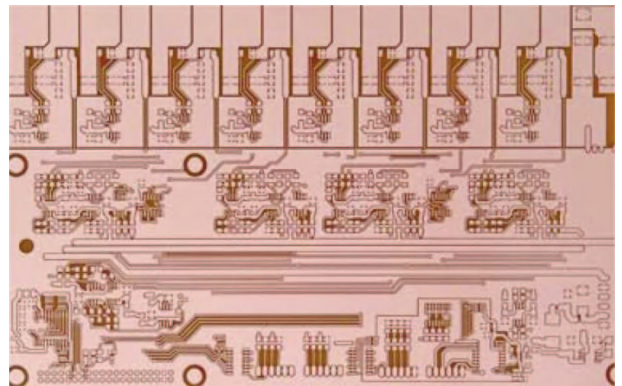


Рис. 11. Друківана плата з підкладкою FR4, вироблена плоттером ProtoLaser S4

Крім того, УФ-лазери незамінні для "сліпої" обробки плати. Плоттер ProtoLaser H4 забезпечує механічне свердління та фрезерування. Надзвичайно ефективне структурування схеми виконується за допомогою інфрачервоного лазера, а механічне свердління гарантує ідеально прямі та чисті отвори навіть на товстіших підкладках і багатшарових платах.

Програмне забезпечення. Програмне забезпечення CircuitPro CAM є основою для не дуже складної роботи з системами ProtoMats і ProtoLasers. Це ПЗ перетворює проєктні рішення зі звичайних програм в системи управління структуруванням, що дає змогу оптимізувати елементи компонування і забезпечує перевірку вимог до проєктування. Крім того, це ПЗ відшаровує провідниковий шар (як правило, мідь) з меншою енергією, щоб запобіг-

ти пошкодженню підкладки. Цей запатентований процес дозволяє використовувати лазер для прямого структурування друкованих плат зі швидкістю абляції до 12 см² за хвилину.

Оскільки це має мінімальний вплив на матеріал підкладки, її вимірний опір ізоляції після процесу випаровування буде відповідати вимогам стандарту IPC TM 650. Все це дозволяє будь-якому користувачеві з легкістю створювати як окремі друковані плати, так і невеликі партії плат. Обладнання компанії LPKF ідеально підходить для високопродуктивних аналогових, цифрових, радіочастотних і мікрохвильових систем, рис. 11. Такі опції, як вакуумний стіл або система огляду, ще більше спрощують використання цього обладнання та зводять до мінімуму необхідне втручання користувача у технологічний процес.

Лазерна мікрообробка матеріалів. Лише поглинена енергія впливає на взірець друкованої плати. Лазерний промінь відрізняється від звичайного світла декількома основними ознаками. Він є монохроматичним і має малий розкид частот. У той же час велика кількість енергії зосереджена в активній зоні, рис 12, тісно пов'язаній з діаметром променя. Програмне забезпечення компанії LPKF дозволяє регулювати параметри лазера для різних типів друкованих плат. Довжина хвилі лазера, рис. 13, відрізняється залежно від випромінюючого лазерного джерела – це ключовий аспект широкого застосування лазера. Різні матеріали мають різні властивості поглинання. Чим вище поглинання матеріалу, тим більшу кількість енергії передає лазер. Компанія LPKF пропонує кілька моделей лазерних систем.

ProtoLaser для розробки друкованих плат. Лазерний промінь взаємодіє з металевим шаром підкладки трьома способами, а саме через:

- пропускання – це частина лазерного променя, що проходить крізь підкладку
- відбиття – це частина лазерного променя, відбитого підкладкою
- поглинання – це лазерний промінь, який впливає на матеріал підкладки друкованої плати. Поглинена енергія збуджує електрони в матеріалі мішені. Це має три різні наслідки:
 - хімічні зв'язки розриваються під впливом вхідної енергії лазера
 - матеріал металевого шару плавиться або випаровується за рахунок енергії лазера
 - висока енергія імпульсу випаровує матеріал (рис. 12).

Швидко лазерне випаровування з запатентована-

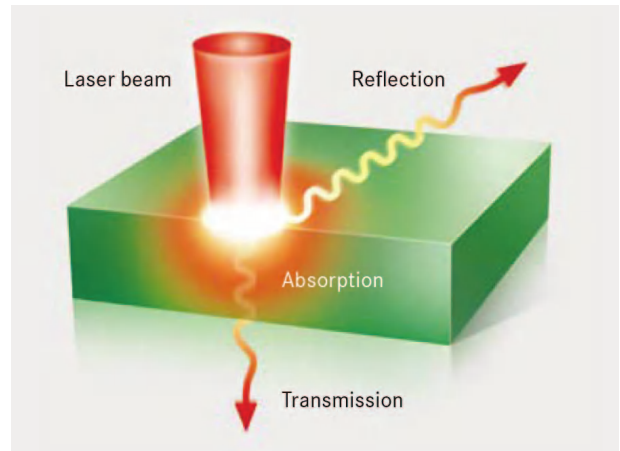


Рис. 12. На взірець впливає лише поглинена енергія лазера

ною обробкою компанії LPKF і з параметрами, що регулюються оператором, робить процес виготовлення прототипів друкованих плат економічно ефективним, швидким і надійним. Лазерна мікрообробка матеріалів є однією з основних досягнень компанії LPKF. Моделі ProtoLasers розрізають, свердлять і структурують тонкі багат шарові, жорсткі, жорсткогнучкі та гнучкі друковані плати. Ці моделі надзвичайно точні, нешкідливі у використанні та високопродуктивні. Гравірування, надрізування та маркування були одними з типових застосувань для лазерних систем першого покоління. На сьогодні діапазон застосування таких систем суттєво розширився і зараз включає, наприклад, виготовлення невидимих мікроструктурованих взірців на плівках і скляних підкладках для сенсорних екранів. Мікрообробка кераміки є однією з основних можливостей систем ProtoLaser. Використовуючи лазери з різною довжиною хвилі (рис. 13), їх можна застосовувати

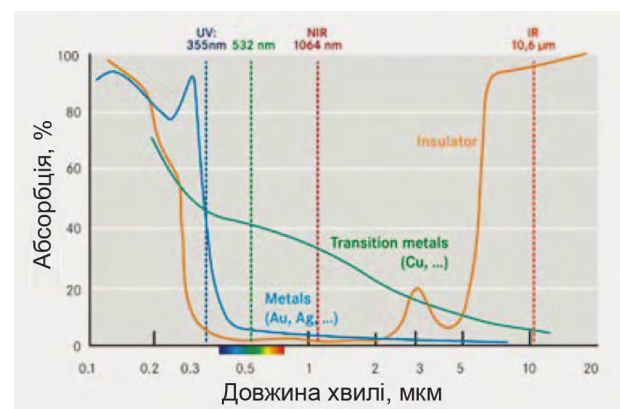


Рис. 13. Залежність рівня абсорбції від довжини хвилі лазерів і їх використання для різних технологічних процесів і матеріалів

для прямого структурування шляхом випаровування провідникового покриття та для точного різання/надрізання матеріалу друкованої плати.

ВИСНОВКИ

У статті викладені основні технологічні процеси виготовлення прототипів радіоелектронної апаратури в лабораторних умовах. На прикладі устаткування компанії LPKF для таких процесів розкриті особливості і переваги швидкого створення прототипів друкованих плат різної складності і різного призна-

чення безпосередньо в лабораторіях, в яких розробляється радіоелектронна апаратура. Особливості сімейства багатофункціональних плоттерів компанії LPKF, а також методи створення фінішних виробів на базі такої технології будуть розглянуті у наступному номері журналу EKiC.

ПОСИЛАННЯ

https://www.lpkf.com/fileadmin/mediafiles/Download-Center/en/2_DQ_TechGuide_EN.pdf



[Від ремесла до мистецтва]

ДРУКОВАНІ ПЛАТИ

- проектування

Проектування друкованих плат в НВФ VD MAIS – це:

- багаторічний досвід конструювання і знання специфіки:
 - розробки електронних пристроїв
 - технології виготовлення друкованих плат
 - різних CAD-CAM систем проектування (P-CAD, Mentor Graphics, CAM-350 та ін.)
- повна реалізація можливостей виготовлення друкованих плат і контрактного виробництва VD MAIS
- система менеджменту якості фірми сертифікована на відповідність вимогам стандартів ISO 9001:2015, ISO 14001:2015, IATF 16949:2016 і ISO 13485:2016

VD MAIS
ДИСТРИБ'ЮЦІЯ +
КОНТРАКТНЕ
ВИРОБНИЦТВО

VD MAIS
PCB Professionally

тел.: (0-44) 220-0101, info@vdmals.kiev.ua, www.vdmals.kiev.ua

We make it *possible*

- діапазон робочих температур від -90 до +400 °C
- строк служби 30 років



Суцільнометалеві демпфери



Резинові віброізолятори



Сіліконові віброізолятори



Суцільнометалеві подушки



Тросові амортизатори



Малогабаритні суцільнометалеві амортизатори



Шнури ізоляції від електромагнітних хвиль



Пружинні ізолятори

Основним напрямком роботи фірми Hutchinson є виробництво широкого ряду суцільнометалевих демпферів (амортизаторів, віброізоляторів, віброопор), як малогабаритних – для різного роду електронного та навігаційного обладнання, так і великогабаритних – для різних областей застосування.

Всі вироби мають широкий діапазон статичного навантаження і стійкі до впливу агресивного середовища, зберігають свої характеристики в діапазоні температур від -90 до +400 °C. Строк служби не менше 30 років.

Робочим тілом демпферів є металева подушка, виготовлена з нержавіючої CrNi сталюї арматурної проволочи.

VD MAIS

ДИСТРИБ'ЮЦІЯ +
КОНТРАКТНЕ
ВИРОБНИЦТВО

VD MAIS – авторизований торговельний представник фірми
Hutchinson Stop-Choc GmbH & Co. KG (Німеччина) в Україні

тел.: (044) 201-0202, info@vdmiais.ua, www.vdmiais.ua

ТЕХНОЛОГІЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ БУДІВЕЛЬ: РОЗУМНИЙ ШЛЯХ ЗНИЖЕННЯ ВИКИДІВ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ *

У статті показано, як інноваційні технологічні платформи та програмні рішення сприяють кліматичним технологіям. Щоб зменшити викиди парникових газів, встановлюють сонячні панелі у будинках або використовують енергоефективні прилади на кухнях. Це позитивно впливає на навколишнє середовище та допомагає заощадити на рахунках за електроенергію. Але впровадження інтелектуальних будівельних технологій може не тільки допомогти підвищити енергоефективність, а й підвищити безпеку та скоротити викиди парникових газіві.

Дж. Ланнан

INTELLIGENT BUILDING TECHNOLOGY: THE SMART WAY TO LOWER GREENHOUSE GAS EMISSIONS

Abstract – The article aims to illuminate how innovative technological platforms and software solutions are enabling climate tech. To help decrease greenhouse gas emissions, many people have installed solar panels on their houses, or at the very least, use energy-efficient appliances in their kitchens. This will undoubtedly impact the environment positively, and likely help people save on energy bills. But when thinking about scale, one must consider the potential environmental impact of large, commercial buildings and how leveraging intelligent building technology can help drive efficiency, safety, and emissions reductions.

J. Lannan

Підвищення енергоефективності систем енергопостачання комерційних та промислових будівель допоможе країнам досягти порогу підвищення температури в 1,5°C, передбаченого Паризькими кліматичними угодами 2015 року [1]. Ключ до досягнення потенційно можливої енергоефективності в комерційних та промислових будівлях полягає в управлінні всією будівлею за допомогою комплексних інформаційних технологій. Одним із способів досягти цього є загальна цифровізація та об'єднання мереж різних систем управління такими будинками. Як зазначив Стів Кенні, віце-президент компанії Honeywell: «Сьогодні керівники будинків стикаються із зростаючим тиском у сфері безпеки, ефективності роботи та енергоефективності. Автоматизація усуває операційні бар'єри, щоб надати менеджерам будинків більше контролю над ефективністю своїх будівель, що в кінцевому підсумку допомагає покращити досвід мешканців, одночасно просуюваючи цілі управління енергетикою».

Що таке інтелектуальні будівлі? Інтелектуальні будівлі, або розумні будівлі, інтегрують різні технології та процеси для підвищення безпеки, комфорту та продуктивності для мешканців, одночасно підвищуючи ефективність роботи власників. Вони розгортають взаємопов'язані датчики, пристрої та системи управління для аналізу та оптимізації даних у

реальному часі, об'єднуючи системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря (системи HVAC – Heating, Ventilation, & Air Conditioning), а також систему освітлення, сигналізації та безпеки в єдину IT-мережу (рис. 1) [2].

Сектор комерційних та промислових будівель має надзвичайну можливість зменшити споживання енергії, оскільки в середньому 30% енергії в цих будівлях використовується неефективно або зовсім без потреби для систем опалення, вентиляції, кондиціонування, освітлення, охолодження та гарячого водопостачання [3]. Впровадження системи управління будівлею (Building Management System – BMS) є основним методом, який допомагає зменшити втрати та підвищити енергоефективність.

Система BMS автоматизує управління електричними та механічними системами будівлі, включаючи опалення, вентиляцію, кондиціонування повітря, освітлення, пожежну безпеку та охорону. У США, наприклад, майже 60% великих комерційних будівель з площею більше 5 000 м² мають системи BMS, тоді як лише 13% невеликих будівель мають такі системи [4]. Ці прогалини демонструють суттєву можливість для менеджерів будівель покращувати енергозбереження та економити кошти завдяки інформатизації процесів управління.

Встановлення систем BMS із вдосконаленими

Lannan J. Intelligent building technology: the smart way to lower greenhouse gas emissions. Скорочений переклад з англійської і коментарі В. Романова



Рис. 1. Приклад інтеграції різних систем управління будівлею в одну IT-мережу

датчиками та модулями зв'язку може дати в середньому від 10% до 25% економії енергії [5]. Ці системи допомагають оптимізувати роботу будівлі у цілому та дають можливість дистанційно виявляти несправності, забезпечуючи нагрівання, охолодження та кондиціонування лише за потреби. Автоматизація допомагає звести до мінімуму споживання енергії та знизити пікове навантаження, а дистанційна діагностика в реальному часі допомагає підвищити енергоефективність (рис. 2).



Рис. 2. Інтеграція системи управління будинком BMS – основний засіб підвищення енергоефективності та зниження викидів CO₂

Інтеграція систем управління будівлею є ключем для ефективної роботи BMS. Об'єднання панелей управління, датчиків з виконавчими механізмами для ефективного управління системами HVAC, освітленням, охорони, пожежної сигналізації та енергосистемами суттєво підвищує продуктив-

ність та енергоефективність управління будівлею у цілому. Технологія Ethernet забезпечує таку інтеграцію у комерційних або промислових умовах, підтримуючи її на великій відстані, забезпечуючи вищу пропускну здатність, збільшену кількість вузлів і розширену безпеку порівняно з застарілими системами зв'язку.

Розроблена для промислового використання технологія Ethernet надійно та успішно передає дані, незважаючи на наявність перешкод у будівлі. IP-комунікації на межі системи BMS підтримують повний дуплексний зв'язок окремих систем, локалізоване прийняття рішень, усувають нестикування даних, скорочують час простою для оновлення або відновлення системи. До мережі Ethernet можна підключити периферійні пристрої, щоб забезпечити систему управління BMS більш повною інформацією. Якщо підвести одну пару мережі Ethernet до системи BMS, периферійні пристрої через цю мережу зможуть обмінюватися життєво важливою інформацією про стан будівлі для її оптимальної експлуатації та управління в цілому.

Підключивши таким чином периферійні пристрої за допомогою однієї пари Ethernet, можна гарантувати, що раніше ізольовані системи управління, такі як система HVAC, система освітлення, система спостереження та пожежогасіння, зможуть надавати у реальному часі інформацію в центральну систему управління BMS для єдиного безперервного моніторингу всіх даних щодо стану будівлі (рис. 3).

Інтеграція технологій штучного інтелекту і машинного навчання у системі BMS може ще краще оптимізувати енергоспоживання, забезпечуючи

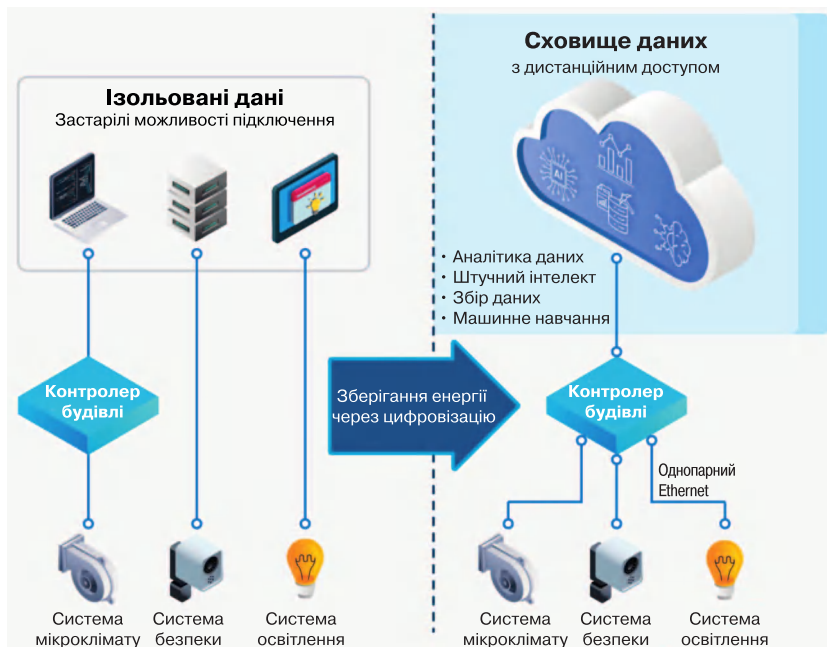


Рис. 3. Об'єднання у мережу Ethernet периферійних пристроїв із раніше окремих систем забезпечує єдиний безперервний моніторинг усіх даних про стан будівлі

прогнозний аналіз і інтелектуальні алгоритми для автоматизації процесів і підвищення енергоефективності.

Інноваційні технології у системі BMS. Сучасна система BMS базується на передових технологіях, що забезпечують її живлення, включаючи конфігуровані пристрої вводу/виводу, які підтримують взаємодію між людиною-оператором або іншою системою та комп'ютером. Конфігуровані пристрої вводу/виводу спрощують установку системи BMS і забезпечують можливість адаптації в майбутньому, що зберігає інвестиції.

Джерела вхідних даних включають датчики температури, датчики диму, датчики руху та інші, тоді як джерела вихідних даних – це, як правило, приводи зі змінною швидкістю, сигнальні дзвінки та інші. Крім того, покращене джерело живлення та оптимальне управління двигуном підвищують енергоефективність, а діагностика обладнання може своєчасно виявити несправне обладнання та мінімізувати час на його обслуговування та простой. Впровадження цих технологій може суттєво зменшити енергію споживання, необхідну для роботи обладнання будівлі, наприклад, систем опалення, вентиляції, кондиціонування, освітлення та безпеки.

Застосування інноваційних технологій опалення та охолодження, таких як теплові насоси та системи зі змінним потоком холодоагенту, може ще більше зменшити викиди. Ці системи перевершують традиційні газові або масляні котли в перетворенні елек-

троенергії в теплову, що дозволяє використовувати для їх живлення відновлювану енергію [8] Вони роблять опалення та охолодження приміщень менш енергоємними.

Перехід до теплових насосів сьогодні та стандартне використання їх у новому будівництві допоможе зменшити викиди вуглекислого газу, оскільки електрична мережа буде переходити на відновлювані джерела. Більше того, ЄС вважає теплові насоси ключовими для забезпечення переходу на чисту енергію та досягнення цілі ЄС щодо вуглецевої нейтральності до 2050 року. Починаючи з 3 мільйонів теплових насосів, встановлених у 2022 році, ЄС планує встановити принаймні 10 мільйонів додаткових теплових насосів до 2027 року [9].

Теплові насоси, які працюють від електроенергії з низьким рівнем викидів, є основною технологією глобального переходу до безпечного та сталого опалення [8, 9]. Теплові насоси, наявні на ринку, у три-п'ять разів енергоефективніші, ніж газові котли. Вони зменшують вплив комерційних та промислових будівель, а також приватних домогосподарств на стрибки цін на викопне паливо, що стало ще більш актуальним через триваючу зараз глобальну енергетичну кризу.

На сьогодні більше однієї шостої світової потреби в природному газі припадає на опалення будівель, а в Європейському Союзі ця цифра ще більша і становить одну третину. Теплові насоси також можуть забезпечувати охолодження повітря, що усу-

ває потребу в окремому кондиціюванні приблизно для 2,6 мільярдів людей, які живуть у регіонах, що потребуватимуть опалення та охолодження до 2050 року. Опалення в будівлях виробляє більше ніж 4 гігатони викидів CO₂ щорічно, що складає 10% від світових викидів. Встановлення теплових насосів замість котлів, що працюють на викопному паливі, значно скорочує викиди парникових газів на всіх основних ринках опалення. Це основна перевага теплових насосів, яка буде збільшуватися з ростом декарбонізації систем електроенергії.

ВИСНОВКИ

Очевидна можливість для власників комерційних будівель, які хочуть зменшити шкідливі викиди, полягає у впровадженні нової системи управління будівлею, яка буде використовувати новітні цифрові технології. Уряди країн також можуть відіграти в цьому ключову роль, впроваджуючи відповідне законодавство, економічні стимули та нові будівельні стандарти, такі, наприклад, як LEED – Лідерство в енергетичному та екологічному проектуванні. Хоча на сьогодні ці ініціативи для деяких власників комер-

ційних та промислових будівель можуть здатися лякаючими, використання інтелектуальних енергозберігаючих технологій в таких будівлях допоможе не тільки зменшити шкідливі викиди в атмосферу, але й скоротити витрати на експлуатацію цих будівель.

ЛІТЕРАТУРА

1. United Nations, Paris Agreement.
2. Smart Buildings: Four considerations creating people-centered smart, digital workplaces.
3. Dept. of Energy; Commercial Buildings Integration Program.
4. NREL.gov; Commercial Building Sensors and Controls Systems: Barriers, Drivers, and Costs.
5. ACEEE.org; Smart Buildings: Using Smart Technology to Save Energy in Existing Buildings.
6. IEA; Tracking Clean Energy Progress 2023.
7. US Dept of Energy; Office of Energy Efficiency & Renewal Energy.
8. IEA 50; Heat Pumps.
9. European Commission; Heat pumps are key to enabling the clean energy transition and achieving the EU's carbon neutrality goal by 2050.




<http://www.meanwell.com>

Драйвери світлодіодів компанії MEAN WELL

з вбудованим коректором коефіцієнта потужності в пластмасових корпусах IDLC/IDLV-25, ODLC/ODLV-45/65 і безкорпусні IDPC/IDPV-25

ODL



IDL



- діапазон вхідних напруг 90...295 В (AC), 127...417 В (DC)
- ККД до 82%
- коефіцієнт потужності 0,9...0,95
- споживана потужність без навантаження 0,5 Вт
- вихідна напруга в режимі стабілізації струму 16,9...24/25,2...36/35...50/47...70
- номінальний вихідний струм, мА 1050/700/500/350
- вихідна потужність 25/45/65 Вт
- пульсації вихідного струму 0,05%_{ном}
- захист від короткого замикання та перегріву
- відповідність вимогам стандартів UL8750, CSA C22.2 NO.250, 13-12; ENEC EN61347-1 & EN61347-2-13, EN62384, GB19510.1, GB19510.14, EN55015, EN61000-3-2 (C), EN61000-3-3, GB17743, GB17625.1, EN61000-4-2, 3, 4, 5, 6, 8, 11; EN61547
- напруга ізоляції 3,7 кВ
- діапазон робочих температур -20...90 °C
- відносна вологість повітря 20...90%
- гарантія 3 роки

IDP



VD MAIS
ДИСТРИБ'ЮЩИЙ
КОНТРАКТНЕ
ВИРОБНИЦТВО

VD MAIS – офіційний дистриб'ютор компанії MEAN WELL в Україні
тел.: (044) 201-0202, info@vdmiais.ua, www.vdmiais.ua

ЛОКАЛІЗАЦІЯ АВТОНОМНОГО МОБІЛЬНОГО РОБОТА ЗА ДОПОМОГОЮ ІНЕРЦІАЛЬНОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО ВУЗЛА: НОВА ТЕХНОЛОГІЯ ДЛЯ ТОЧНОЇ НАВІГАЦІЇ *

ENHANCING ROBOTIC LOCALIZATION WITH IMUS: A FUNDAMENTAL TECHNOLOGY FOR PRECISE NAVIGATION

У статті розглянуто особливості використання сенсорів інерціального вимірювального вузла для локалізації положення автономних мобільних роботів та окреслено основні їх переваги.

Abstract – This article highlights the significance of the inertial measurement unit sensor for localization in robotics and outlines its key benefits.

С. Пімпалкар

S. Pimpalkar

На сьогодні сенсори інерціального вимірювального вузла (Inertial Measurement Unit - IMU) стали невід'ємною частиною точного позиціонування автономного мобільного робота, які надають важливі дані про його рух. Інерціальні вимірювальні вузли інтегрують дані акселерометрів, гіроскопів та магнітометрів, що дозволяє автономним роботам точно визначати своє положення та рух у реальному часі і таким чином надає їм можливість орієнтуватися в динамічно мінливому середовищі.

Інтеграція сенсорів поєднує дані інерціальних вузлів з іншими сенсорами, такими як відеокамери або лідари, щоб підвищити точність локалізації робота шляхом об'єднання кількох джерел даних. Інерціальні сенсори широко використовуються в мобільній робототехніці, безпілотних літальних апаратах і віртуальній/доповненій реальності. Їхня роль у досягненні точної локалізації дозволяє роботам автономно виконувати складні завдання та ефективно взаємодіяти з навколишнім середовищем.

У статті досліджуються особливості використання інерціальних вимірювальних вузлів у складних середовищах, а також, яким чином ці вузли відіграють вирішальну роль у досягненні точної локалізації.

Автономні мобільні роботи (Autonomous Mobile Robots - AMR) потрібні для розумних виробництв і складських приміщень майбутнього. Вони відіграють ключову роль у створенні автоматизованих, стійких і екологічно чистих фабрик. Ці роботи підвищують ефективність виробництва, зменшують відходи та оптимізують управління в промислових умо-

вах експлуатації.

Хоча фабрики майбутнього, можливо, будуть спеціально побудовані та оптимізовані для такої роботи, сьогоднішня адаптація автономних роботів до існуючих виробництв викликає суттєві труднощі. Основна перешкода для впровадження автономних мобільних роботів включає два критичні компоненти: ефективне визначення оптимального шляху і точну локалізацію з постійним оновленням положення робота у динамічному середовищі [1].

Ця стаття присвячена навігації роботів у закритих приміщеннях без використання GPS. Автономний мобільний робот використовує набір сенсорів і алгоритмів для локалізації та навігації. До них належать сенсори зору, такі як камери, лідари і радары, а також сенсори одометрії, такі як кодери коліс та інерціальні сенсори. Інтеграція цих сенсорів забезпечує вичерпні дані для ефективної локалізації робота в динамічному середовищі.

Стаття висвітлює особливості використання автономних мобільних роботів у складному середовищі, розкриває, як інерціальні сенсори допомагають у точній локалізації, що має вирішальне значення для навігації та автономності роботів.

Інерціальний вимірювальний вузол - це мініатюрний пристрій на основі MEMS-технології. Зазвичай він містить триосьовий акселерометр, який вимірює прискорення відносно гравітаційного поля Землі. Тривісні акселерометри використовуються для вимірювання положення відносно осей X, Y, Z, як показано на рис. 1.

* Pimpalkar S. *Enhancing Robotic Localization with IMUs: A Fundamental Technology for Precise Navigation. Technical Article. Скорочений переклад з англійської і коментарі В. Романова*

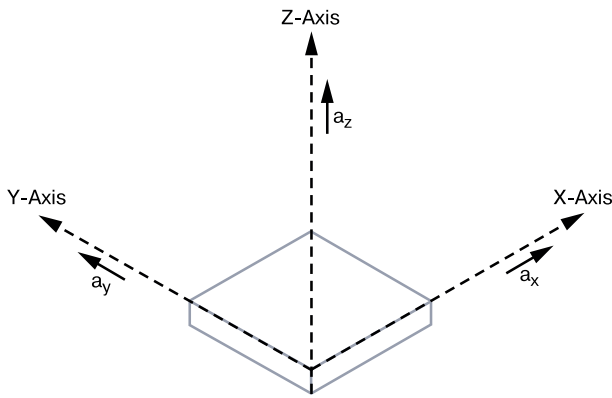


Рис. 1. Вимірювання прискорення по осях X, Y, Z

Триосьовий гіроскоп дозволяє вимірювати кутову швидкість робота (ω_x , ω_y , ω_z) уздовж осей X, Y, Z (рис. 2).

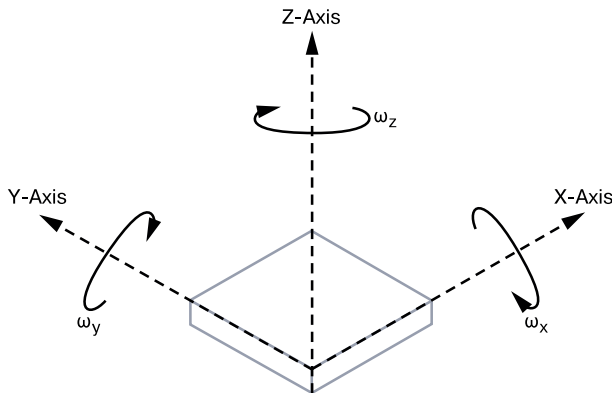


Рис. 2. Вимірювання кутової швидкості вздовж осей X, Y, Z

Високопродуктивний магнітометр забезпечує вимірювання магнітного поля для точної оцінки орієнтації робота в складних умовах. Незважаючи на те, що магнітометри зараз не дуже поширені, вони і досі використовуються в інерціальних вимірювальних вузлах. Крім того, у цих вузлах використовуються температурні сенсори для компенсації температурної похибки та сенсори тиску. Функціональна схема типового інерціального вузла містить не

лише гіроскопи, акселерометри та температурні сенсори, а й АЦП з передавачем даних (рис. 3).

Інерціальний вимірювальний вузол містить вбудовані алгоритми попередньої фільтрації на базі КІХ-фільтрів; засоби калібрування та компенсації виправляють будь-які зміщення або зсуви характеристики сенсора; користувач має можливість обертати внутрішню вісь інерціального вузла, щоб забезпечити відповідність відліку положенню робота перед передачею остаточних даних.

Чому інерціальні вимірювальні вузли використовуються в автономному мобільному роботі?

Для локалізації положення в режимі реального часу з високою швидкістю оновлення даних робот має автономну у реальному часі навігацію на основі спеціальної операційної системи. Сенсори зору, зазвичай, працюють з обмеженою частотою оновлення даних в діапазоні приблизно від 10 до 30 Гц. Навпаки, інерціальні вимірювальні вузли можуть підтримувати високу точність позиціонування робота з максимальною частотою до 200 Гц і більше.

Така висока частота оновлення даних значно підвищує надійність робота при швидкій адаптації до змін орієнтації в динамічному середовищі. Прискорена швидкість оновлення даних також дає змогу автономному роботу надавати позицію під час коротких інтервалів між вимірюваннями. Як результат, інерціальні вузли відіграють ключову роль у локалізації робота у реальному часі, перевершуючи сенсори зору з відповідно невисокою частотою оновлення даних.

Точний розрахунок: інерціальний вимірювальний вузол забезпечує точну оцінку поточного положення робота на основі попередньо відомого положення. Постійно надаючи дані про місцезнаходження, орієнтацію та швидкість протягом короткого часу, інерціальний вузол дозволяє точно оцінювати положення автономного мобільного робота, підтримуючи таким чином надійну навігацію робота у цілому.

Компактний розмір і мала вага: компактний

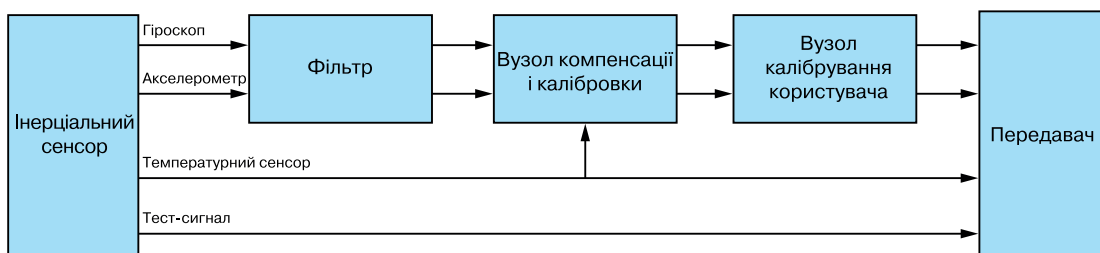


Рис. 3. Функціональна схема типового інерціального вузла

розмір і легка конструкція інерціального вимірювального вузла роблять його ідеальними для інтеграції в мобільні роботи різного призначення. Наприклад, типові розміри інерціального вузла на сьогодні не перевищують площу 33,25x30,75 мм, що забезпечує ефективне розміщення цього вузла без шкоди для маневреності робота.

Надійність у різноманітних середовищах: інерціальний вузол є відносно стійким до електромагнітних перешкод і може працювати в різноманітних промислових середовищах.

Підвищена надійність завдяки прискореній швидкості оновлення даних: сенсори зору зазвичай обмежуються частотою оновлення від ~10 до 30 Гц, інерціальні вузли забезпечують високу точність позиціонування з частотою оновлення до 4 кГц. Висока частота оновлення підвищує надійність, особливо в динамічних середовищах, дозволяючи автономним мобільним роботам швидко оцінити свою позицію за короткий проміжок часу між вимірюваннями.

Чому інерціальний вузол є важливими для автономного мобільного робота, незважаючи на наявність сенсорів зору? Автономний робот, як показано на рис. 4, зазвичай має різноманітні сенсори зору, такі як ToF- камери, RGB-камери, лідари тощо. Незважаючи на великий набір даних, наданий візуальною одометрією, необхідність в інерціальному вузлі залишається. У наведених нижче сценаріях розглядаються відповідні причини.

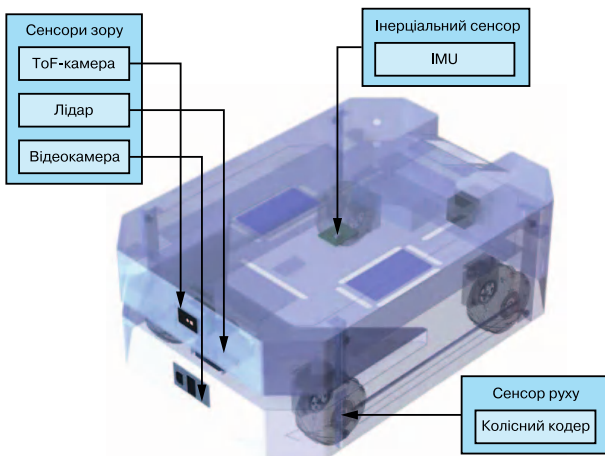


Рис. 4. Сенсори локалізації у складі автономного мобільного робота

1. Автономний робот з рідкісними функціями, що переміщується в коридорі: SLAM-алгоритми одночасної локалізації та відображення (Simultaneous localization and mapping algorithms – SLAM) по суті

працюють шляхом зіставлення спостережених даних від різних сенсорів, які зберігаються на карті для локалізації робота. Коли автономний робот подорожує довгим коридором (рис. 5), він швидко втрачає свою позицію. Через відсутність характерних особливостей коридору, таких як прямі стіни з однорідним кольором, текстурою або відбивною здатністю, тобто його положення важко локалізувати. У цьому випадку інерціальний вимірювальний вузол діє як єдина система орієнтування, надаючи інформацію про напрямки і орієнтацію мобільного робота.

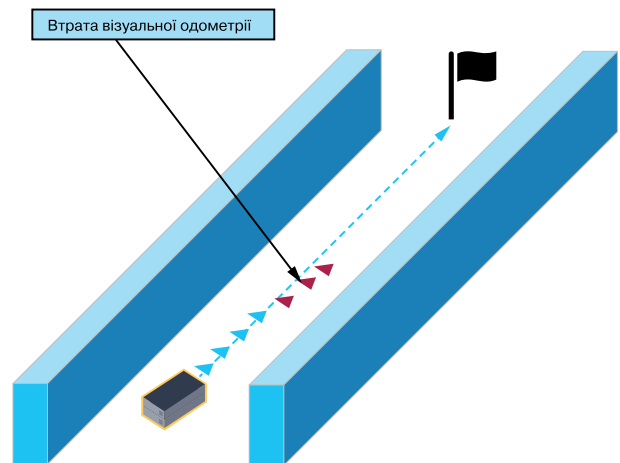


Рис. 5. Приклад того, як автономний робот втрачає візуальну одометрію у коридорі

2. Обмеження радіусу дії сенсорів зору під час роботи у великому відкритому просторі, такому як величезний склад (наприклад, 50x450 м), обмежує можливість точної локалізації. Автономний мобільний робот зазнає труднощів з локалізацією, оскільки його функції виходять за межі діапазону сенсорів зору (наприклад, максимальний радіус дії лідарів становить зазвичай приблизно від 10 до 15 м). Як показано на рис. 6, одометрія автономного робота втрачається через великий простір. Крім того, склади часто мають однакові елементи, що ускладнює роботу сенсорів зору. У таких сценаріях інерціальний вузол та колісні кодери є єдиними надійними джерелами для точної автономної локалізації робота.

Під час маневрування на схилі традиційний SLAM-алгоритм локалізації і відображення стикається з проблемою, покладаючись тільки на показання лідара, оскільки дані 2D-простору не мають інформації про градієнт. Отже, схили помилково сприймаються як стіни або перешкоди, що призводить до похибок, щодо прив'язки до електронної карти простору. У результаті звичайні підходи SLAM-алгоритму із 2D-параметрами стають неефективними на

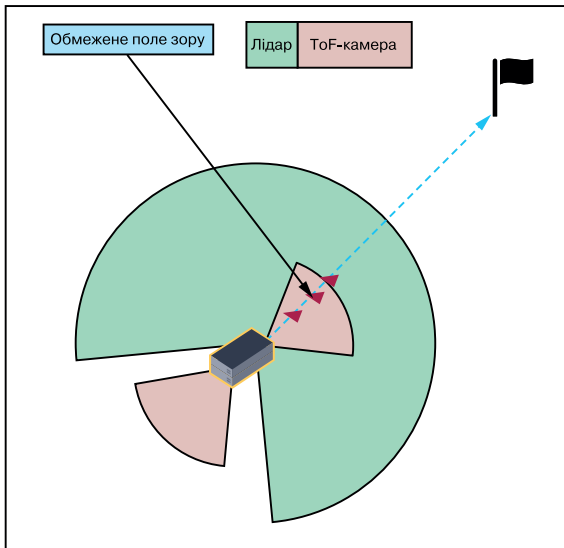


Рис. 6. Приклад обмеженого поля огляду сенсорів зору, що заважає автономному роботу локалізувати позицію у великому відкритому просторі

схилах. Інерціальні вимірювальні вузли допомагають вирішити цю проблему завдяки отриманню даних про градієнти (рис. 7), щоб ефективно управляти навігацією на схилі.

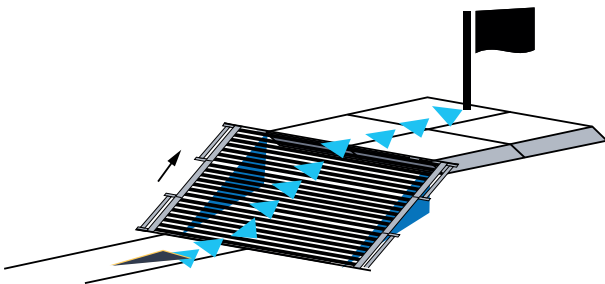


Рис. 7. Рух автономного мобільного робота по схилу

Чутливість до факторів навколишнього середовища – сенсори типу лідара можуть бути чутливі до різних факторів навколишнього середовища, таких як навколишнє освітлення, пил, туман або дощ. Ці фактори можуть погіршити точність отриманих даних від сенсора і, у свою чергу, вплинути на продуктивність роботи SLAM-алгоритму. Подібним чином на сенсори впливають відбивні поверхні та інші рухомі об'єкти (інші роботи або персонал), що ще більше заплутує роботу SLAM-алгоритму. У табл. 1 показано, як середовище впливає на якість роботи сенсорів. Інерціальні вимірювальні сенсори можуть надійно працювати в різних промислових середовищах, що робить їх універсальним вибором для застосування у мобільних роботах.

Таблиця 1. Оцінка якості роботи різних типів сенсорів з точки зору локалізації автономних роботів

Тип сенсору	Вплив недостатнього освітлення	Вплив руху робота	Вплив відбиття від поверхні приміщення	Залежність від геометрії приміщення
RGB-камера	Є	Є	Немає	Немає
ToF-камера	Немає	Є	Є	Є
Лідар	Немає	Є	Є	Є
Радар	Немає	Є	Є	Є
Колісні кодери	Немає	Немає	Немає	Немає
Інерціальний вузол	Немає	Немає	Немає	Немає

Однак жоден сенсор не є ідеальним! Хоча інерціальний вузол має переваги перед сенсорами зору, але його використання пов'язане з певними ризиками та обмеженнями [2]:

1. Шум: інерціальні сенсори зазнають вплив шуму, який може погіршити точність навігації та управління роботом. Щоб компенсувати вплив шуму, в цих сенсорах часто використовуються вдосконалені методи фільтрації на основі фільтрів Калмана або КІХ-фільтрів.

2. Зміщення характеристики: інерціальні сенсори накопичують похибку зміщення з часом, що може призвести до помилок в орієнтації та оцінці руху робота. Щоб вирішити цю проблему, алгоритми оцінки зміщення використовують постійне оновлення поточних показань цього сенсора.

3. Нелінійність: інерціальні сенсори мають похибку нелінійності, що може ускладнити обробку та інтерпретацію даних. Щоб компенсувати нелінійність, їх потрібно періодично калібрувати та вносити відповідні поправки.

4. Випадкове блукання: інерціальні сенсори чутливі до зовнішніх термомеханічних навантажень, що спричиняють похибки, викликані випадковим блуканням кута у гіроскопі та випадковим блуканням швидкості в акселерометрі.

Як можна зменшити вплив цих факторів? Відповідь полягає у об'єднанні сенсорів. Як допомагає така інтеграція сенсорів:

1. Підвищується надійність і точність даних.
2. Краще оцінюються невимірні стани.
3. Збільшується охоплення простору, та безпека руху робота.

Значення алгоритму об'єднання сенсорів:

1. Методи оцінки стану, такі як розширена фільт-

рація Калмана, можуть компенсувати похибки та нестабільність зсуву характеристики автономного робота. Похибки тангажу та крену гіроскопа можна усунути шляхом вимірювання прискорення земного тяжіння. Алгоритм відстежує та виправляє дрейф зсуву характеристики робота.

2. Застосування фільтра Калмана дає можливість підтримати оцінку минулого, теперішнього та майбутнього (прогнозного) станів робота. На рис. 8 показано дію спрощеного алгоритму Калмана. Забезпечується синхронізація вимірювань між різними інтегрованими сенсорами, прогнозування позиції робота та оцінка похибок, а також оцінка невизначеності прогнозованого значення позиції робота.

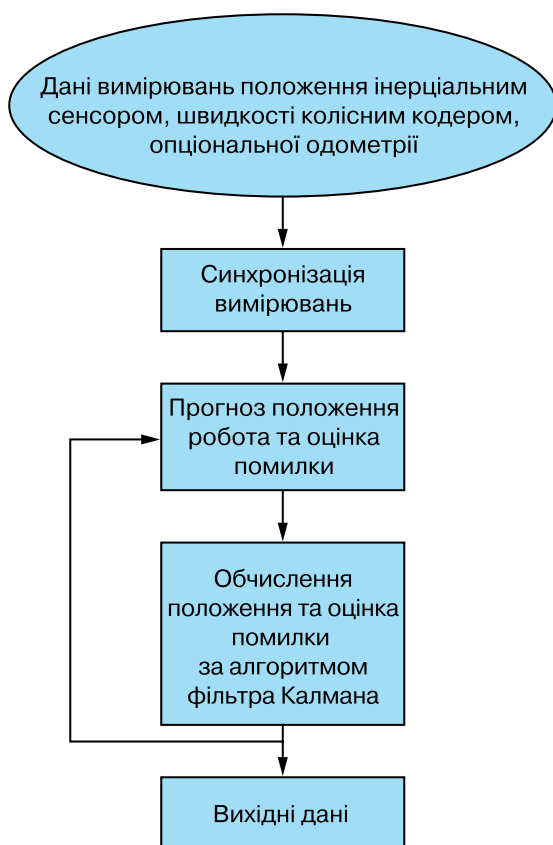


Рис. 8. Спрощений алгоритм фільтра Калмана

У типовій системі управління автономним мобільним роботом на основі спеціальної операційної системи сенсори зору разом із інерціальними сенсорами та колісними одометрами (рис. 9) об'єднані за допомогою програмного пакету з відкритим кодом під назвою `robot_localization` [3], який використовує алгоритм Калмана. Цей пакет дозволяє інтегрувати велику кількість сенсорів з різними даними, включно тривимірні оцінки положення та орієнтації

робота, а також параметри лінійних та кутових швидкостей і прискорень. Всі ці параметри обробляються SLAM-алгоритмом локалізації. Результати локалізації виражаються наступними параметрами:

- позиція робота = $(X, Y, Z, \text{крен}, \text{нахил}, \text{поворот})$;
- швидкість робота = $(X', Y', Z', \text{крен}', \text{нахил}', \text{поворот}')$;
- прискорення робота = $(X'', Y'', Z'', \text{крен}'', \text{нахил}'', \text{поворот}'')$.

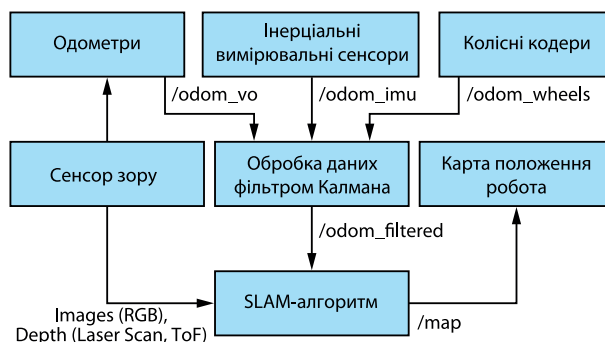


Рис. 9. Типова система інтеграції сенсорів із використанням спеціальної операційної системи

ВИСНОВКИ

На сьогодні інерціальні вимірювальні сенсорні вузли є обов'язковими для локалізації положення автономних мобільних роботів, оскільки вони забезпечують оцінку орієнтації та відстеження руху робота та забезпечують реакцію у реальному часі з високою швидкістю оновлення даних [4]. Це дозволяє автономному мобільному роботу швидко орієнтуватися у різних динамічних середовищах. Інтеграція сенсорів на основі фільтра Калмана дозволяє поєднувати різні за принципом роботи сенсори, щоб компенсувати обмеження у використанні кожного типу сенсора у складі мобільного робота.

ЛІТЕРАТУРА

1. Shoudong Huang and Gamini Dissanayake. "Robot Localization: An Introduction." John Wiley & Sons, Inc., August 2016.
2. Oliver J. Woodman. "An Introduction to Inertial Navigation." University of Cambridge, August 2007.
3. Robot_localization 2.6.12 documentation. Tom Moore, 2016.
4. Randy Carver and Mark Looney. "MEMS Accelerometer Calibration Optimizes Accuracy for Industrial Applications." EE Times, October 2007.



Портативні осцилографи R&S®Score Rider RTH

R&S®Score Rider RTH забезпечує функціональність восьми приладів:

- осцилографа,
- логічного аналізатора,
- аналізатора протоколів
- реєстратора даних
- цифрового мультиметра
- аналізатора спектру
- аналізатора гармонік і частотоміра
- спеціальний режим для побудови XY-діаграм
- режим розгортання та випробування по масці
- користувальницькі сценарії

- максимальна частота дискретизації 5 ГГц
- максимальний обсяг пам'яті 500 тисяч відліків, 50 млн відліків сегментованої пам'яті
- швидкість захоплення даних 50 000 осцилограм/с
- роздільна здатність АЦП 10 біт
- ізольовані входи відповідають категоріям CAT IV 600 V/CAT III 1000 V
- кольоровий сенсорний дисплей 7.0", 800×480 пікселів
- ступінь захисту IP51, відповідно до IEC 60529/IP51
- аналіз цифрових сигналів (логічний аналізатор) по 8 каналах, смуга пропускання 250 МГц, частота дискретизації 1,25 ГГц, максимальний обсяг пам'яті 125000 відліків
- чутливість каналу вертикального відхилення від 2 мВ/под. до 100 В/под.

- діапазон зсуву до 200 В
- у 4-канальних моделях функція цифрового мультиметра по кожному з аналогових каналів
- 37 функцій автоматичного вимірювання
- збереження історії та режим сегментованої пам'яті
- аналіз протоколів шин I2C/SPI, UART, CAN/LIN, CAN-FD, SENT
- аналізатор спектру, аналізатор гармонік, частотомір
- безпроводова локальна мережа та Ethernet для дистанційного керування через Інтернет і швидкого доступу до даних
- просте налаштування параметрів поворотним регулятором

Осцилограф R&S®Score Rider поставляється з усім необхідним приладдям

ЯК ЗАБЕЗПЕЧИТИ ВІДПОВІДНІСТЬ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ СТАНДАРТАМ ПРОМИСЛОВОЇ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ БЕЗПЕКИ ЗА ДОПОМОГОЮ ВИСОКОЕФЕКТИВНОГО СУПЕРВІЗОРА НАПРУГИ, ЧАСТИНА 1

IMPROVING INDUSTRIAL FUNCTIONAL SAFETY COMPLIANCE WITH HIGH PERFORMANCE VOLTAGE SUPERVISORS, PART 1

У статті показано як високоефективні супервізори дозволяють системам забезпечити відповідність стандарту функціональної безпеки IEC 61508.

Abstract – The article shows how high-performance supervisors enable systems to comply with the IEC 61508 functional safety standard.

Б. Боррес, К. Макатангей

B. Borres, C. Macatangay



Питання:

Як можна використовувати високоефективні системи управління для покращення відповідності стандартам з промислової функціональної безпеки?

Відповідь:

Завдяки інтегрованим функціям безпеки високоефективні супервізори (монітори) напруги допомагають системам відповідати стандарту функціональної безпеки IEC 61508, покращуючи продуктивність системи відповідно до вимог стандарту, що стосуються кількісних показників надійності, архітектурних обмежень і безпеки систем у цілому.

Відповідність функціональній безпеці зазвичай розглядається в критично важливих для безпеки програмах у різних галузях [1], де збої можуть завдати шкоди людям, власності та навколишньому середовищу. Розробники систем сертифікують свої проекти відповідно до стандартів функціональної безпеки, щоб забезпечити користувачам впевненість у використанні їхніх виробів, поставляти свої вироби в різні країни, де діють відповідні стандарти функціональної безпеки. У статті розглядаються особливості високопродуктивних схем контролю [2], які забезпечують відповідність стандартам функціональної безпеки, таким як IEC 61508 [3].

Стандарт IEC 61508 [3], також відомий як стандарт під назвою «Функціональна безпека електричних/електронних/програмованих електронних систем безпеки, спрямований на забезпечення загальних вимог до специфікації, проектування та експлуатації всіх типів Е/Е/РЕ систем безпеки.» Він застосовується у всіх галузях промисловості, оскільки являється основою для розробки кількох галузевих стандартів, таких як IEC 61511 [4] для переробної промисловості, IEC 62061 [5] для машинобудування, IEC 61513 [6] для атомної енергетики, ISO 26262 [7] для автомобільної промисловості, IEC 62279 [8] у залізничному транспорті, IEC 62304 [9] у медичних пристроях [10] та інші, як показано на рис. 1.

Хоча галузевий стандарт (рис. 1) завжди матиме пріоритет над стандартом з функціональної безпеки IEC 61508, він зазвичай вимагає використання відповідних SRS компонентів (де SRS – Supplementary Restraint System або система пасивної безпеки, яка забезпечує захист у екстремальних дорожніх ситуаціях), що підтверджує відповідність галузевого стандарту стандартам з функціональної безпеки. Цього можна досягти, розробляючи компоненти відповідно до галузевого стандарту, наприклад, ISO 262627, і дотримуючись базового стандарту безпеки IEC 61508, наприклад, IEC 61511 [11], або використовуючи стандартні компоненти та додаткові архітектурні засоби щодо зменшення втрат.

Що являє собою інструментальна система безпеки або safety instrumented system (SIS) у технологічних процесах? Згідно з документами Національного інституту стандартів (NIST SP 800-82r3 ANSI/ISA-84.00.01) це система, яка складається з датчиків, логічних розв'язувачів задач і кінцевих елементів управління. Метою цих компонентів є пе-

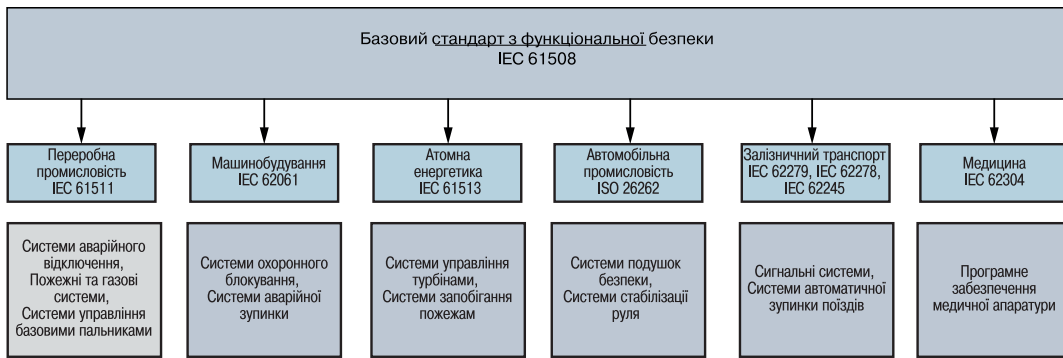


Рис. 1. Перелік основних стандартів з функціональної безпеки

реведення технологічного процесу в безпечний стан, коли задані умови експлуатації порушуються. Інші терміни, які використовуються разом з SIS, включають систему аварійного відключення (emergency shutdown system – ESS), систему безпечного відключення (safety shutdown system – SSD) і систему безпечного блокування (Safety Interlock System – SIS).

У секторі переробної промисловості – це система електричного управління, яка пов’язана з безпекою у машинобудуванні (safety-related electrical control system – SRECS), та система контрольно-вимірювального обладнання та управління (instrumentation and control – I&C) в атомній енергетиці. У цій статті для узагальнення усіх цих систем буде використовуватися термін SIS [11]. На рис. 2 показано типову систему SIS, яка включає принаймні одну інструментальну функцію безпеки (safety instrumented function – SIF). SIF складається з вхідної підсистеми, підсистеми логічного вирішувача задач та підсистеми кінцевих елементів. Усі вони спрямовані на переведення контрольованого обладнання (Equipment Under Control – EUC) у безпечний стан, коли виникає вимога.



Рис. 2. Типова структурна схема системи інструментальної безпеки SIS

Контрольоване обладнання EUC відноситься до захищеної системи SIS. На рис. 3 показана типова структурна схема SIF, а також приклади підсистем. Вхідна підсистема, що складається принаймні з одного датчика, діє як система моніторингу, яка може виявляти збої та надсилає відповідні сигнали до логічного розв’язувача задач. Логічний розв’язувач обробляє отримані сигнали, а потім вирішує, яким буде наступний крок. Це може бути крок, за яким останній елемент переводить систему SIS у безпечний стан за допомогою виконавчих пристроїв, таких як автоматичні вимикачі, реле або запірні клапани [11].

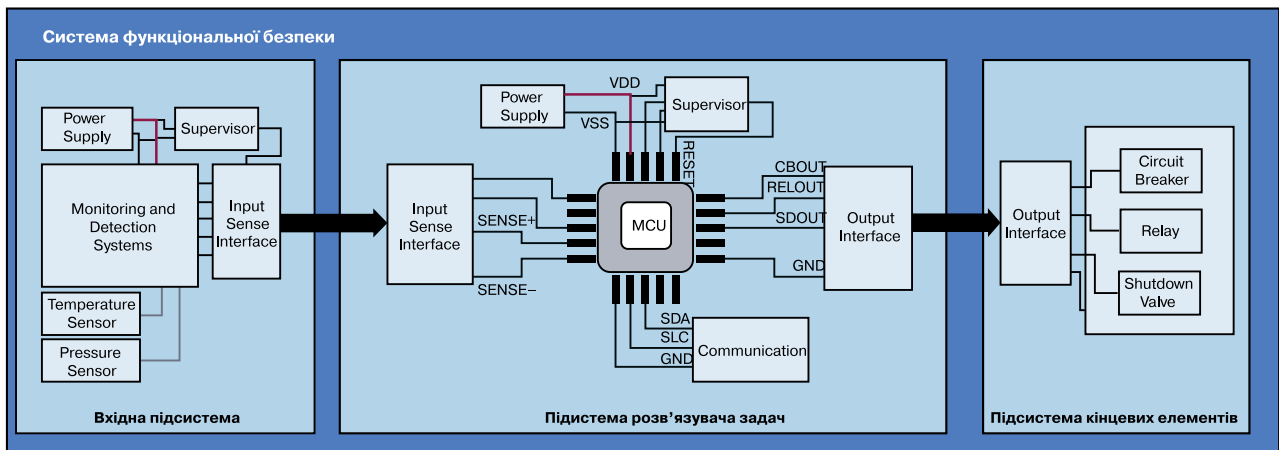


Рис. 3. Типова структура інструментальної функції безпеки SIF

Відмітимо, що системи або схеми моніторингу важливі для використання у системі інструментальної безпеки SIS [2]. Вони можуть функціонувати (рис. 3) у вхідній підсистемі для виявлення відхилень, у підсистемі логічного розв’язувача задач для моніторингу джерела живлення чи функцій мікроконтролера та виявлення збоїв, або як елемент системи SIF, яка переводить контрольовану технологічну систему у безпечний стан через сигнал скидання (Reset Signal).

Розглянемо, як високопродуктивні схеми моніторингу забезпечують відповідність вимогам промислової функціональної безпеки. Відповідність стандарту IEC 61508 можна оцінити за допомогою рівня повноти безпеки (SIL). Рівень SIL оцінюється для кожної функції SIF і вказує на те, наскільки якісно ця функція SIF виконує свою роботу в управлінні ризиком. Стандарт IEC 61508 визначає чотири рівні SIL: від SIL 1 до SIL 4, причому SIL 4 є найвищим рівнем функціональної безпеки.

Як правило, попередньо шляхом аналізу визначається оцінка ризику, щоб задати необхідні функції безпеки, а потім розраховується коефіцієнт зниження ризику, тобто необхідний рівень SIL. Один із методів таких розрахунків із калібруванням матриці ризиків наведено в [12], у розділі Process Safebook 1. Конкретний рівень SIL задає власні вимоги, на які впливають наступні три фактори [3,11,13]: кількісні вимоги до надійності, архітектурні обмеження та інтегрована цілісність безпеки усєї системи. Для кожного фактора далі показано, як схеми моніторингу можуть забезпечити відповідність системи стандарту з функціональної безпеки IEC 61508.

Кількісні вимоги до надійності. У табл. 1 наведено вимоги стандарту IEC 61508-1 до цілісності безпеки (розділ 7.6.2.9), де визначено SIL щодо цільової міри відмови функції безпеки SIF. Зазначимо, що PFD_{avg} – це середня ймовірність небезпеч-

Таблиця 1. Рівень SIL системи інструментальної безпеки SIS відносно режиму роботи [3, 11]

Рівень інтегральної безпеки SIL	Режим роботи з низьким числом запитів PFD_{avg}	Режим роботи з високим числом запитів PFH
SIL 4	$\geq 10^{-5}$ до $< 10^{-4}$	$\geq 10^{-9}$ до $< 10^{-8}$
SIL 3	$\geq 10^{-4}$ до $< 10^{-3}$	$\geq 10^{-8}$ до $< 10^{-7}$
SIL 2	$\geq 10^{-3}$ до $< 10^{-2}$	$\geq 10^{-7}$ до $< 10^{-6}$
SIL 1	$\geq 10^{-2}$ до $< 10^{-1}$	$\geq 10^{-6}$ до $< 10^{-5}$

ної відмови за запитом функції безпеки для режиму роботи з низьким числом запитів. PFH означає середню частоту небезпечних відмов функції безпеки на годину для режиму з високим числом запитів або для безперервного режиму роботи.

Кілька факторів, що впливають на середню ймовірність випадкових збоїв апаратного забезпечення, охопленого діагностичним тестом. Інтервал виконання діагностичних тестів і частота небезпечних невиявлених відмов (Dangerous Undetected Failure – DU) λ_{DU} наведені в [3,14,15]. Небезпечні невиявлені збої – це такі, які не можуть бути виявлені системою діагностикою, а їх можна ідентифікувати лише за допомогою спеціального контрольного тесту, як показано на рис. 4. У цьому випадку важливо використовувати схеми контролю, оскільки вони допомагають у виявленні небезпечних збоїв, діючи як діагностичні заходи для зменшення ймовірності таких збоїв. Таким чином, вони дають можливість виявляти небезпечні раніше непомічені збої.

Архітектурні обмеження. Окрім кількісних вимог до надійності, стандарт IEC 61508 містить вимоги до надійності та структури системи SIS. Ці архітектурні обмеження допомагають, коли необхідно вибрати апаратну реалізацію. Відповідно до розділу 7.4.4 стандарту IEC 61508-2 одним із напрямків,



Рис. 4. Типи відмов, які впливають на вимоги до надійності [12]

який можна використовувати для забезпечення необхідного рівня SIL, є напрямком (алгоритм) 1Н. Цей алгоритм базується на концепції апаратної відмовостійкості (hardware fault tolerance – HFT) і наявності безпечної частки відмов (safe failure fraction – SFF).

Архітектурні обмеження вимагають враховувати складність і тип елемента. Елемент типу А, або простий компонент, має чітко визначені режими відмови, передбачувану поведінку в умовах несправності та надійні дані про несправності, що відповідають необхідному небезпечному рівню невиявлених відмов. В іншому випадку він вважається елементом типу В або складним компонентом. У табл. 2 наведено вимоги до елемента типу В, до яких відносяться сучасні інтегральні мікросхеми.

Таблиця 2. Максимально допустимий рівень SIL для компонента або підсистеми В [3]

Безпечна частка відмов SFF, %	Апаратна відмовостійкість		
	0	1	2
< 60	Не забезпечується	SIL 1	SIL 2
60 - 90	SIL 1	SIL 2	SIL 3
90 - 99	SIL 2	SIL 3	SIL 4
≥ 99	SIL 3	SIL 4	SIL 4

Безпечна частка відмов SFF є мірою відмов елемента в безпечному стані, тоді як апаратна відмовостійкість N означає, що N+1 є мінімальною кількістю несправностей, які можуть призвести до втрати функції безпеки, що вказує на необхідність резервування цього елемента. Це означає, що якщо апаратна відмовостійкість системи HFT=0, один збій може спричинити втрату функції безпеки, а якщо HFT=1, то це означає, що знадобляться два збої, щоб спричинити таку ж втрату.

Функція SFF може бути виражена як:

$$SFF = \frac{\sum \lambda_{SD} + \sum \lambda_{SU} + \sum \lambda_{DD}}{\sum \lambda_{SD} + \sum \lambda_{SU} + \sum \lambda_{DD} + \sum \lambda_{DU}}$$

Діагностичне охоплення (Diagnostic Coverage) може бути виражено як:

$$Diagnostic\ Coverage = \frac{\sum \lambda_{DD}}{\sum \lambda_{DD} + \sum \lambda_{DU}}$$

де λ – частота відмов, SD – виявлення безпечних відмов, SU – невиявлення безпечних відмов, DD – виявлення небезпечних відмов, DU – невиявлення

небезпечних відмов, як показано на рис. 4.

Таке діагностичне покриття оцінює, наскільки ефективні діагностичні заходи системи безпеки SIS у виявленні небезпечних збоїв. Це впливає на кількісну надійність системи і пов'язане з функцією SFF, як видно з рівнянь 1 і 2. Стандарт IEC 61508-2 у Додатку А містить спосіб визначення максимально допустимого діагностичного покриття, яке може бути забезпечено за допомогою різних методів та заходів щодо виявлення випадкових збоїв обладнання. У табл. 3 наведена класифікація надійності систем безпеки за показником діагностичного охоплення згідно з стандартом IEC 61508.

Таблиця 3. Класифікація надійності систем безпеки за показником діагностичного охоплення [3, 11]

Діагностичне охоплення, %	Класифікація надійності
< 60	Не відповідає вимогам стандарту IEC 61508-2
60 - < 90	Низька
90 - < 99	Середня
≥ 99	Висока

Табл. 4 містить розділ табл. А.1 додатку А стандарту IEC 61508-2, у якому визначено несправності або відмови, що слід передбачити під час кількісного визначення ефекту випадкових відмов апаратного забезпечення, які слід враховувати при визначенні функції SFF. Зазначимо, що модель діагностичного покриття несправностей необхідна, щоб під час проєктування технологічної системи забезпечити відповідний рівень діагностичного покриття. Модель діагностичного покриття несправності включає режими несправностей, такі як постійні несправності, несправності типу обриву, відкриті або високоімпедансні виходи, а також короткі замикання між сигнальними лініями. Усі вони можуть бути виявлені за допомогою вискоєфективного монітора напруги, а саме такі несправності, як перенапруга або зниження чи провал напруги.

Систематична безпека. Вимоги до систематичної цілісності безпеки є якісними за своєю природою і оцінюють, наскільки процес розробки системи є ефективним щодо виявлення та усунення відмов. Для цього необхідна ретельна перевірка проєктних рішень, технології виробництва та процедур випробування апаратного та програмного за-

Таблиця 4. Вимоги до діагностичного покриття інтегральних та дискретних компонентів [3]

Дискретні компоненти	Вимоги до діагностичного покриття інтегральних компонентів		
	Низький рівень, 60%	Середній рівень, 90%	Високий рівень, 99%
Цифрові входи/виходи	Постійні несправності	Діагностичне покриття відмов	Діагностичне покриття відмов типу дрейфу або осциляцій
Аналогові Входи/виходи	Постійні несправності	Діагностичне покриття відмов типу дрейфу або осциляцій	Діагностичне покриття відмов типу дрейфа або осциляцій
Джерело живлення	Постійні несправності	Діагностичне покриття відмов типу дрейфу або осциляцій	Діагностичне покриття відмов типу дрейфу або осциляцій

безпечення. Чим вищий рівень SIL, тим суворішою має бути перевірка.

Для підтвердження відповідності вимогам функціональної безпеки вимагається більший обсяг документації, яку мають надати виробники компонентів системи. Стандарт IEC 61508 визначає кілька методів і заходів, які розробники повинні застосовувати для усунення систематичних збоїв на різних етапах життєвого циклу системи безпеки SIS. При цьому в табл. 5 наведені деякі пункти табл. А.16 стандарту IEC 61508-2.

У цій таблиці показано методи та заходи, необхідні для контролю систематичних збоїв, спричинених стресом і впливом навколишнього середовища, де М означає обов'язкові, HR означає суворо рекомендовані заходи, а R означає рекомендовані заходи. Під цими позначками вказано рівень зусиль, необхідний для виконання відповідних діагностичних заходів. Наприклад, для рівня SIL 3 обов'язковим є використання заходів проти коливань напруги, таких як монітори напруги, у той час як суворо рекомендується використовувати моніторинг послідовності програм, наприклад сторожові таймери, де

діагностичне охоплення має становити щонайменше 90%.

Іншим ключовим фактором щодо вимоги повної безпеки є використання системи управління якістю. Це можна забезпечити, сертифікувавши організацію виробника за системою управління якістю ISO 9001:2015.16 Відзначимо, що більшість вимог стандарту IEC 61508 щодо загального життєвого циклу безпеки та оцінки функціональної безпеки збігаються з вимогами стандарту ISO 9001. Таким чином, наявність сертифіката якості може сприяти швидшому процесу сертифікації системи на відповідність вимогам з функціональної безпеки [17].

Використання інтегрованих рішень для покращення параметрів функціональної безпеки. Проектування систем з необхідними засобами функціональної безпеки передбачає впровадження відповідних систем і компонентів для забезпечення надійної та безпечної роботи в разі виникнення відмови чи несправності, які потребують додаткових апаратних та фінансових витрат. З цієї причини використання компонентів із інтегрованими функціями безпеки може знизити ці витрати, спростити їх

Таблиця 5. Деякі приклади контролю з табл. А.16 стандарту IEC 61508-2, Додаток А [3]

Вимірювання	SIL 1	SIL 2	SIL 3	SIL 4
Заходи проти пробою напруги, коливань напруги, перенапруги, низької напруги та інших явищ, таких як коливання частоти джерела живлення змінного струму, які можуть призвести до небезпечної несправності	M низький	M середній	M середній	M високий
Моніторинг послідовності програм	HR низький	HR низький	HR середній	HR високий
Моніторинг підвищення температури	HR низький	HR низький	HR середній	HR високий
Моніторинг щодо виявлення обривів і коротких замикань в сигнальних лініях	R	R	R	R
Захист коду	R низький	R низький	R середній	R високий

впровадження на системному рівні, підвищити надійність системи завдяки зменшенню кількості додаткових компонентів і збільшити діагностичне охоплення за рахунок зменшення інтервалів діагностичного тестування [13].

Це можна побачити на рис. 5, де показано, як відповідний мікроконтролер може забезпечити достатнє діагностичне покриття для важливих щодо безпеки ланцюгів за допомогою кількох функцій безпеки, об'єднаних в одному корпусі замість використання декількох схем моніторингу і контролю. Такий монітор системи живлення допомагає забезпечити відповідність функціональній безпеці, враховуючи вимоги щодо заходів проти пробою напруги, коливань напруги, перенапруги, низької напруги та інших збоїв, таких як зміна частоти джерела живлення змінного струму, що може призвести до небезпечної відмови системи у цілому. Крім того, цей мікроконтролер забезпечує моніторинг послідовності програм.

Перша вимога підкреслює необхідність виявлення наднапруги чи провалу напруги для всіх рівнів напруги, критичних для безпеки. Друга вимога реалізована сторожовим таймером, вбудованим у цей мікроконтролер. На рис. 5 усі ці потреби задовольняє один мікроконтролер, який має сім моніторів для різних джерел живлення та вбудований сторожовий таймер з інтерфейсом I2C.

Іншим фактором швидкого впровадження такого рішення є наявність відповідної документації з безпеки у тому числі на усі системні компоненти, яка потрібна під час сертифікації розробленого виробу за стандартом з функціональної безпеки IEC 61508.

ВИСНОВКИ

В статті показано вирішальну роль високоефективних мікроконтролерів в забезпеченні відповідності вимогам промислової функціональної безпеки. Розглянуто основний стандарт функціональної безпеки IEC 61508 і його вплив на галузеві стандарти. Визначено ключові терміни цього стандарту, такі як система безпеки, функція безпеки та рівень повноти безпеки, показано основні вимоги стандарту IEC 61508, включаючи кількісні параметри надійності, архітектурні обмеження та системну цілісність безпеки. На конкретних приклад розкриті переваги використання високопродуктивних схем моніторингу джерел живлення з вбудованими сторожовими таймерами.

ЛІТЕРАТУРА

1. Tom Meany. "Functional Safety and Industry 4.0." Analog Devices, Inc., March 2018.
2. Noel Tenorio and Anthony Serquica. "High Performance Voltage Supervisors Explained–Part 1." Analog Dialogue, Vol. 58, No. 2, April 2024.
3. IEC 61508 All Parts, Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems. International Electrotechnical Commission, 2010.
4. IEC 61511 All Parts, Functional Safety–Safety Instrumented Systems for the Process Industry Sector. International Electrotechnical Commission, 2016.
5. IEC 62061–Safety of Machinery– Functional Safety of Safety-Related Electrical, Electronic, and Programmable Electronic Control Systems. International

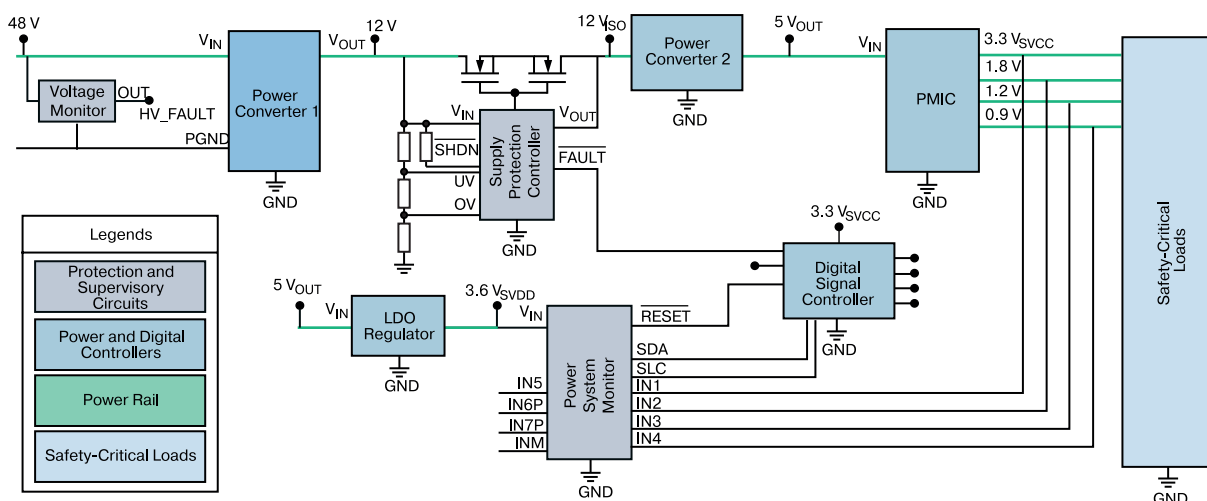


Рис. 5. Приклад апаратної реалізації інтегрованої функції безпеки

Electrotechnical Commission, 2005.

6. IEC 61513–Nuclear power plants-Instrumentation and control important to safety-General requirements for systems. International Electrotechnical Commission, 2011.

7. ISO 26262 All Parts, Road Vehicles Functional Safety. International Organization for Standardization, 2011.

8. «IEC 62279. Railway Applications-Communication, Signaling and Processing Systems: Software for Railway Control and Protection Systems.» International Electrotechnical Commission, 2015.

9. IEC 62304–Medical Device Software–Software life cycle processes. International Electrotechnical Commission, 2006.

10. FAQs: Functional Safety for Medical Devices. ТБВ СьД, 2024.

11. Marvin Rausand. Reliability of Safety Critical Systems: Theory and Applications. Wiley, January 2014.

12. Process Safebook 1: Functional Safety in the Process Industry. Rockwell Automation, March 2013.

13. Tom Meany. “Functional Safety for Integrated Circuits.” Analog Devices, Inc., February 2018.

14. Loren Stewart. “Back to Basics 16 PFDavg.” Exida, October 2019.

15. Loren Stewart. “Back to Basics 17 PFH.” Exida, November 2019.

16. ISO 9001:2015 Quality Management Systems—Requirements. 2015.

17. «Functional Safety: A Total Quality Approach.» RTP Corp., 2021.



За мотивами картини
В.О. Тропінна
"Кружевниця"

[Від ремесла до мистецтва]

ДРУКОВАНІ ПЛАТИ

- проектування

Проектування друкованих плат у НВФ VD MAIS – це:

- багаторічний досвід конструювання і знання специфіки:
 - розробки електронних пристроїв
 - технології виробництва друкованих плат
 - різних систем проектування CAD-CAM (P-CAD, Mentor Graphics, CAM-350 и пр.)
- використання всіх можливостей виробника друкованих плат і контрактного виробництва VD MAIS

Системи екологічного менеджменту и менеджменту якості фірми сертифіковані на відповідність вимогам стандартів ISO 9001:2015, ISO 14001:2015, IATF 16949:2016 і ISO 13485:2016

VD MAIS
ДИСТРИБ'ЮЩА +
КОНТРАКТНЕ
ВИРОБНИЦТВО

тел.: (044) 201-0202, info@vdmiais.ua, www.vdmiais.ua

VD MAIS
PCB Professionally



Цифрові осцилографи змішаних сигналів RTB2004 для учбових лабораторій

Основні характеристики:

- 4 канали для дослідження аналогових сигналів
- смуга пропускання 70, 100, 200 та 300 МГц різних моделей
- частота дискретизації 1.25 ГГц/канал, 2.5 ГГц у режимі чергування
- 10-розрядний АЦП
- обсяг пам'яті 10 мільйонів відліків на канал
- максимальна чутливість каналу вертикального відхилення 1 мВ
- 10.1" емісійний сенсорний екран, 1280×800 пікселів
- підтримка жестів для масштабування та деталізації сигналів
- 16-канальний логічний аналізатор, частота дискретизації 1.25 ГГц
- можливість синхронізації зовнішніми сигналами
- аналіз сигналів у шинах I2C, SPI, UART/RS-232/RS-422/RS-485, CAN, LIN
- 4-розрядний генератор тестових послідовностей
- генератор сигналів: синус, прямокутні імпульси, меандр, трикутний, пилкоподібний, SinC, експоненціальний, сигнал довільної форми
- реєстрація сигналів у наступних режимах роботи: вибірка, огинаюча, пікове значення, висока роздільна здатність, усереднення результатів вимірювання, огинаюча + пікове значення
- збереження та поповнення бази даних форми сигналу довільної форми
- можливість налаштування інтерфейсу користувача
- розширений набір режимів синхронізації
- виконання основних математичних операцій над сигналами (+, -, *, /), спектральний аналіз досліджуваних сигналів (ШПФ, 128 тис. точок)
- робота у локальній мережі
- документування у вигляді знімків екрана або налаштувань приладу, які зберігаються на зовнішній Flash-накопичувач
- автоматичний вибір налаштувань по вертикалі, горизонталі та синхронізації для оптимального перегляду активних сигналів

<https://www.rohde-schwarz.com>

ПУЛЬСОВА ДІАГНОСТИКА ТА ЗАСОБИ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ І ОБРОБКИ ПУЛЬСОВОЇ ХВИЛІ

PULSE DIAGNOSTICS AND MEANS OF VISUALIZATION AND PULSE WAVE PROCESSING

Пульсова діагностика застосовується для вимірювання насичення крові киснем, артеріального тиску та серцевого викиду, оцінки вегетативної функції, а також виявлення захворювань периферичних судин. Особливості та засоби цієї діагностики розглядаються у цій публікації.

Abstract – Pulse diagnostics is used to measure blood oxygen saturation, blood pressure and cardiac output, assess autonomic function, and detect diseases of peripheral vessels. Features and means of this diagnosis are considered in this article.

В. Лаврентьев, О. Вороненко

V. Lavrentjev, O. Voronenko

Останніми роками спостерігається зростання інтересу до техніки фотоплетизмографії, зумовлене попитом на низьку вартість, просту та портативну технологію з однієї сторони, а з іншої фотоплетизмограма, яка вимірюється неінвазивно, може дати цінну та корисну інформацію про роботу серцево-судинної системи. Ця технологія застосовується для вимірювання насичення крові киснем, артеріального тиску та серцевого викиду, оцінки вегетативної функції, а також виявлення захворювань периферичних судин [1]. Наприклад, швидкість пульсової хвилі визнана як маркер для виявлення можливих катастрофічних змін у серцево-судинній системі. Внаслідок цього контроль швидкості пульсової хвилі занесений з 2007 року у регламент Європейської ліги з артеріальної гіпертензії [2]. Це відбувається, незважаючи на те, що форма та характеристики пульсової хвилі досі не повністю вивчені.

На сьогодні у сфері використання і аналізу пульсової хвилі спостерігаються два напрямки. Перший, суто фізіологічний, коли у формі кривої пульсової хвилі знаходять параметри, які відповідають або можуть відповідати відомим параметрам функціонування серцево-судинної системи з медичної точки зору.

Наприклад, у [1] наведений прототип пульсової хвилі здорової людини, показано, які параметри пульсової хвилі вимірюються, параметри, які на основі вимірювань потім обчислюються, а також наводиться їх інтерпретація (рис.1). Розрізняють три хвилі, які відповідають наступному: перша – викид крові з лівого шлуночка серця, друга з'являється, коли хвиля доходить до стінки артерії і відбивається, і третя хвиля, яка генерується, коли аортальний серцевий клапан закритий. Для аналізу вимірюються

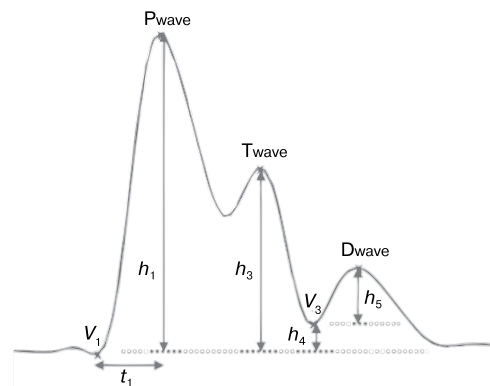


Рис. 1. Приклад пульсової хвилі здорової людини [1]

максимальні або мінімальні амплітуди хвиль та моменти їх досягнення, на основі яких обчислюються такі параметри, як нахил h_1/t_1 , що вказує на виконання серцем функції викиду крові.

Параметр або відношення h_3/h_1 пов'язане з еластичністю артеріальної системи. Використовують також точку мінімуму на схилі пульсової хвилі. Цей параметр (мінімум h_4) пов'язують з периферичним опором системи, а відношення h_4/h_1 – з його відхилення.

Але якщо проаналізувати наведений на рис. 1 приклад, то, по-перше, відбитих хвиль повинно бути декілька, а по-друге, максимуми сумарної хвилі та декількох компонентів в часі не завжди співпадають з максимумами самих компонентів, що може привести до недостовірних результатів аналізу.

Можна навести також інші приклади аналізу пульсових хвиль з більшою або меншою кількістю використаних параметрів, але основна ідея, яка полягає в тому, що пульсова хвиля переважно розглядається як сума прямої пульсової хвилі і відбитої лише базовою. На рис. 2. показані чотири типи

форми пульсової хвилі, які зустрічаються на практиці [3]. Існує загальна інтерпретація форми пульсової хвилі, залежної від вікових змін. Навіть в пульсовій хвилі 4-го типу, де відбита хвиля практично зливається з прямою, це пояснюється значною жорсткістю стінок аорти, що також можна віднести до вікових змін серцево-судинної системи.

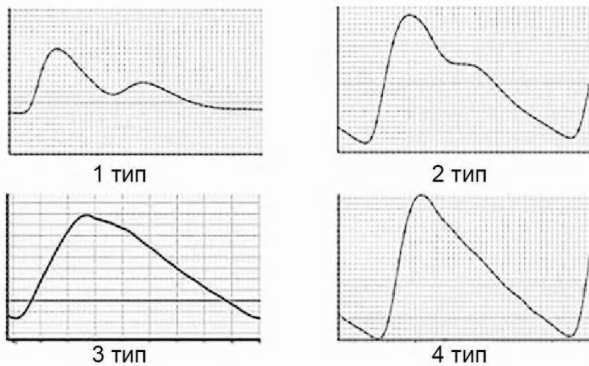


Рис. 2. Різні типи пульсових хвиль [3]

Але очевидно, що **візуально** виділити і отримати параметри відбитої хвилі принаймні у наведених прикладах двох останніх типів хвиль немає можливості, що унеможливує проведення прийнятного аналізу пульсової хвилі з точки зору діагностики серцево-судинної системи.

Другий, суто математичний підхід до аналізу пульсової хвилі, полягає в тому, що її форму розглядають з точки зору математичної обробки сигналів. Для прикладу можна вказати використання декомпозиції Гільберта-Хуанга [4, 5], методу фазової площини [6], методів нелінійного аналізу часових рядів та детермінований нелінійний прогноз [7] на базі математичного моделювання процесів проходження гемодинамічного імпульсу вздовж кровоносних судин [8]. В останній роботі показано, від чого в ідеалі залежить відбивна хвиля для різних так званих точок біфуркації, що необхідно враховувати при аналізі реальних процесів. Тому необхідно мати алгоритм обробки сигналів пульсових хвиль, який дозволяє отримати потрібний результат незалежно від форми кривої. Такий алгоритм нами пропонується.

По-перше, послідовність сигналу пульсової хвилі, яку отримано в результаті вимірювання, обробляється за допомогою модифікації перетворення Гільберта-Хуанга. В результаті чого послідовність фільтрується від високочастотного шуму, якщо такий є, а також від низькочастотних складових, які обумовлені наявністю нестационарних коливань в самій судинній системі і присутністю в організмі па-

цієнта інших фізіологічних процесів – дихання, скорочення м'язів і т.п.

В основі алгоритму декомпозиції покладене припущення, яке полягає у тому, що відбитих хвиль може бути більше ніж одна. Тому далі будемо розглядати пульсову хвилю як суму прямого імпульсу та одного або декількох відбитих імпульсів. Алгоритм декомпозиції розглядається на прикладі однієї пульсової хвилі P . Спочатку знаходяться моменти початку пульсової хвилі t_0 і кінця t_{max} . Далі визначається максимальна амплітуда A_1 і момент t_1 цього максимуму.

На основі цих даних визначається форма сигналу прямого імпульсу P_1 . Від сигналу пульсової хвилі P віднімається сигнал P_1 прямого імпульсу. Далі визначається максимальна амплітуда A_2 отриманої різниці R_1 і момент часу t_2 цього максимуму. Якщо вважати, що моментом початку сигналу різниці R_1 є момент t_1 , то ми маємо дані для визначення форми сигналу першого відбитого імпульсу P_2 .

Далі від різниці R_1 віднімається сигнал першого відбитого імпульсу P_2 і отримується різниця R_2 , сигнал якої зростає від нульового значення в момент часу t_2 до максимуму A_3 в момент t_3 . Таким чином, ми отримуємо дані для визначення форми сигналу другого відбитого імпульсу P_3 .

Аналогічним чином процес повторюється до отримання різниці близької до нуля або до кінця пульсової хвилі – моменту часу t_{max} .

На рис. 3 показані результати декомпозиції пульсових хвиль різного типу. Неважко побачити, що кожна пульсова хвиля розкладається на прямий імпульс та декілька відбитих імпульсів, причому однозначно. Отримані значення максимальних амплітуд і моментів часу максимумів можуть слугувати даними для аналізу та діагностики.

На рис. 4 наведені результати декомпозиції двадцяти пульсових хвиль двох типів: з явним максимумом на спаді пульсової хвилі і без такого. Кожна точка відповідає відносній амплітуді (A_i/A_1) та відносному часу $(t_i - t_1)/(t_{max} - t_1)$ перших та других відбитих імпульсів.

Виділені області 1 і 2 відповідають першому і другому відбитому імпульсу пульсових хвиль типу є, ж, з на рис.4, а області 3 і 4 відповідають першому і другому відбитому імпульсу пульсових хвиль типу а, б, в на рис.4.

Це дає підстави вважати, що за результатами декомпозиції можливо визначити окремі типи пульсових хвиль і пов'язати їх з медичними та фізіологічними параметрами. Йдеться про можливість створен-

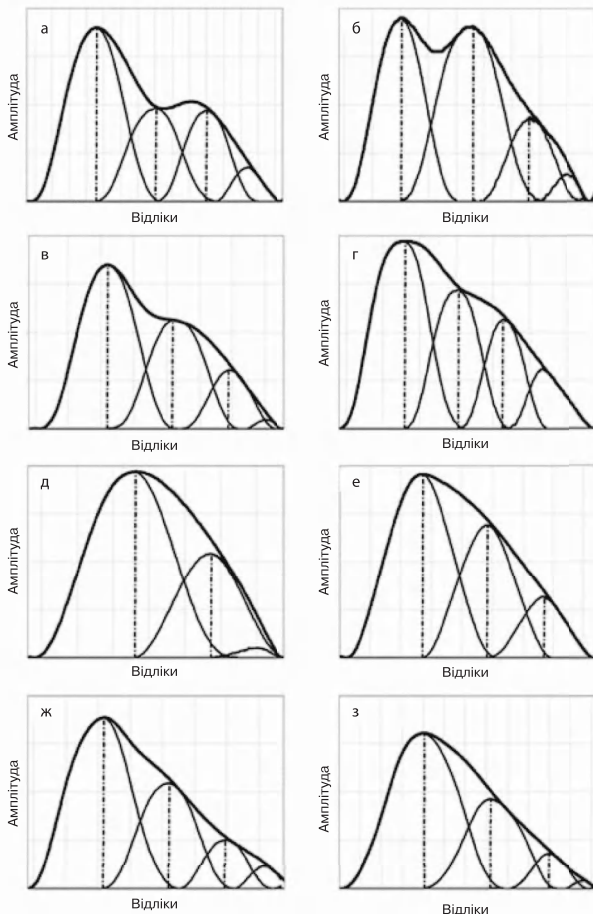


Рис. 3. Декомпозиція різних форм пульсових хвиль

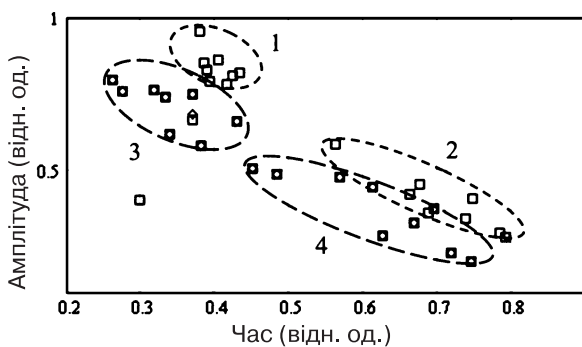


Рис. 4. Відносні амплітуди перших та других відбитих імпульсів різних пульсових хвиль

ня бази даних, де форма пульсової хвилі пов'язується з параметрами як здорової серцево-судинної системи, так і враженої різними захворюваннями.

Створення такої бази даних пропонується в [9]. Основою такої бази є набір еталонних форм, які відповідають тому чи іншому стану серцево-судинної системи (рис. 5). Аналіз пульсової хвилі спочатку зводиться до порівняння з еталонними значеннями і визначенням умовної групи, до якої її можливо від-

нести. Але такий аналіз не завжди може дати достовірний результат. Так, на рис. 4. наведені приклади пульсових хвиль для пацієнтів з різними захворюваннями: розширена кардіоміопатія (верхня зліва), шлуночкова аневризма (верхня справа), застарілий інфаркт міокарда (нижня зліва) та дегенеративна хвороба клапанів та типова форма хвилі застарілого інфаркту міокарда (нижня справа).



Рис. 5. Пульсові хвилі у пацієнтів з різними захворюваннями [9]

Якщо дві верхні пульсові хвилі ще можливо відрізнити одну від одної і визначити найбільш схожий еталон, то з двома нижніми можуть виникнути неоднозначні або суперечливі висновки. В тій же роботі [9] пропонується створення моніторингової системи для побудови бази даних для кожного окремого пацієнта та відслідковувати зміну параметрів вимірювань пульсової хвилі на протязі певного часу, тому що тривалий у часі моніторинг може дати більше інформації ніж окреме вимірювання, не пов'язане з попередніми.

Тобто лінії трендів параметрів стану серцево-судинної системи є набагато більш цінними для лікування. У нашому випадку це ще більш показово, тому що в результаті декомпозиції ми отримуємо точні параметри відбитих імпульсів і таким чином порівняння вимірювань буде більш інформативним. Насамкінець необхідно зазначити, що сигнали пульсових хвиль, що використані нами, виміряні на реальних пацієнтах за допомогою інформаційно-вимірювального комплексу пульсової діагностики [10].

З метою створення бази даних сигналів пульсової хвилі для подальшого аналізу її характеристик та декомпозиції пульсової хвилі нами розроблено та створено систему збору даних та візуалізації пульсової хвилі у двох оптичних діапазонах відбиття випромінювання з використанням мініа-



Рис. 6. Структурна схема системи збору даних

тюрного сенсору з відповідним програмним забезпеченням. Структурна схема системи наведена на рис. 6.

Для цифровізації сигналу пульсової хвилі створено мініатюрний сенсор на базі ІМС MAX30102EFD+T. Це високочутливий пульсоксиметр з сенсором серцевого ритму для моніторингу стану здоров'я людини, який призначений для використання, наприклад, у розумних годинниках та мобільних гаджетах, таких як мобільні телефони, планшетні комп'ютери і т. і. Він має такі характеристики:

- наднизьке енергоспоживання, що важливо для мобільних пристроїв;
- прогамовані частота дискретизації та світлодіодний струм для економії енергії живлення;
- здійснюється моніторинг серцевого ритму з споживчою потужністю < 1 мВт;
- типовий струм у режимі спокою 0,7 мкА;
- має можливість швидкого виведення даних;
- висока частота дискретизації;
- висока стійкість до артефактів руху;
- високе відношення сигнал/шум;
- діапазон робочих температур від -40 до +85 °С.

Функціональна схема сенсора наведена на рис. 7, а зовнішній вигляд сенсора – на рис. 8.

Для вводу оцифрованої пульсової хвилі у ПК ви-



Рис. 8. Сенсор для вимірювання та цифровізації сигналів пульсової хвилі

користана плата налагодження LPCXpresso51U68, зовнішній вигляд якої наведено на рис. 9.

Плата налагодження LPCXpresso51U68 виконує управління сенсором, а саме: задає параметри CONFIGURATION (FIFO Configuration, ModeConfiguration, SpO2 Configuration, LED Pulse Amplitude, Multi-LED ModeControlRegisters та інші, а також задає параметри переривання для отримання оцифрованої пульсової хвилі; передає дані для діагностики в ПК через стандартний інтерфейс USB.

Для реалізації поставленої задачі використано програмне середовище MCUXpresso від NXP, розроблено програмний засіб на мові C, який завантажується у вбудовану FLASH пам'ять мікроконтроле-

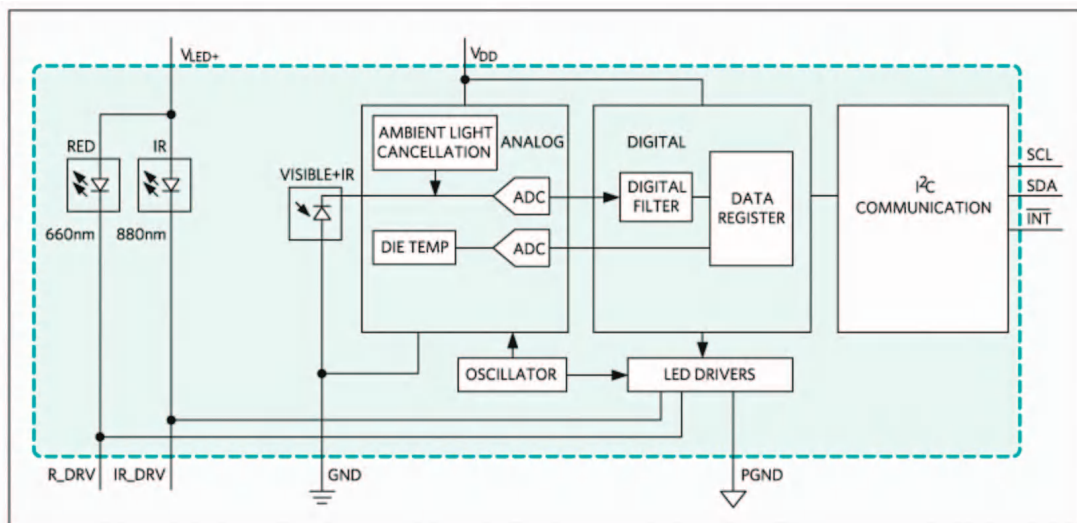


Рис. 7. Функціональна схема сенсора

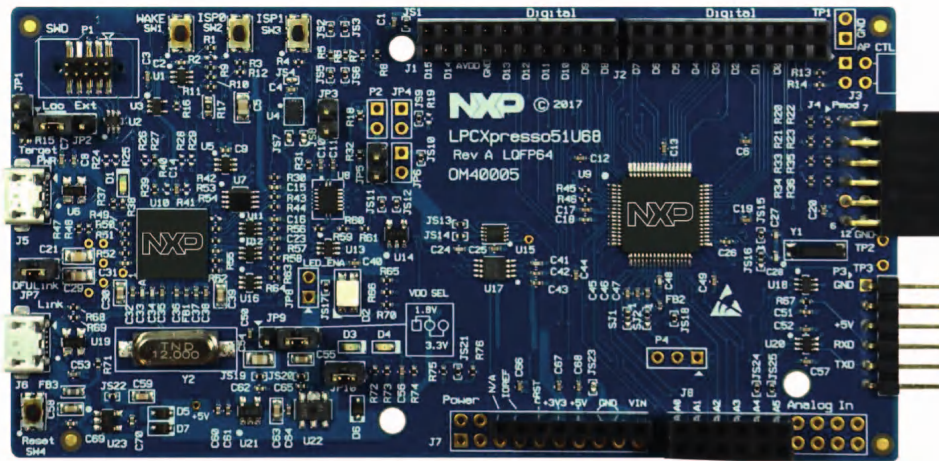


Рис. 9. Зовнішній вигляд плати LPCXpresso51U68

ра LPC51U68 плати налагодження LPCXpresso51U68. З метою передачі даних у ПК користувача розроблений застосунок на мові C# в програмному середовищі Microsoft Visual компанії Microsoft, який призначався для:

- підтримки підключення плати налагодження LPCXpresso51U68 до ПК користувача з метою зчитування даних пульсової хвилі з сенсора
- управління процесом вимірювання пульсової хвилі
- отримання даних вимірювання у двох оптичних діапазонах вимірювання (червоному та інфрачервоному)
- формування та зберігання .log файлу вимірювання
- графічного відображення даних в двох оптичних діапазонах
- формування та зберігання оцифрованої пульсової хвилі для подальшої обробки, декомпозиції та діагностики.

Приклад роботи розробленого програмного засобу max30102.exe наведено на рис. 10.

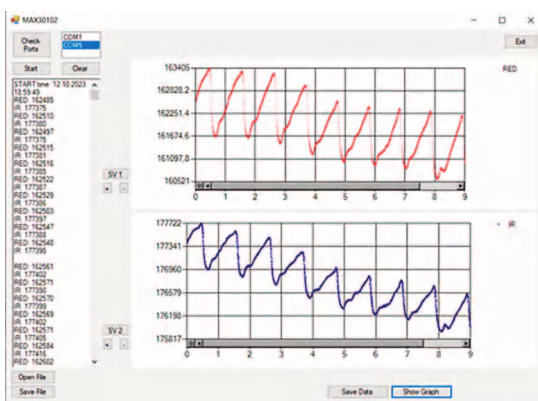


Рис. 10. Приклад роботи програмного засобу max30102.exe

ВИСНОВКИ

Форма пульсової хвилі прийнята як маркер для виявлення можливих катастрофічних змін у серцево-судинній системі. Внаслідок цього контроль швидкості пульсової хвилі занесений з 2007 року у регламент Європейської ліги з артеріальної гіпертензії. Авторами запропоновано алгоритм обробки форми пульсових хвиль і програмно-апаратні засоби для візуалізації та обробки пульсової хвилі, які дозволяють діагностувати порушення серцево-судинної системи у реальному часі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Chuan-YiLiu, Ching-ChuanWei, Pei-ChenLo, Variation Analysis of Sphygmogram to Assess Cardiovascular System under Meditation. Evid Based Complement Alternat Med. 2009 March; 6(1): 107–112.
2. Guidelines for the management of arterial hypertension. The task force for the ESH, ESC /J. Hypertension.-2007.- vol. 25.- P. 1105 -87.
3. Кокодий Н.Г., Шапошникова А.В., Кайдаш М.В., Тиманюк В.А., Математический анализ сфигмограммы, Physics and engineering in photobiology and photomedicine, 2017. № 1, 2, с. 87-94.
4. Hemant Sharma Heart rate extraction from PPG signals using variational mode decomposition Biocybernetics and Biomedical Engineering Volume 39, Issue 1, January–March 2019, Pages 75-86.
5. Омлоков В. Д., Бороноев В. В., Комплементарная множественная декомпозиция на эмпирические моды с адаптивным шумом сепмдан как метод решения основных проблем применения преобразования Гильберта-Хуанга, Журнал радиоэлектроники, ISSN 1684-1719, N9, 2016, с. 1-7.

6. Нікітчук Т.М., Поліщук Ю.А., Використання методу фазової площини для дослідження пульсової хвилі, Вісник ЖДТУ, № 2 (57) Технічні науки, 2011 с. 80-87

7. Sviridova N., Sakai K., Human photoplethysmogram: new insight into chaotic characteristics / Chaos, Solitons and Fractals 77 (2015) 53–63.

8. Тыглиян М. А., Тюрина Н.Н., Математическая модель прохождения гемодинамического импульса через точки бифуркации // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2017. № 62. 18 с. doi:10.20948/prepr-

2017.

9. ZhaopengFan, GongZhang, SimonLiao. Clinical analysis for cardio vascular disease by calculating stiffness index, cardia coutput from pulse wave. In Electrical and Computer Engineering, 2009. CCECE'09. Canadian Conference on, pages 478– 481.

10. Дегтярук В.І. Пульсові процеси в серцево-судинній системі людини та їх використання для діагностики. Комп'ютерні засоби, мережі та системи. 2014, № 13, с. 43-52.



VD MAIS: 5000 кв.м
друкованих плат за рік

ДРУКОВАНІ ПЛАТИ

▪ ВИРОБНИЦТВО

VD MAIS – найбільший постачальник друкованих плат на ринку України

7 аргументів на користь друкованих плат, що постачаються VD MAIS:

- принцип “все з одних рук”
- стабільне положення фірми на ринку друкованих плат
- висока кваліфікація спеціалістів
- вибір перевірених фірм-виробників в залежності від специфіки замовлення
- технічний супровід проекту при монтажі SMD-компонентів
- мінімізація ціни за рахунок об'єднання замовлень
- сертифікація систем екологічного менеджменту і менеджменту якості фірми відповідно до вимог стандартів ISO 9001:2015, ISO 14001:2015, IATF 16949:2016 і ISO 13485:2016
- надання документації по вихідному контролю друкованих плат

VD MAIS
ДИСТРИБ'ЮЦІЯ +
КОНТРАКТНЕ
ВИРОБНИЦТВО

VD MAIS
PCB Professionally

тел.: (044) 220-0101, info@vdmiais.ua, www.vdmiais.ua

VD MAIS

Електронні
компоненти
і системи



- мікросхеми ▪ датчики ▪ оптоелектроніка
- джерела живлення ▪ драйвери світлодіодів
- резонатори і генератори
- дискретні напівпровідники
- пасивні компоненти
- НВЧ-компоненти
- системи безпроводового зв'язку

Дистриб'юція та прямі поставки:
Analog Devices, Bluetechnix, Créé, DDC,
Dynex, Fordata, Foryard, Gaia, Geyer,
IXYS, Kendeil, Kingbright, Ledil, Littlefuse,
Mean Well, Microsemi, Omron, Recom,
Siti, Sonitron, Suntan, Telit,
Vacuumschmelze, Xilinx, Yitran

Україна, 03061 Київ, ул. М. Донца, 6
тел.: (0-44) 201-0202, 492-8852, факс: (0-44) 202-1110
e-mail: info@vdmiais.ua, www.vdmiais.ua

VD MAIS

Устаткування
та матеріали для
монтажу/демонтажу
електронних
компонентів (ЕК)



- паяльне та ремонтне обладнання
- системи очищення повітря
- пристрої трафаретного друку
- системи встановлення компонентів
- паяльні печі: конвекційного та селективного паяння, паяння хвилею
- випробувальне обладнання
- системи візуального контролю
- координатно-фрезерні верстати
- технологічні матеріали монтажу ЕК
- засоби антистатичного захисту

Дистриб'юція та прямі поставки:
AIM, Bernstein, Charleswater, Electrolube,
Essemtec, KIC, Kolver, LPKF, Magic Ray,
Miele, Nordson, Optilia, PACE, PDT,
Hanwha, Seho, TWS, Vision, Weiss

Україна, 03061 Київ, вул. М. Донця, 6
Тел.: (0-44) 201-0202, 492-8852, факс: (0-44) 202-1110
e-mail: info@vdmiais.ua, www.vdmiais.ua

НАБІР ДЛЯ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ RASPBERRY PI

RASPBERRY PI PICO SDK

У статті наведена коротка інформація про склад бібліотек Raspberry Pi Pico, призначених для використання як у невбудованих, так і в вбудованих системах Інтернету речей.

В. Макаренко

V. Makarenko

Набір для розробки програмного забезпечення Raspberry Pi Pico SDK (Software Development Kit), надалі SDK, надає заголовки, бібліотеки та систему збірки, необхідні для написання програм для мікроконтролерних пристроїв серії RP, таких як Raspberry Pi Pico, на C, C++ або мові асемблера. Паке́т SDK створено для надання API (інтерфейсу прикладного програмування) та середовища програмування, яке знайоме як розробникам невбудованих, так і розробникам вбудованих систем [1].

Одна програма одночасно виконується на пристрої за допомогою звичайного методу main(). Стандартні бібліотеки C/C++ підтримуються разом із API для доступу до апаратного забезпечення мікроконтролера, включаючи DMA, IRQ, а також різноманітних периферійних пристроїв з фіксованими функціями та PIO (програмований ввід-вивід).

Крім того, SDK надає бібліотеки вищого рівня для роботи з таймерами, USB, синхронізацією та багатоядерним програмуванням, а також додаткову функціональність високого рівня, побудовану за допомогою PIO, наприклад аудіо. SDK можна використовувати для створення чого завгодно: від простих додатків або повноцінних середовищ виконання, таких як MicroPython, до низькорівневого програмного забезпечення, такого як сам завантажувач мікроконтролера на чіпі.

SDK використовує CMake для керування збіркою. CMake широко підтримується IDE (інтегрованим середовищем розробки) і дозволяє просто вказати збірку (через файли CMakeLists.txt), з яких CMake може створити систему збірки (для використання make, pinja або іншими інструментами збірки), налаштовану для платформи та будь-яких змінних конфігурації, які вибере розробник.

Крім того, що CMake є широко використовуваною системою збирання для розробки на C/C++,

Abstract – The article provides brief information about the composition of Raspberry Pi Pico libraries designed for use in both non-embedded and embedded Internet of things systems.

CMake є фундаментальною для структури SDK, а також для конфігурації та створення програм.

SDK створює виконуваний файл, який включає весь код, необхідний для роботи на пристрої (окрім конкретного пристрою з плаваючою комою та іншого оптимізованого коду, що міститься в bootrom мікроконтролера).

Розглянемо документацію до SDK для різних застосунків [1]. Структура SDK наведена на рис. 1.

Pico C SDK

Introduction

Hardware APIs

High Level APIs

Third-party Libraries

Networking Libraries

Runtime Infrastructure

External API Headers

Рис. 1. Структура Pico C SDK

Апаратні API-інтерфейси (Hardware APIs)

Ця група бібліотек забезпечує тонкий та ефективний інтерфейс прикладного програмування C (API) / абстракції для доступу до апаратного забезпечення мікроконтролерів серії RP без необхідності прямого читання та запису апаратних регістрів [2]. В табл. 1 наведено склад бібліотек API для доступу до апаратного забезпечення мікроконтролерів

API високого рівня [3]

Ця група бібліотек забезпечує функціональність вищого рівня, не пов'язану з апаратним забезпеченням, або надає більш багатий набір функціональних можливостей, що виходять за рамки базових апаратних інтерфейсів.

Таблиця 1. Склад бібліотек API для доступу до апаратного забезпечення мікроконтролерів

Бібліотека	Призначення бібліотеки
hardware_adc	АЦП – Analog to Digital Converter (ADC) API.
hardware_base	Низькорівневі типи і засоби доступу до апаратних регістрів, що відображаються в пам'яті.
hardware_claim	Спрощене управління апаратними ресурсами API.
hardware_clocks	Управління годинником API.
hardware_divider	RP2040 низькорівневий апаратний дільник частоти API. Платформи, що не належать до RP2040, надають версії програмного забезпечення для всіх функцій.
hardware_dcp	Макроси збірки для подвійного співпроцесора RP2350.
hardware_dma	Контролер прямого доступу до пам'яті (DMA) API.
channel_config	Конфігурація каналу DMA.
hardware_exception	Методи налаштування обробників винятків процесора.
hardware_flash	Низькорівневе програмування flash і стирання API.
hardware_gpio	Введення / виведення загального призначення (GPIO) API.
hardware_hazard3	Аксесуари для автомобілів RISC-V, що відповідають вимогам стандарту Hazard3, і вбудовані компоненти для призначених для користувача інструкцій по Hazard 3. RP2350
hardware_i2c	I2C контролер API.
hardware_interp	Апаратний інтерполятор API.
interp_config	Конфігурація інтерполятора.
hardware_irq	Обробка апаратних переривань API.
hardware_pio	Програмоване введення-виведення (PIO) API.
sm_config	Конфігурація кінцевого автомата PIO.
pio_instructions	Кодування команд PIO.
hardware_pll	API-інтерфейси управління контуром фазового автопідстроювання частоти.
hardware_powman	Управління живленням API. RP2350
hardware_pwm	API апаратної широтно-імпульсної модуляції (ШИМ).
hardware_resets	API апаратного скидання.
hardware_riscv	Засоби доступу до стандартного обладнання RISC-V (переважно CSR) RP2350
hardware_riscv_platform_timer	Аксесуари для стандартного таймера платформи RISC-V (mtime/mtimecmp), доступні на мікроконтролерах Raspberry Pi з процесорами RISC-V. RP2350
hardware_rtc	Апаратний API годинника реального часу. RP2040
hardware_rcp	Вбудовані функції і макроси збірки для співпроцесора з надмірністю. RP2350
hardware_spi	Апаратний SPI API.
hardware_sha256	API апаратного прискорювача SHA-256. RP2350
hardware_sync	Низькорівневі апаратні спін-блокування, бар'єрні інтерфейси та інтерфейси обробки подій.
hardware_ticks	Апаратні відмітки API.
hardware_timer	Низькорівневий API апаратного таймера.
hardware_uart	Апаратний UART API.
hardware_vreg	API для регулювання напруги.
hardware_watchdog	API апаратного сторожового таймера.
hardware_xosc	API кварцового генератора (XOSC).

В табл. 2 наведено склад бібліотек API високого рівня.

Таблиця 2. Склад бібліотек API високого рівня

Бібліотека	Призначення бібліотеки
pico_aon_timer	Абстракція високого рівня "Завжди ввімкнено таймер".
pico_async_context	<code>async_context</code> надає логічно однопотоковий контекст для виконання роботи та реагування на асинхронні події. Таким чином, екземпляр <code>async_context</code> підходить для обслуговування сторонніх бібліотек, які не є реентерабельними.
async_context_freertos	<code>async_context_freertos</code> забезпечує реалізацію <code>async_context</code> , яка обробляє асинхронну роботу в окремому завданні FreeRTOS.
async_context_poll	<code>async_context_poll</code> забезпечує реалізацію <code>async_context</code> , яка призначена для використання з простим циклом опитування на одному ядрі. Це небезпечно для потоків.
async_context_threadsafe_background	<code>async_context_threadsafe_background</code> забезпечує реалізацію <code>async_context</code> , яка регулює асинхронну роботу в IRQ з низьким пріоритетом, і користувачеві не потрібно опитувати роботу.
pico_bootsel_via_double_reset	Додаткова підтримка для швидкого подвійного скидання системи при переході в режим початкового завантаження.
pico_flash	Високорівневий flash API.
pico_i2c_slave	Функції, що забезпечують керований перериваннями ведений інтерфейс I2C.
pico_multicore	Додана підтримка запуску коду на другому процесорному ядрі (core 1) і взаємодії з ним.
fifo	Функції для міжядерних FIFO.
doorbell	Функції, пов'язані з дверними дзвінками, які ядро може використовувати для надсилання запитів IRQ собі або іншому ядру.
lockout	Функції, що дозволяють одному ядру змусити інше ядро призупинити виконання у відомому стані.
pico_rand	API генератора випадкових чисел.
pico_sha256	Апаратно прискорена реалізація SHA-256. RP2350
pico_stdlib	Об'єднання основної підмножини бібліотек Raspberry Pi Pico SDK, що використовуються більшістю виконуваних файлів, а також деяких додаткових корисних методів.
pico_sync	Примітиви синхронізації та взаємне виключення.
critical_section	API критичної секції для короткочасного взаємного виключення, безпечний для IRQ і багатоядерних систем.
lock_core	Базова підтримка примітивів синхронізації / блокування.
mutex	Mutex API для взаємного виключення без IRQ між ядрами.
sem	Семафорний API для обмеження доступу до ресурсу.
pico_time	API для точних міток часу, сплячого режиму та зворотних викликів на основі часу.
timestamp	Функції часових міток, що відносяться до моментів часу (включаючи поточний час).
sleep	Функції сплячого режиму для затримки виконання при зниженому енергоспоживанні.
alarm	Функції сигналізації для планування майбутнього виконання.
repeating_timer	Функції повторюваного таймера для простого планування повторного виконання.
pico_unique_id	Унікальний API доступу до ідентифікатора пристрою.

Продовження табл. 2

Бібліотека	Призначення бібліотеки
pico_util	Корисні структури даних і службові функції.
datetime	Форматування дати і часу.
pheap	Реалізація спряженої пари.
queue	Реалізація багатоядерної та IRQ-безпечної черги.

Сторонні бібліотеки (Third-party Libraries) [4]

Сторонні бібліотеки для реалізації високорівневої функціональності. Склад сторонніх бібліотек наведено в табл. 3.

Таблиця 3. Склад сторонніх бібліотек

Бібліотека	Призначення бібліотеки
tinyusb_device	Підтримка режиму мініатюрного USB-пристрою для RP2040. Веб-сайт із документацією TinyUSB можна знайти у [5].
tinyusb_host	Підтримка режиму хосту TinyUSB для RP2040.

Мережеві бібліотеки (Networking Libraries)

Функції для реалізації мережевої взаємодії наведені в табл. 4 [6].

Таблиця 4. Склад мережевих бібліотек

Бібліотека	Призначення бібліотеки
pico_btstack	Бібліотеки інтеграції / оболонки для BTStack, документація щодо яких знаходиться у [7].
pico_lwip	Бібліотеки інтеграції / оболонки для Lightweight IP (lwIP) стеку, документація щодо яких знаходиться у [8].
pico_lwip_arch	Адаптери компілятора lwIP. За замовчуванням вони не включені в pico_lwip, на випадок, якщо ви хочете реалізувати власні.
pico_lwip_freertos	Бібліотека Glue для інтеграції lwip в режимі NO_SYS=0 з SDK.
pico_lwip_nosys	Бібліотека Glue для інтеграції lwip в режимі NO_SYS=1 з SDK.
pico_cyw43_driver	Оболонка для cyw43_driver нижчого рівня, яка інтегрує його з pico_async_context для виконання фонові роботи.
pico_btstack_cyw43	Низькорівнева підтримка Bluetooth HCI.
pico_cyw43_arch	Архітектура для інтеграції драйвера CYW43 (для безпроводової мережі на PicoW) та lwip (для стека TCP/IP) у SDK. Це також потрібно для доступу до вбудованого світлодіода на Pico W.
cyw43_driver	Драйвер, який використовується для безпроводового зв'язку Pico W.
cyw43_ll	Низькорівневий інтерфейс драйвера CYW43.

Інфраструктура часу виконання (Runtime Infrastructure) [9]

Бібліотеки, які використовуються для забезпечення ефективної реалізації певних функцій на рівні мови та бібліотеки C, а також бібліотеки інтерфейсу CMake, що абстрагують етапи компіляції та посилання в SDK. Склад бібліотек інфраструктури часу наведено в табл. 5.

Зовнішні заголовки API (External API Headers) [10]

Заголовки для інтерфейсів, які спільно використовуються з кодом за межами SDK. Склад бібліотек заголовків для інтерфейсів, які спільно використовуються з кодом за межами SDK наведено в табл. 6.

Таблиця 5. Склад бібліотек інфраструктури часу

Бібліотека	Призначення бібліотеки
boot_stage2	Завантажувачі другого етапу відповідають за Налаштування зовнішньої флеш-пам'яті.
pico_atomic	Допоміжні реалізації для C11 atomics.
pico_base	Основні типи та макроси для Raspberry Pi Pico SDK.
pico_binary_info	Двійкова інформація призначена для вбудовування машиночитаної інформації у двійковий файл у FLASH.
pico_bootrom	Доступ до функцій та даних у нижній частині екрана.
pico_bit_ops	Оптимізовані функції маніпулювання бітами.
pico_cxx_options	Бібліотека, не пов'язана з кодом, яка керує параметрами компілятора, пов'язаними з C++
pico_clib_interface	Надає необхідний код зв'язку, необхідний для конкретного використовуваного середовища виконання C / C++.
pico_crt0	Надає сценарії компоновщика за замовчуванням і точку входу/виходу з програми.
pico_divider	Оптимізовані функції 32-і 64-розрядного ділення частоти, прискорені апаратним дільником частоти RP2040.
pico_double	Оптимізовані функції з плаваючою комою подвійної точності.
pico_float	Оптимізовані функції з плаваючою комою одинарної точності.
pico_int64_ops	Оптимізовано реалізації заміни вбудованого в компілятор 64-бітного множення.
pico_malloc	Багатоядерний захист для malloc, calloc і free.
pico_mem_ops	Надає оптимізовані реалізації заміни вбудованих в компілятор memset, memset і пов'язаних з ними функцій.
pico_platform	Макроси та визначення (і функції, якщо вони не включені в асемблерний код) для пристроїв / архітектури сімейства RP2, щоб забезпечити загальну абстракцію від специфіки компілятора / платформи низького рівня.
pico_printf	Компактна Заміна printf на Marco Paland (info@paland.com)
pico_runtime	Основна підтримка середовища виконання для запуску попередніх основних ініціалізаторів, що надаються іншими бібліотеками.
pico_runtime_init	Основні функції ініціалізації середовища виконання, необхідні для налаштування середовища виконання перед входом в main.
pico_stdio	Індивідуальна підтримка studio, що дозволяє здійснювати введення і виведення даних з UART, USB, напів-хостингу і т. д.
pico_stdio_semihosting	Експериментальна підтримка стандартного виводу з використанням напівгостингу оперативної пам'яті.
pico_stdio_uart	Підтримка стандартного вводу / виводу за допомогою UART.
pico_stdio_rtt	Підтримка стандартного вводу / виводу за допомогою SEGGER RTT.
pico_stdio_usb	Підтримка стандартного введення / виводу по послідовному USB (CDC).
pico_standard_binary_info	Містить інформацію про двійковий файл за замовчуванням, який можна відобразити за допомогою Pico tool.
pico_standard_link	Містить інформацію про двійковий файл за замовчуванням, який CA налаштував для параметрів прив'язки до стандартного виконаного файлу SDK.

Таблиця 6. Склад бібліотек заголовків для інтерфейсів, які спільно використовуються з кодом за межами SDK

Бібліотека	Призначення бібліотеки
boot_picobin_headers	Константи для формату PICO bin.
boot_picoboot_headers	Файл заголовка для USB-інтерфейсу PICOBOOT, що надається чіпом RP2xxx в режимі початкового завантаження.
boot_uf2_headers	Файл заголовка для формату UF2, підтримуваного мікросхемою RP2xxx в режимі BOOTS EL.
pico_usb_reset_interface_headers	Визначення інтерфейсу скидання, який може бути наданий бібліотекою pico_stdio_usb.

Розглянемо склад однієї з апаратних бібліотек API.

АЦП – Analog to Digital Converter (ADC)

Мікроконтролери серії RP мають внутрішній аналого-цифровий перетворювач послідовних наближень (АЦП) з такими функціями:

- частота дискретизації 500 кГц (з використанням незалежного годинника 48 МГц)
- ефективно число бітів (ENOB) у 12 біт АЦП RP2040 8.7, у RP2350 – 9.2
- 5 мультиплексованих входів у RP2040:
 - ◆ 4 входи, які доступні на виводах спільних з GPIO [29:26]
 - ◆ 1 вхід призначений для внутрішнього датчика температури
 - ◆ 4 елемент отримує вибірку FIFO
- мультиплексор RP2350 з 5 або 9 входами:
 - ◆ 4 входи доступні на виводах у корпусі QFN-60, які спільно використовуються з GPIO [29:26]
 - ◆ 8 входів, доступних на виводах у корпусі QFN-80, спільних з GPIO [47:40]
 - ◆ 8 елемент отримує вибірку FIFO
- генерація переривань
- інтерфейс DMA.

Хоча існує лише один АЦП, ви можете вказати вхідні дані для нього за допомогою функції `adc_select_input()`. У циклічному режимі (`adc_set_roundRobin()`) АЦП використовуватиме цей вхід і переходить

до наступного після читання.

RP2040, RP2350 у корпусі QFN-60:

- входи АЦП користувача 0-3 знаходяться на GPIO 26-29
- датчик температури знаходиться на вході 4. RP2350 у корпусі QFN-80:
- входи АЦП користувача 0-7 знаходяться на GPIO 40-47
- датчик температури знаходиться на вході 8. Значення датчика температури можна приблизно виразити в градусах Цельсія як:

$$T = 27 - (\text{ADC_Voltage} - 0,706)/0,001721.$$

На рис. 2 наведено приклад коду для роботи з АЦП [1]. При роботі з джерелом [2] можна отримати приклад у вигляді тексту. Для цього потрібно натиснути на стрілочку у правому верхньому куті прикладу (рис. 3).

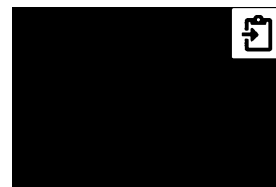


Рис. 3. Натиснувши на стрілочку, отримуємо приклад у вигляді тексту

```

1  #include <stdio.h>
2  #include "pico/stdlib.h"
3  #include "hardware/gpio.h"
4  #include "hardware/adc.h"
5
6  int main() {
7      stdio_init_all();
8      printf("ADC Example, measuring GPIO26\n");
9
10     adc_init();
11
12     // Make sure GPIO is high-impedance, no pullups etc
13     adc_gpio_init(26);
14     // Select ADC input 0 (GPIO26)
15     adc_select_input(0);
16
17     while (1) {
18         // 12-bit conversion, assume max value == ADC_VREF == 3.3 V
19         const float conversion_factor = 3.3f / (1 << 12);
20         uint16_t result = adc_read();
21         printf("Raw value: 0x%03x, voltage: %f V\n", result, result * conversion_factor);
22         sleep_ms(500);
23     }
24 }
25

```

Рис. 2. Приклад коду для роботи з АЦП

Фрагмент отриманого тексту наведений нижче.

```
#include <stdio.h>
#include "pico/stdlib.h"
#include "hardware/gpio.h"
#include "hardware/adc.h"

int main() {
    stdio_init_all();
    printf("ADC Example, measuring GPIO26\n");

    adc_init();
```

Функції АЦП

void adc_init (void)

Ініціалізуємо апаратне забезпечення АЦП.

static void adc_gpio_init (uint gpio)

Ініціалізуємо gpio для використання в якості виводу АЦП.

static void adc_select_input (uint input) (введення користувачем)

Вибір вхідного каналу АЦП.

static uint adc_get_selected_input (void)

Повертає поточний вибраний канал введення АЦП.

static void adc_set_round_robin (uint input_mask)

Перемикач циклічної вибірки.

static void adc_set_temp_sensor_enabled (bool enable)

Вмикаємо вбудований датчик температури.

static uint16_t adc_read (void)

Виконуємо одноразове перетворення.

static void adc_run (bool run)

Вмикаємо або вимикаємо режим дискретизації в автономному режимі.

static void adc_set_clkdiv (float clkdiv)

Встановлюємо дільник тактової частоти АЦП.

static void adc_fifo_setup (bool en, bool dreq_en, uint16_t dreq_thresh, bool err_in_fifo, bool byte_shift)

Налаштовуємо FIFO АЦП.

static bool adc_fifo_is_empty (void)

Перевіряємо чи стан FIFO порожній.

static uint8_t adc_fifo_get_level (void)

Отримуємо кількість записів в FIFO АЦП.

static uint16_t adc_fifo_get (void)

Отримуємо результат перевірки АЦП з FIFO.

static uint16_t adc_fifo_get_blocking (void)

Очікуємо появу даних в АЦП FIFO.

static void adc_fifo_drain (void)

Розрядить FIFO АЦП.

static void adc_irq_set_enabled (bool enabled)

Вмикаємо / вимикаємо переривання АЦП.

Детальна інформація про всі бібліотеки наведена у джерелах [2-9]. Приклади використання Raspberry Pi наведені у [11]. У прикладах наведено детальний опис

ЛІТЕРАТУРА

1. Raspberry Pi Documentation. Url: https://www.raspberrypi.com/documentation/pico-sdk/index_doxygen.html#raspberrypi-pico-sdk
2. Hardware APIs. Url: <https://www.raspberrypi.com/documentation/pico-sdk/hardware.html>
3. High Level APIs. Url: https://www.raspberrypi.com/documentation/pico-sdk/high_level.html
4. Third-party Libraries. Url: https://www.raspberrypi.com/documentation/pico-sdk/third_party.html
5. TinyUSB. Url: <https://docs.tinyusb.org/en/latest/>
6. Networking Libraries. Url: <https://www.raspberrypi.com/documentation/pico-sdk/networking.html>
7. Libraries for BTstack. Url: <https://bluekitchen-gmbh.com/btstack/>
8. Lightweight IP stack. Url: https://www.nongnu.org/lwip/2_1_x/index.html
9. Runtime Infrastructure. Url: <https://www.raspberrypi.com/documentation/pico-sdk/runtime.html>
10. External API Headers. Url: <https://www.raspberrypi.com/documentation/pico-sdk/misc.html>
11. Raspberry Pi tutorials. Url: <https://www.raspberrypi.com/tutorials/>

RASPBERRY PI КАМЕРА ЗІ ШТУЧНИМ ІНТЕЛЕКТОМ

RASPBERRY PI AI CAMERA

У статті наведена коротка інформація про 12-мегапиксельну камеру Raspberry Pi зі штучним інтелектом, побудовану на основі датчика зображення Sony IMX 500. Розглянуті основні характеристики камери та рекомендації по роботі з нею.

Abstract – The article provides brief information about the Raspberry Pi's 12-megapixel camera with artificial intelligence, built on the basis of the Sony IMX 500 image sensor. The main characteristics of the camera and recommendations for working with it are considered.

В. Макаренко

V. Makarenko

Компанія Raspberry Pi Foundation окрім модулів Raspberry Pi випускає модулі відеокамер. Однією з останніх розробок є 12-мегапиксельна камера зі штучним інтелектом що використовує датчик зображення Sony IMX 500 для забезпечення високої продуктивності і можливостями штучного інтелекту для будь-якої програми камери [1].

Камера Raspberry Pi AI (рис. 1), сумісна з усіма комп'ютерами Raspberry Pi, використовує переваги інтелектуального датчика зору Sony IMX500, щоб допомогти створювати додатки vision AI і моделі нейронних мереж з використанням вбудованого процесора штучного інтелекту. Тісна інтеграція IMX500 зі стеком програмного забезпечення для камер Raspberry Pi дозволяє користувачам розгортати власні моделі нейронних мереж з мінімальними зусиллями.



Рис. 1. Raspberry Pi AI Camera

Для початку розглянемо посібник, який допоможе запустити на камері готову або виготовлену на замовлення модель нейронної мережі.

Ці інструкції передбачають, що ви використовуєте камеру штучного інтелекту, підключену до плати Raspberry Pi 4 Model B або Raspberry Pi 5. З невеликими змінами ви можете слідувати цим інструкціям на інших моделях Raspberry Pi з роз'ємом камери, включаючи Raspberry Pi Zero 2 W та Raspberry Pi 3 Model B+.

По-перше, переконайтеся, що на вашому Raspberry Pi встановлено найновіше програмне забезпечення. Виконайте наступну команду для оновлення:

```
sudo apt update && sudo apt full-upgrade
```

Встановлення вбудованого ПЗ IMX500

При запуску AI-камера повинна завантажити вбудоване ПЗ. Щоб встановити це вбудоване ПЗ на Raspberry Pi, треба виконати таку команду:

```
sudo apt install imx500-all
```

Ця команда:

- встановлює файли / lib/firmware / imx500_loader.apk та / lib/firmware / imx500_firmware для файлів вбудованого ПЗ, необхідних для роботи датчика IMX500
- розміщує кілька файлів вбудованого програмного забезпечення для моделей нейронних мереж у /usr/share / imx500-models/
- встановлює програмне забезпечення для подальшої обробки IMX500 у gpicam-apps
- встановлює інструменти для упаковки мережових моделей Sony.

Драйвер пристрою IMX500 kernel завантажує всі файли вбудованого ПЗ при запуску камери. Це може зайняти кілька хвилин, якщо вбудована модель нейронної мережі не була попередньо кешована. У наведених нижче демонстраціях на консолі відображається індикатор виконання, що показує хід

завантаження вбудованого ПЗ.

Після встановлення ПЗ необхідно зробити перезавантаження Raspberry Pi, виконавши команду:

```
sudo reboot
```

Як тільки всі системні пакети будуть оновлені, а вбудовані файли встановлені, можна запускати прикладні програми. Raspberry Pi AI Camera повністю інтегрується з програмами libcamera, програмами gpicam та Pi camera 2.

Додатки gpicam-apps

Програми для камер gpicam-apps включають етапи виявлення об'єктів IMX500 та оцінки пози, які можна запускати в процесі постобробки. Додаткові відомості про процес постобробки наведені в документації з постобробки. Приклади використовують файли JSON для подальшої обробки, розташовані в /usr/share/rpicam-assets/.

Виявлення об'єктів

Нейронна мережа MobileNet SSD виконує базове виявлення об'єктів, надаючи обмежувальні рамки і значення достовірності для кожного знайденого об'єкта. Файл imx500_mobilenet_ssd.json містить параметри конфігурації для етапу подальшої обробки результатів виявлення об'єктів IMX500 з використанням нейронної мережі MobileNet SSD.

Файл imx500_mobilenet_ssd.json запускає конвеєр після обробки, який містить два етапи:

- imx500_object_detection, який вибирає обмежувальні рамки та значення довіри, що генеруються нейронною мережею, у вихідному тензорі
- object_detect_draw_cv, який малює обмежувальні рамки та написи на зображенні.

Тензор MobileNet SSD не вимагає додаткової постобробки на Raspberry Pi для отримання остаточного результату у вигляді обмежувальних рамок. Всі операції по виявленню об'єктів виконуються безпосередньо камерою штучного інтелекту.

Наступна команда запускає rpicam-hello з подальшою обробкою виявлення об'єктів:

```
rpicam-hello -t 0s --post-process-file /usr/share/rpicamera-assets/imx500_mobilenet_ssd.json --viewfinder-width 1920 --viewfinder-height 1080 --framerate 30
```

Після виконання команди ви побачите видошукач, який накладає обмежувальні рамки на об'єкти, розпізнані нейронною мережею (рис. 2).

Щоб записати відео з накладанням об'єктів ви-



Рис. 2. Обмежувальні рамки на об'єктах, розпізнаних нейронною мережею

явлення, використовуйте команду rpicam-vid:

```
rpicam-vid -t 10s -o output.264 --post-process-file /usr/share/rpicamera-assets/imx500_mobilenet_ssd.json --width 1920 --height 1080 --framerate 30
```

Розпізнавання imx500_object_detection можна налаштувати різними способами.

Наприклад, параметр max_detections визначає максимальну кількість об'єктів, які конвеєр виявить у будь-який момент часу. поріг визначає мінімальне значення довіри, необхідне для того, щоб конвеєр міг розглядати будь-які вхідні дані як об'єкт.

Необроблені вихідні дані цієї мережі можуть бути досить зашумленими, тому на цьому етапі також виконується деяка часова фільтрація та застосовується гістерезис. Щоб вимкнути цю фільтрацію необхідно видалити конфігураційний блок temporal_filter.

Оцінка пози

Нейронна мережа PoseNet виконує оцінку пози, позначаючи ключові точки на тілі, пов'язані з суглобами та кінцівками. Файл imx500_posenet.json містить параметри конфігурації для етапу постобробки оцінки пози IMX500 за допомогою нейронної мережі PoseNet. Він активує конвеєр постобробки, який містить два етапи:

- imx500_posenet, який отримує вихідний тензор із нейронної мережі PoseNet
- plot_pose_cv, який малює лінії, що накладаються на зображення.

Камера штучного інтелекту виконує базове виявлення, але вихідний тензор потребує додаткової пост-обробки на хості Raspberry Pi, щоб отримати

остаточний результат.

Наступна команда запускає rpicam-hello з постообробкою оцінки пози (рис. 3):

```
rpicam-hello -t 0s --post-process-file /usr/share/rpi-camera-assets/imx500_posenet.json --viewfinder-width 1920 --viewfinder-height 1080 --framerate 30
```



Рис. 3. Результат постообробки оцінки пози

Налаштувати етап imx500_posenet можна різними способами.

Наприклад, max_detections визначає максимальну кількість тіл, які конвеєр виявить у будь-який момент часу. threshold визначає мінімальне значення достовірності, необхідне для того, щоб конвеєр розглядав вхідні дані як тіло.

Picamera2

Приклади класифікації зображень, виявлення об'єктів, сегментації об'єктів і оцінки пози за допомогою Picamera2 (див. у репозиторії picamera2 Url: GitHub <https://github.com/raspberrypi/picamera2/tree/main/examples/imx500>).

Більшість прикладів використовують OpenCV для додаткової обробки. Щоб установити залежності, необхідні для запуску OpenCV, треба виконати таку команду:

```
sudo apt install python3-opencv python3-munkres
```

Необхідно завантажити репозиторій picamera2 на свій Raspberry Pi, щоб запустити приклади. Приклади файлів знаходяться у кореневому каталозі з додатковою інформацією у файлі readme.md.

Запустіть наступний скрипт зі сховища, щоб запустити виявлення об'єктів YOLOv8:

```
python imx500_object_detection_demo.py --model
```

```
/usr/share/imx500-models/imx500_network_ssd_mobilenetv2_fpnlite_320x320_pp.rpk
```

Щоб спробувати оцінити позу в Pi camera 2, запустіть наступний скрипт зі сховища:

```
python imx500_pose_estimation_higherhrnet_demo.py
```

Структура AI-камери Raspberry Pi відрізняється від традиційних камер на базі штучного інтелекту, як показано на рис. 4.

На рис. 4,а наведена структура традиційної системи камер зі штучним інтелектом. У такій системі камера передає зображення на Raspberry Pi, який обробляє зображення, а потім виконує логічний висновок за допомогою штучного інтелекту. Традиційні системи можуть використовувати зовнішні прискорювачі штучного інтелекту (як показано на рис.4,а) або покладатися виключно на центральний процесор.

На рис.4,б наведена структура системи, що використовує IMX500. Модуль камери містить процесор обробки сигналів зображення (ISP), який перетворює необроблені дані зображення з камери у вхідний тензор. Модуль камери відправляє цей тензор безпосередньо в прискорювач штучного інтелекту всередині камери, який генерує вихідні тензори, що містять результати логічного висновку. Прискорювач штучного інтелекту надсилає ці тензори до Raspberry Pi. Немає необхідності ні в зовнішньому прискорювачі, ні в Raspberry Pi для запуску програмного забезпечення нейронної мережі на центральному процесорі.

Щоб повністю зрозуміти цю систему, треба ознайомитись з наступними поняттями:

Вхідний тензор

Частина зображення з сенсора, передана в механізм штучного інтелекту для виведення. Створюється невеликим вбудованим провайдером, який також обробляє і масштабує зображення з камери до розмірів, очікуваних завантаженою нейронною мережею. Вхідний тензор, як правило, недоступний для додатків, хоча до нього можна отримати доступ для налагодження.

Область інтересу (ROI)

Визначає, яка саме частина зображення датчика обрізається перед зміною масштабу до розміру, необхідного для нейронної мережі. Може бути запитана і встановлена додатком. В якості одиниць вимірювання завжди використовуються пікселі на виході датчика з повним дозволом. Налаштування ROI за

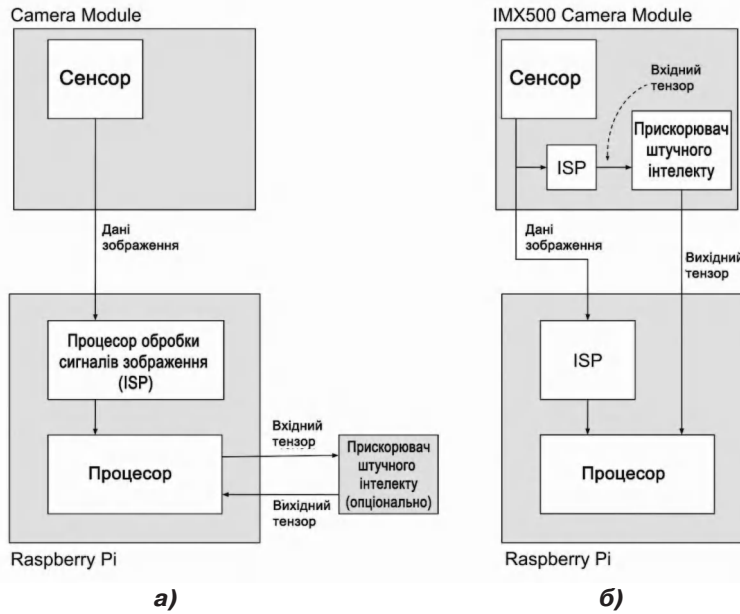


Рис. 4. Структура звичайної камери зі штучним інтелектом (а) та Raspberry Pi AI-камери (б)

замовчуванням використовує повне зображення, отримане з датчика, без обрізання даних.

Вихідні тензори

Результати логічного висновку, виконаного нейронною мережею. Точна кількість і форма виходу за-

лежать від нейронної мережі. Код програми повинен розуміти, як поводитися з тензорами.

Архітектура системи обробки зображень

На рис. 5 наведені програмні компоненти камери (виділені зеленим кольором), що використовуються

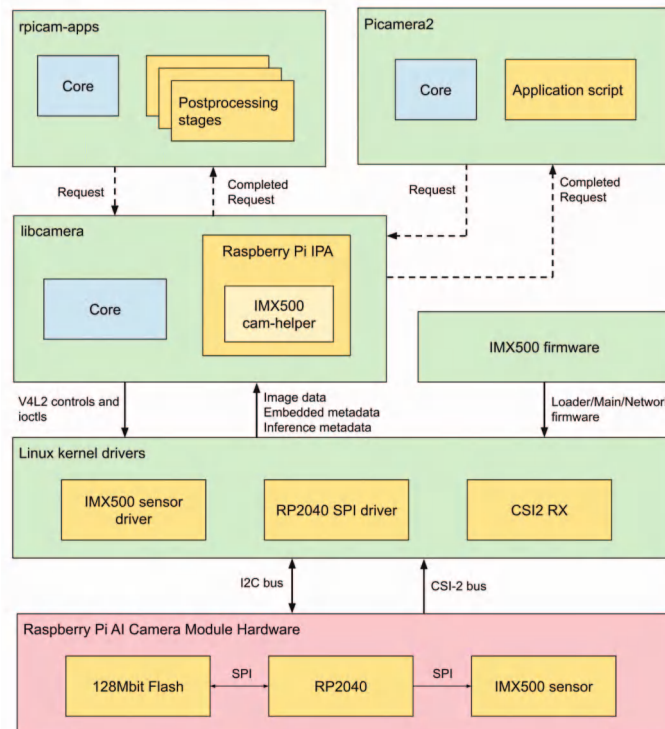


Рис. 5. Програмні компоненти Raspberry Pi AI-камери

в наведеному прикладі використання зображень/виводу з апаратним забезпеченням модуля камери Raspberry Pi AI (виділено червоним кольором).

При запуску сенсорний модуль IMX500 завантажує вбудоване ПЗ для запуску певної моделі нейронної мережі. Під час потокової передачі IMX500 генерує як потік зображень, так і потік логічних висновків. Цей потік логічних висновків містить вхідні та вихідні дані моделі нейронної мережі, також відомі як тензори вводу/виводу.

Драйвери пристроїв

На найнижчому рівні драйвер сенсорного ядра IMX500 налаштовує модуль камери по шині I2C. драйвер CSI2 (CFE на Pi 5, Unicam на всіх інших платформах Pi) налаштовує приймач на запис потоку даних зображення в буфер кадрів разом з потоками вбудованих даних і даних логічного виводу в інший буфер в пам'яті.

Файли вбудованого ПЗ також передаються по шині I2C. На більшості пристроїв для цього використовується стандартний протокол I2C, але в Raspberry Pi 5 використовується спеціальний високошвидкісний протокол. Драйвер RP2040 SPI в ядрі управляє передачею файлів вбудованого ПЗ, оскільки для передачі використовується мікроконтролер RP2040. Мікроконтролер забезпечує передачу даних I2C з ядра в IMX500 по шині SPI. Крім того, RP2040 кешує файли вбудованого ПЗ у вбудованій пам'яті. Це дозволяє уникнути необхідності передачі

цілих двійкових файлів вбудованого ПЗ по шині I2C, що значно прискорює завантаження прошивки, яка використовувалась.

Libcamera

Після того як libcamera знімає з черги буфери даних зображення та логічного виводу з ядра, спеціальна бібліотека cam-helper IMX500 (частина Raspberry Pi IPA в libcamera) аналізує буфер логічного виводу (висновків) для доступу до тензорів введення/виведення. Ці тензори упаковані як спеціальні елементи керування libcamera для Raspberry Pi від постачальника. Libcamera повертає елементи керування, наведені в табл. 1.

Програма rpicam

Програма rpicam-apps надає базовий клас етапу постобробки IMX500, який реалізує помічники для етапів постобробки IMX500 – IMX500PostProcessingStage. Потрібно використовувати цей базовий клас для отримання нового етапу постобробки для будь-якої моделі нейронної мережі, що працює на IMX500. Для прикладу наведено imx500_object_detection.cpp:

```
class ObjectDetection : public IMX500PostProcessingStage
{
public:
    ObjectDetection(RPiCamApp *app) :
    IMX500PostProcessingStage(app) {}
    char const *Name() const override;
    void Read(boost::property_tree::ptree const
```

Таблиця 1. Елементи керування що повертаються libcamera

Елемент	Опис елемента управління
CnnOutputTensor	Масив з плаваючою комою, що зберігає вихідні тензори.
CnnInputTensor	Масив з плаваючою комою, що зберігає вхідний тензор.
CnnOutputTensorInfo	Специфічні для мережі параметри, що описують структуру вихідних тензорів: <pre>struct OutputTensorInfo { uint32_t tensorDataNum; uint32_t numDimensions; uint16_t size[MaxNumDimensions]; }; struct CnnOutputTensorInfo { char networkName[NetworkNameLen]; uint32_t numTensors; OutputTensorInfo info[MaxNumTensors]; };</pre>
CnnInputTensorInfo	Специфічні для мережі параметри, що описують структуру вхідного тензора: <pre>struct CnnInputTensorInfo { char networkName[NetworkNameLen]; uint32_t width; uint32_t height; uint32_t numChannels; };</pre>

```
&params) override;
    void Configure() override;
    bool Process(CompletedRequestPtr &completed_request) override;
};
```

Для кожного кадру, отриманого програмою, викликається функція `Process()` (`ObjectDetection::Process()` у наведеному вище прикладу). У цій функції можна отримати вихідний тензор для подальшої обробки або аналізу:

```
auto output = completed_request->metadata.get(controls::rpi::CnnOutputTensor);
if (!output)
{
    LOG_ERROR("No output tensor found in metadata!");
    return false;
}
std::vector<float> output_tensor(output->data(),
output->data() + output->size());
```

Після завершення кінцеві результати можуть бути візуалізовані або збережені в метаданих і використані на іншому наступному етапі або самому додатку верхнього рівня. У випадку об'єктного висновку:

```
if (objects.size())
    completed_request->post_process_metadata.Set("object_detect.results",
```

```
objects);
```

На етапі постобробки `object_detect_draw_cv`, що наведений нижче, отримує ці результати з метаданих і малює обмежувальні прямокутники на зображенні у функції `ObjectDetectDrawCvStage::Process()`:

```
std::vector<Detection> detections;
completed_request->post_process_metadata.Get("object_detect.results",
detections);
```

У табл. 2 міститься повний список допоміжних функцій, наданих `IMX500PostProcessingStage`.

Picamera2

Інтеграція `IMX500` в `Pi camera 2` дуже схожа на те, що доступно в програмах `picam`. `Picamera2` має допоміжний клас `IMX500`, який забезпечує ту саму функціональність, що і базовий клас `picam-apps` `IMX500PostProcessingStage`. Його можна імпортувати в будь-який сценарій Python за допомогою скрипта:

```
from picamera2.devices.imx500 import IMX500
# This must be called before instantiation of Picamera2
imx500 = IMX500(model_file)
```

Щоб отримати вихідні тензори, необхідно їх витягнути з елементів керування. Потім можна засто-

Таблиця 2. список допоміжних функцій `IMX500PostProcessingStage`

Функція	Опис
<code>Read()</code>	Зазвичай викликається з <похідного класу>:: <code>Read()</code> , Ця функція зчитує параметри конфігурації для вхідного тензорного аналізу та збереження. Ця функція також зчитує рядок файлу моделі нейронної мережі ("network_file") і налаштовує вбудоване програмне забезпечення для завантаження під час відкриття камери (camera open).
<code>Process()</code>	Зазвичай викликається з < похідного класу>:: <code>Process()</code> , ця функція обробляє і зберігає вхідний тензор у файл, якщо того вимагає конфігураційний файл JSON.
<code>SetInferenceRoiAbs()</code>	Встановлює прямокутник обрізання абсолютної області інтересу (ROI) на сенсорному зображенні, який буде використовуватися для виведення результатів на <code>IMX500</code> .
<code>SetInferenceRoiAuto()</code>	Автоматично обчислює прямокутник обрізання області, що цікавить (ROI) на сенсорному зображенні, щоб зберегти вхідне тензорне співвідношення сторін для даної нейронної мережі.
<code>ShowFwProgressBar()</code>	Відображає індикатор виконання на консолі, що показує хід завантаження вбудованого ПЗ нейронній мережі в <code>IMX500</code> .
<code>ConvertInferenceCoordinates()</code>	Перетворює з вхідного тензорного координатного простору в кінцевий простір вихідного зображення. Існує ряд операцій масштабування/обрізання / перекладу оригінального сенсорного зображення на повністю оброблене вихідне зображення ISP. Ця функція перетворює координати, надані вихідним тензором, в еквівалентні координати після виконання цих операцій.

сувати додаткову обробку у своєму сценарії Python.

Наприклад, в разі використання логічного висновку об'єкта, такому як `imx500_object_detection_demo.py`, обмежувальні рамки об'єкта та значення довіри витягуються з `parse_detections()` і малюються на зображенні в `draw_detections()`:

```
class Detection:
    def __init__(self, coords, category, conf, metadata):
        """Create a Detection object, recording the
        bounding box, category and confidence."""
        self.category = category
        self.conf = conf
        obj_scaled = imx500.convert_inference_co-
        ords(coords, metadata, picam2)
        self.box = (obj_scaled.x, obj_scaled.y,
        obj_scaled.width, obj_scaled.height)

    def draw_detections(request, detections,
        stream="main"):
        """Draw the detections for this request onto the
        ISP output."""
        labels = get_labels()
        with MappedArray(request, stream) as m:
            for detection in detections:
                x, y, w, h = detection.box
                label = f"{labels[int(detection.category)]} ({de-
                tection.conf:.2f})"
                cv2.putText(m.array, label, (x + 5, y + 15),
                cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 0.5, (0, 0, 255), 1)
                cv2.rectangle(m.array, (x, y), (x + w, y + h), (0,
                0, 255, 0))
                if args.preserve_aspect_ratio:
                    b = imx500.get_roi_scaled(request)
                    cv2.putText(m.array, "ROI", (b.x + 5, b.y + 15),
                    cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 0.5, (255, 0, 0), 1)
                    cv2.rectangle(m.array, (b.x, b.y), (b.x +
                    b.width, b.y + b.height), (255, 0, 0, 0))

    def parse_detections(request, stream='main'):
        """Parse the output tensor into a number of de-
        tected objects, scaled to the ISP output."""
        outputs = imx500.get_outputs(request.get_meta-
        data())
        boxes, scores, classes = outputs[0][0], out-
        puts[1][0], outputs[2][0]
        detections = [ Detection(box, category, score,
        metadata)
            for box, score, category in zip(boxes,
```

```
scores, classes) if score > threshold]
        draw_detections(request, detections, stream)
```

На відміну від прикладу з `picam-apps`, у цьому прикладі не застосовується додаткова гістерезисна або часова фільтрація.

Клас `IMX500` у `Pi camera 2` надає допоміжні функції наведені в табл. 3.

Розгортання моделі

Щоб розгорнути нову модель нейронної мережі для камери `Raspberry Pi` зі штучним інтелектом, необхідно виконати такі дії:

1. Надати модель нейронної мережі.
2. Кількісно обробити і стиснути модель, щоб вона могла працювати з використанням ресурсів, доступних в модулі камери `IMX500`.
3. Перетворити стиснуту модель у формат `IMX500`.
4. Упакувати модель у файл вбудованого програмного забезпечення, який можна завантажити в камеру під час виконання.

Перші три кроки зазвичай виконуються на більш потужному комп'ютері, наприклад на настільному комп'ютері або сервері. Завершальний етап упаковки необхідно виконати на `Raspberry Pi`.

Створення моделей

Існуючі моделі можна повторно використовувати або створювати нові, використовуючи популярні фреймворки, такі як `TensorFlow` або `PyTorch`. Для отримання додаткової інформації треба відвідати офіційний веб-сайт розробника `ANDROID`.

Квантування та стиснення

Для квантування і стиснення моделей використовується інструментарій `Sony Model Compression Toolkit`. Щоб встановити інструментарій, необхідно виконати наступну команду:

```
pip install model_compression_toolkit
```

Інструментарій стиснення моделей генерує квантовану модель у наступних форматах:

- Keras (`TensorFlow`)
- HA NX (`PyTorch`)

Перетворення моделі

Щоб перетворити модель, спочатку необхідно встановити інструменти конвертера:

TensorFlow

```
pip install imx500-converter[tf]
```

Завжди необхідно використовувати ту саму вер-

сію TensorFlow, яка використовувалась для стиснення моделі.

PyTorch

```
pip install imx500-converter[pt]
```

Якщо вам потрібно встановити обидва пакети, використовуйте два окремі віртуальні середовища Python. Це запобігає конфліктам між TensorFlow та PyTorch.

Потім потрібно перетворити модель:

TensorFlow

```
imxconv-tf -i <compressed Keras model> -o <output folder>
```

PyTorch

```
imxconv-pt -i <compressed ONNX model> -o <output folder>
```

Обидві команди створюють вихідну папку, що містить звіт про використання пам'яті та файл rasker-Out.zip.

Для оптимального використання пам'яті, доступної для прискорювача на сенсорі IMX500, треба додати до вищевказаних команд --no-input-persistence. Однак це призведе до відключення генерації вхідного тензора та повернення до програми налагодження.

Для отримання додаткової інформації про про-

Таблиця 3. Допоміжні функції Pi camera 2

Функція	Опис
IMX500.get_full_sensor_resolution()	Повертає повну роздільну здатність датчика IMX500.
IMX500.config	Повертає словник конфігурації нейронної мережі.
IMX500.convert_inference_coords(coords, metadata, picamera2)	Перетворює координати з вхідного тензорного координатного простору в кінцевий вихідний простір зображень ISP. Необхідно передати метадані зображення Picamera2 для зображення та об'єкта Picamera2. Існує ряд операцій масштабування/обрізання / перекладу оригінального сенсорного зображення на повністю оброблене вихідне зображення ISP. Після виконання цих операцій ця функція перетворює координати, надані вихідним тензором, в еквівалентні координати.
IMX500.show_network_fw_progress_bar()	Відображає індикатор виконання на консолі, що показує хід завантаження вбудованого ПО нейронній мережі в IMX500.
IMX500.get_roi_scaled(request)	Повертає область інтересу (ROI) у координатному просторі вихідного зображення провайдера.
IMX500.get_isp_output_size(picamera2)	Повертає розмір вихідного зображення провайдера.
IMX500.get_input_size()	Повертає розмір вхідного тензора на основі використовуваної моделі нейронної мережі.
IMX500.get_outputs(metadata)	Повертає вихідні тензори з метаданих зображення Pi camera 2.
IMX500.get_output_shapes(metadata)	Повертає форму вихідних тензорів з метаданих зображення Pi camera 2 для використовуваної моделі нейронної мережі.
IMX500.set_inference_roi_abs(rectangle)	Встановлює прямокутник обрізання області інтересу (ROI), який визначає, яка частина зображення з датчика перетворюється на вхідний тензор, який використовується для виведення на IMX500. Область, що цікавить, повинна бути вказана в одиницях пікселів при повній роздільній здатності датчика у вигляді кортежу (x_offset, y_offset, ширина, висота).
IMX500.set_inference_aspect_ratio(aspect_ratio)	Автоматично обчислює прямокутник обрізки області інтересу (ROI) на сенсорному зображенні для збереження заданого співвідношення сторін. Щоб співвідношення сторін ROI точно відповідало вхідному тензору для цієї мережі, використовуйте <code>imx500.set_inference_aspect_ratio(imx500.get_input_size())</code> .
IMX500.get_kpi_info(metadata)	Повертає показники продуктивності на рівні кадру, що реєструються IMX500 для заданих метаданих зображення.

цес перетворення моделі потрібно звернутись до офіційної документації конвертера Sony IMX 500.

Упаковка моделі

На завершальному етапі модель буде упакована у файл RPK. Під час запуску моделі нейронної мережі необхідно завантажити цей файл у камеру штучного інтелекту. Перш ніж продовжити, необхідно виконати наступну команду, щоб встановити необхідні інструменти **sudo apt install imx500-tools**.

Щоб упаковати модель у файл RPK, необхідно виконати таку команду:

```
imx500-package -i <path to packerOut.zip> -o <output folder>
```

Ця команда повинна створити файл під назвою network.rpk у вихідній папці. Необхідно передати назву цього файлу програмам камери IMX500.

Більш повний набір інструкцій і додаткові відомості про використовувані інструменти наведені в документації до Sony IMX 500 Packager [2].

ЛІТЕРАТУРА

1. Raspberry Pi AI Camera. Url: <https://www.raspberrypi.com/products/ai-camera/>
2. IMX500 Packager User Manual. Url: <https://developer.aitrios.sony-semicon.com/en/raspberrypi-ai-camera/documentation/imx500-packager?version=2024-11-21&progLang=>



Датчики та системи для статичних та динамічних вимірювань прискорень та вібрацій








- подушки безпеки
- краш-тести
- вібровипробування
- авіація та ракетобудування
- автомобільний транспорт
- залізничний транспорт
- сейсмічний моніторинг
- вимірювання нахилів
- робототехніка



- вимірювання прискорень до 70 000 g
- чутливість від 0.05 мВ/г
- частотний діапазон від 0 до 20 000 Гц
- діапазон робочих температур до 482 °C

система аналізу суттєво нелінійних швидкоплинних процесів



VD MAIS – офіційний дистриб'ютор компанії Dytran в Україні

тел.: (044) 220-0101, info@vdmajs.ua, www.vdmajs.ua



www.dytran.com

VD MAIS

Вимірювальні пристрої



- осцилографи ▪ генератори ▪
- логічні аналізатори
- аналізатори спектра
- вимірювачі параметрів відеосигналів
- джерела живлення ▪ частотоміри
- мультиметри ▪ тепловізори
- вібретри

Дистриб'юція та прямі поставки:
Tektronix, Fluke, Keithley? Rohde @ Schwarz
Hameg, Uni-Trend

Україна, 03061 Київ, вул. М. Донця, 6
Тел.: (0-44) 201-0202, 492-8852, факс: (0-44) 202-1110
e-mail: info@vdmajs.ua, www.vdmajs.ua

VD MAIS

Електромеханічні компоненти і компоненти систем автоматизації



- низьковольтна комутаційна апаратура
- програмовані логічні контролери та комп'ютери, програмне забезпечення
- шафи ▪ кейти ▪ роз'єми ▪ корпуси
- вентилятори ▪ інструмент ▪ кабельна продукція ▪ СКС ▪ системи маркування

Дистриб'юція та прямі поставки:
Acme-Portable, AMP Netconnect, Belden, Doplа, Eaton, EBM-Papst, HARTING, Hoffman, Kroy, Lapp Group, Molex, Phoenix Contact, Rittal, Schroff, Siemens, TE Connectivity, TKD, Wago

Україна, 03061 Київ, вул. М. Донця, 6
Тел.: (0-44) 201-0202, 492-8852, факс: (0-44) 202-1110
e-mail: info@vdmajs.ua, www.vdmajs.ua

ПРОГРАМА МОДЕЛЮВАННЯ АНАЛОГОВИХ ТА ЦИФРОВИХ ПРИСТРОЇВ QSPICE, частина 4

QSPICE IS A FREE PROGRAM FOR SIMULATING ANALOG AND DIGITAL DEVICES, part 4

У статті наведена коротка інформація про цифрові та аналого-цифрові елементи та правила роботи з ними у безкоштовній програмі моделювання аналогових та цифрових пристроїв QSPICE від компанії Qorvo.

Abstract – The article provides brief information about digital and analog-to-digital elements and the rules for working with them in the free analog and digital device modeling program QSPICE from Qorvo.

V. Макаренко

V. Makarenko

У четвертій частині статті розглянемо бібліотеки цифрових елементів QSPICE та приклади їх використання. Цифрові елементи відносяться типу пристроїв Γ [1]. Хоча основне призначення програми QSPICE – це моделювання аналогових пристроїв різного призначення та пристроїв для перетворення енергії, у ній є можливість використати моделі найпростіших цифрових елементів та пристроїв. Окрім цього програма містить декілька елементів для моделювання аналого-цифрових схем. Перелік доступних елементів наведений нижче.

Цифрові та аналого-цифрові елементи програми QSPICE:

- INV – інвертор
- AND – логічний елемент I (від 2 до 5 входів, з інверсією та без інверсії, з одним або протифазними виходами)
- OR – логічний елемент АБО (від 2 до 4 входів, з інверсією та без інверсії, з одним або протифазними виходами)
- XOR – сума за модулем 2 (логічний елемент виключне АБО, від 2 до 4 входів, з інверсією та без інверсії, з одним або протифазними виходами)
- BUF – буферний елемент без ынверсьь та буферний каскад з парафазними виходами
- Tri-state Buffer w/ Complementary Outputs – буферний елемент з трьома станами та парафазними виходами
- SR-FLOP – тригер типу RS
- T-FLOP – тригер типу T (лічильний тригер)
- D-FLOP – тригер типу D
- JK-FLOP – тригер типу JK
- Compares the Word X with Word Y – цифровий компаратор 16-розрядних кодів
- DeMuxmultiplexsor – демультиплексор 4×16
- 16 to 1 Multiplexer – мультиплексор 16×1

- EXTOSC – генератор, з частотою запрограмованою зовнішнім резистором
- HMITT – тригер Шмітта
- MONOSTABLE – одновібратор з повторним запуском
- DAC – 8-розрядний цифро-аналоговий перетворювач.

Як впливає з цього переліку у складі бібліотек відсутні лічильники, регістри, суматори кодів та інші логічні елементи, що мають більш складну структуру. До того ж, всі елементи мають позначення у стандарті ANSI (Американського інституту стандартів), що ще додає незручностей. Окрім того, до кожного елементу необхідно підводити напругу живлення, в той час коли у програмах моделювання Orcad, Altium Designer, Multisim достатньо розмістити значок напруги живлення на робочому аркуші і всі елементи автоматично отримують живлення.

Перелічені особливості складу бібліотек та встановлення параметрів логічних елементів свідчать про те, що програма орієнована на моделювання аналогових та імпульсних схем. А цифрові схеми можуть біти використані для формування невеликих вузлів (наприклад, для управління силовими ключами).

Параметри логічних елементів задаються з використанням синтаксису:

```
¶nnn VDD VSS Q Q̄ A B C D E ¶¶¶¶¶¶¶¶ AND [INSTANCE PARAMETERS],
```

де:

- VDD – позитивна напруга живлення
- VSS – від'ємна напруга живлення
- Q – Q = A·B·C·D·E
- Q̄ – інверсний вихід
- INSTANCE PARAMETERS – параметри пристрою.

Instance Parameters логічного елементу:

- CAPVDD – ємність між виходом та проводом живлення Vdd (по замовчуванню 0 Ф)
- CAPVSS – ємність між виходом та проводом живлення Vss (по замовчуванню 0 Ф)
- IC – початковий стан мікросхеми
- M – кількість паралельних пристроїв (по замовчуванню 1)
- REF – пороговий рівень (по замовчуванню $(V_{dd} + V_{ss})/2$)
- RSRC – опір між Vdd і виходом при низькому рівні вихідного сигналу (він же ROUT по замовчуванню 100 Ом)
- RSINK – опір між Vss при високому рівні вихідного сигналу (по замовчуванню дорівнює RSRC)
- TD – затримка (вона ж TD1 по замовчуванню 0)
- TD2 – асиметрична затримка (по замовчуванню дорівнює TD)
- TEMP – температура корпусу мікросхеми (по замовчуванню 27 °C)
- TFALL – час спаду (по замовчуванню 0 с)
- TRISE – час наростання (по замовчуванню 0 с)
- TTOL – допуск за часом (по замовчуванню дорівнює 1 мкс)
- UVLO – мінімальна напруга Vdd-Vss для роботи (по замовчуванню 0 В)
- ZMULT – помножувач повного опору при зміщенні наполовину (по замовчуванню 1).

На рис. 1 наведена модель для ілюстрації роботи логічного елементу I з чотирма входами.

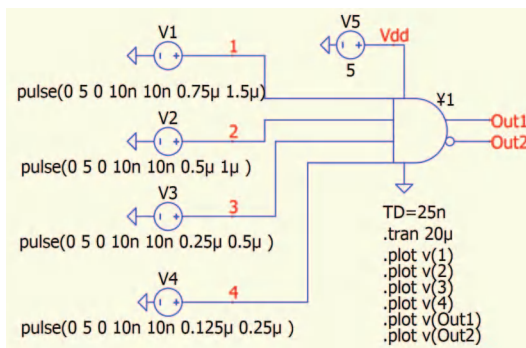


Рис. 1. Модель для ілюстрації роботи логічного елементу I з чотирма входами

В параметрах вхідних сигналів, формуємих генераторами V1...V4, тривалість фронту і спаду встановлені по 10 нс, а тривалість фронту і спаду логічного елемента TD задана рівною 25 нс. Часові діаграми вхідних та вихідних сигналів логічного елементу I наведені на рис. 2.

По замовчуванню тривалість затримки (а фактично і тривалість фронту та спаду) логічного еле-

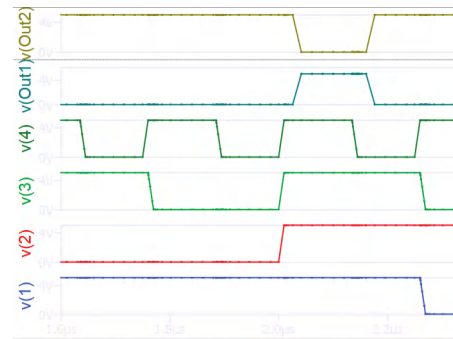


Рис. 2. Часові діаграми вхідних та вихідних сигналів логічного елементу I

менту дорівнює 0, що відповідає ідеальній моделі. Тому необхідно кожного разу встановлювати як мінімум параметр TD. Для його задання необхідно розмістити курсор миші на зображенні логічного елементу і натиснути праву кнопку миші. У випадваючому меню (рис. 3) обрати пункт Add New Attribute і вписати значення TD, як показано на рис. 1.

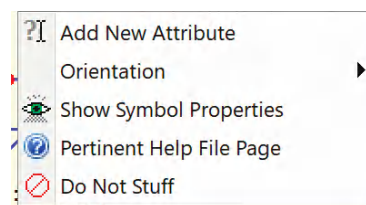


Рис. 3. Випадаюче меню з параметрами логічного елементу I

Розглянемо особливості T-тригера (рис. 4) програми QSPICE.

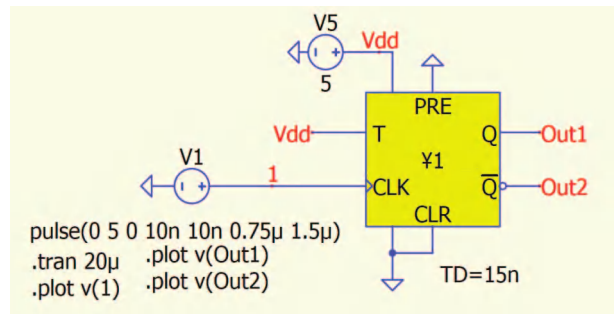


Рис. 4. Схема підключення тригера T-FLOP

Як впливає з рис. 4, це тригер RST зі входом дозволу роботи T. Вхід PRE відповідає входу S (встановлення у "1"), а вхід CLR – входу R (встановлення у "0"). Для роботи тригера у режимі ділення частоти на 2 необхідно на вхід T подати рівень логічної "1". Якщо на вході T встановити "0", то на виході Q встановлюється постійний рівень 5 В, а на інверсному виході – 0. Часові діаграми сигналів на вході та виході тригера наведені на рис. 5.

Використовуючи вхід mo;на формувати послідов-

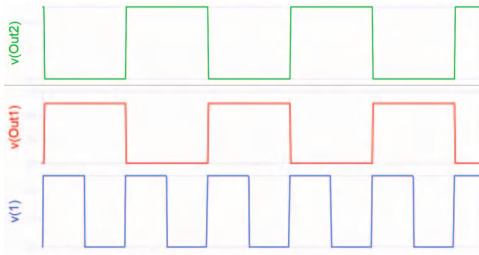


Рис. 5. Часові діаграми сигналів на вході та виході тригера

ності імпульсів з заданими часовими інтервалами. На рис. 6 наведена модель для ілюстрації роботи Т-тригера в режимі управління, а часові діаграми сигналів на входах та виході тригера – на рис. 7.

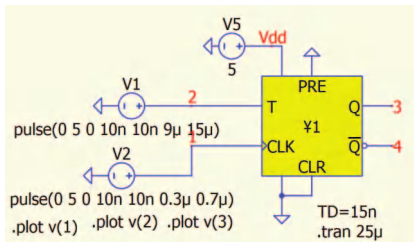


Рис. 6. Модель для ілюстрації роботи Т-тригера в режимі управління

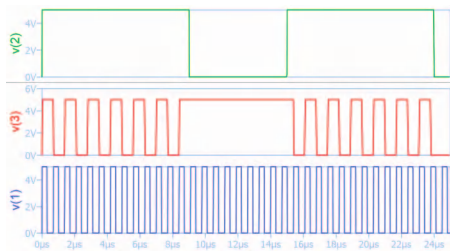


Рис. 7. Часові діаграми сигналів на входах та виході тригера в режимі управління

Розглянемо приклад використання ЦАП.

На рис. 8 наведена модель з використання 4-х розрядів вхідного коду, що формується генераторами імпульсів.

Напругу живлення та опорну формує генератор V6. Входи молодших розрядів підключені до загального проводу. На виході повинна формуватися східчаста напруга, що і підтверджують діаграми вихідного сигналу на рис. 9.

Для перевірки здатності ЦАП працювати з двополярною опорною напругою використано модель наведену на рис. 10.

Замість постійної напруги на вхід Ref подано синусоїдальний сигнал від генератора V7. На рис. 11 наведена часова діаграма сигналу на виході ЦАП, який в такому режимі виконує функцію цифрового потенціометра, що управляється 4-розрядним кодом. Тобто це модель перемножуючого ЦАП.

Більш детальну інформацію і приклади можна

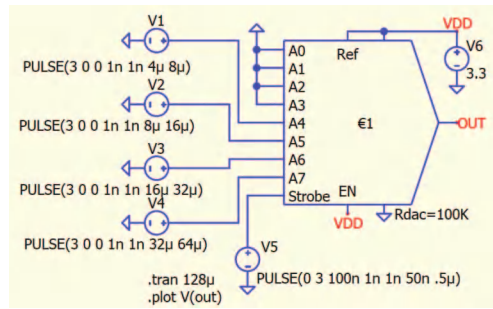


Рис. 8. Модель для ілюстрації роботи цифро-аналогового перетворювача

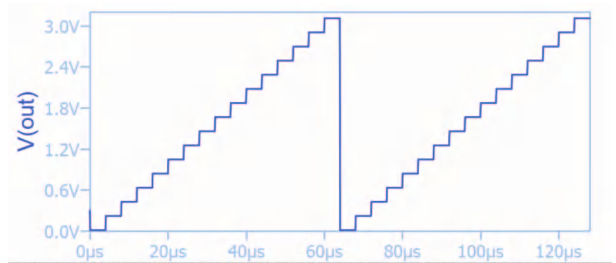


Рис. 9. Часова діаграма сигналу на виході ЦАП при постійній опорній напрузі

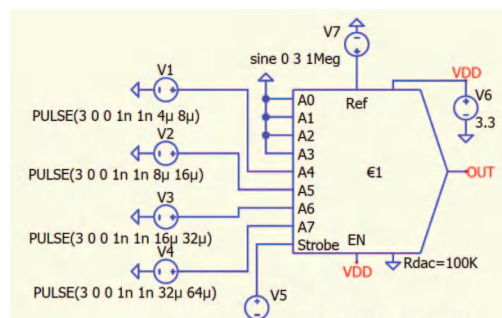


Рис. 10. Модель для перевірки роботи ЦАП з двополярною опорною напругою

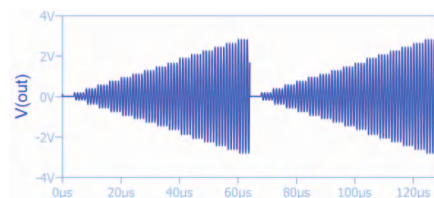


Рис. 11. часова діаграма сигналу на виході ЦАП що працює в режимі цифрового потенціометра

знайти на сайті компанії Qorvo [2], де є посилання як на власні ресурси, так і на зовнішні статті.

ЛІТЕРАТУРА

1. <https://www.qorvo.com/design-hub/blog/spicer-free-fast-circuit-simulation-for-mixed-analog-and-digital>
2. <https://www.qorvo.com/design-hub/design-tools/interactive/qspice>

Зміст журналу EKiC за 2024 р. Contents of Journal in 2024

Перелік містить усі статті та короткі повідомлення, опубліковані у 2024 році. Публікації згруповані за рубриками та розташовані в порядку зростання номера сторінки (чисельник дробу) та номера журналу (знаменник дробу).

ТЕХНОЛОГІЇ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

- В. Романов
П'ять провідних тенденцій розвитку Інтернету військових речей (IoMT).....1/3
- Б. Скэннелл
Високоєфективні інерційні сенсори для Інтернету рухомих речей1/5
- С. Віто, Р. Мучсел, Д. Луміс
Апаратний захист вузлів Інтернету речей від кібератак12/1
- Д. Сантос, А. Катапанг, Е. Рейта
Мережі сейсмічного зондування Землі для попередження землетрусу17/2
- В. Макаренко
Одноплатні комп'ютери Raspberry Pi Pico W.....3/3
- В. Макаренко
Модулі камер Raspberry Pi11/3
- Т. Бредік
Інтелект на межі16/3
- В. Романов
Технологія розумної лікарні у відділеннях інтенсивної терапії20/3
- Р. Анслоу
Настанова для розробників безпроводового промислового смарт сенсора24/3
- Дж. Ланнан
Технологія інтелектуальних будівель: розумний шлях зниження викидів парникових газів20/4
- С. Пімпалкар
Локалізація автономного мобільного робота за допомогою інерціального вимірювального вузла: нова технологія для точної навігації24/4
- Б. Боррес, К. Макатангей
Як забезпечити відповідність систем управління стандартам промислової функціональної безпеки за допомогою високоєфективного супервізора напруги, частина 1.....30/4
- В. Лаврентьев, О. Вороненко
Пульсова діагностика та засоби візуалізації і обробки пульсової хвилі.....38/4

В. Макаренко
Набір для розробки програмного забезпечення Raspberry Pi Pico.....44/4

В. Макаренко
Raspberry Pi камера зі штучним інтелектом51/4

ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

В. Романов
Перешкоди у системах телекомунікацій: види перешкод і методи боротьби з ними3/30

Л. Кастільо
Ефективний пошук зовнішніх перешкод у мобільних мережах38/3

Ф. Лесснер
Електронні компоненти для захисту апаратури різного призначення від перешкод, що викликають перевантаження по напрузі та струму42/3

ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ

В. Макаренко
Фільтри електромагнітних завад від компанії TE connectivity51/2

СТАНДАРТИ

В. Романов
Військовий стандарт MIL-STD-810: призначення та особливості застосування16/1

В. Романов
Військовий стандарт MIL-STD-461: призначення та особливості застосування18/1

КОРПУСИ ДЛЯ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ ІМС

М. Мота
Особливості корпусів багатокристалічних модулів.....3/4

П. О'брайен
Корпуси для фотонних ІМС та пристроїв6/4

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ

В. Макаренко
Встановлювачі SMT-компонентів серії SM компанії Hanwha Precision Machinery44/2

Настанова з інноваційних рішень компанії LPKF для створення прототипів електронної апаратури, частина 112/4

ПРОМИСЛОВІ КОМП'ЮТЕРИ

В. Макаренко
Панельний комп'ютер W24IT3S-SPA269-P1 238
зі ступенем захисту IP6931/1

КАБЕЛІ

В. Макаренко
Кабелі TE Connectivity для передачі
високошвидкісних та цифрових даних36/1

ДРУКОВАНІ ПЛАТИ

В. Романов
Перспективи розвитку друкованих плат40/1

В. Макаренко
Особливості проектування та виробництва
високошвидкісних друкованих плат44/1

Настанова з компоновки друкованих плат для ра-
діочастотних та змішаних сигналів3/2

Д. Ардіццоні
Практичний посібник із компонування
високошвидкісної друкованої плати9/2

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ

В. Макаренко
Програма моделювання аналогових та цифрових
пристроїв QSPICE, частина 154/1

В. Макаренко
Програма моделювання аналогових та цифрових
пристроїв QSPICE, частина 257/2

В. Макаренко
Програма моделювання аналогових та цифрових
пристроїв QSPICE, частина 359/3

В. Макаренко
Програма моделювання аналогових та цифрових
пристроїв QSPICE, частина 460/4

ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ

Т. Х'юнх, Р. Назаді
Як захистити систему живлення від відмов або
збоїв23/1

А. Ібрагейм, К. Армійо, П. Дакер
Вибір оптимального опору сенсорного резистора
імпульсного джерела живлення31/2

В. Макаренко
Як зменшити рівень пульсацій в джерелах
живлення зі стрибкоподібною зміною струму
навантаження35/2

В. Макаренко
Особливості використання активних фільтрів
кондуктивних електромагнітних завад39/2

Аналіз роботи імпульсного джерела живлення:
синхронізація силових транзисторів і вибір
підвищувального конденсатора46/3
В. Макаренко
Автономні інвертори Mean Well51/3

ЗМІСТ ЖУРНАЛУ

Зміст журналу за 2024 р.4/63

VD MAIS
Контрактне виробництво електроніки (по стандарту IPC-A-610)

- автоматизований монтаж ЕП/Ю-компонентів (до 2.5 млн на добу)
- автоматизоване селективне паяння компонентів, що монтуються в отвори
- монтаж прототипів друкованих плат
- 100% автоматичний оптичний контроль якості монтажу
- виготовлення дослідних зразків виробів
- дрібно- та великосерійне виробництво
- 10-річний досвід контрактного виробництва
- гарантія якості

Сертифікація на відповідність вимогам стандартів ISO 9001:2015, ISO 14001:2015, IATF 16949:2016 і ISO 13485:2016.
Ціни оптимальні.

Україна, 03061 Київ, вул. М. Донця, 6
Тел.: (0-44) 201-0202, 492-8852, факс: (0-44) 202-1110
e-mail: info@vdmmais.ua, www.vdmmais.ua



VD MAIS
Устаткування та матеріали для монтажу/демонтажу електронних компонентів (ЕК)

- паяльне та ремонтне обладнання
- системи очищення повітря
- пристрої трафаретного друку
- системи встановлення компонентів
- паяльні печі: конвекційного та селективного паяння, паяння хвилею
- випробувальне обладнання
- системи візуального контролю
- координатно-фрезерні верстати
- технологічні матеріали монтажу ЕК
- засоби антистатичного захисту

Дистриб'юція та прямі поставки:
AIM, Bernstein, Charleswater, Electrolube, Essemtec, KIC, Kolver, LPKF, Magic Ray, Miele, Nordson, Optilia, PACE, PDT, Hanwha, Seho, TWS, Vision, Weiss

Україна, 03061 Київ, вул. М. Донця, 6
Тел.: (0-44) 201-0202, 492-8852, факс: (0-44) 202-1110
e-mail: info@vdmmais.ua, www.vdmmais.ua



ВСТАНОВЛЮВАЧІ КОМПОНЕНТІВ SM СЕРІЇ



Hanwha

– гнучке рішення будь-яких завдань
монтажу електронних компонентів

Встановлювачі SM471 PLUS, SM481 PLUS, SM482 PLUS та SM485
призначені для збирання складної продукції в умовах
серійного, дрібносерійного та дослідного виробництва



VD MAIS – офіційний дистриб'ютор компанії Hanwha в Україні

тел.: (044) 220-0101, info@vdmαιs.ua, www.vdmαιs.ua

EKIC

ЕЛЕКТРОННІ КОМПОНЕНТИ І СИСТЕМИ

Науково-технічний журнал.
Призначений для розробників
та виробників електронної
та електротехнічної апаратури,
засобів телекомунікацій, комп'ютерних
та керуючих систем, промислової
та транспортної електроніки.
Видається із 1996 року.
Засновник та видавець журналу –
НВФ VD MAIS.

НВФ VD MAIS

Центральний офіс:

03061 Київ
вул. М. Донця, 6
Тел.: (+38-044) 201-0202, 492-8852
Факс: (+38-044) 202-1110
E-mail: info@vdmajs.ua
[http:// www.vdmajs.ua](http://www.vdmajs.ua)

Ukraine
03061 Kyiv, M. Dontsia St. 6
tel.: (+38-044) 201-0202, 492-8852
fax: (+38-044) 202-1110