

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет інформаційної безпеки та електронних комунікацій  
(повне найменування факультету)

Кафедра «Інформаційної безпеки та нанoeлектроніки»  
(повне найменування кафедри)

## Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

магістра

(ступінь вищої освіти)

на тему «Енергоефективні мікросистеми живлення»

(назва теми)

Виконав: студент 2 курсу, групи БК-314м

Спеціальності 176- «Мікро-та наносистемна

(код і найменування спеціальності)

техніка»

Освітня програма (спеціалізація)

«Мікро та нанoeлектронні прилади і

пристрої»

ІГНАТОВ А. А.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник ВАСИЛЕНКО О.В.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент КУРБАЦЬКИЙ В.П.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)



## 6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
Основні розділи	ВАСИЛЕНКО О.В., доцент каф.ІБтаН	15.09.2025	13.12.2025
Нормоконтроль	КОРОЛЬКОВ Р.Ю., доцент каф.ІБтаН		14.12.2025

7.Дата видачі завдання «15» вересня 2025 року

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№з/п	Назва етапів дипломного проекту(роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Збір і аналіз інформації щодо тенденцій розвитку сучасних систем живлення та імпульсних перетворювачів	01.10.2025	виконано
2	Систематизація літературних даних, постановка задач дослідження	15.10.2025	виконано
3	Складання та затвердження наукового й технічного завдання на дипломний проект	01.11.2025	виконано
4	Уточнення структури роботи та формування вимог до DC-DC перетворювача	10.11.2025	виконано
5	Розроблення моделі DC-DC перетворювача та проведення комп'ютерного моделювання (MicroCap та PSIM)	21.11.2025	виконано
6	Аналіз результатів моделювання, оптимізація параметрів та оцінка енергоефективності	01.12.2025	виконано
7	Оформлення ПЗ	13.12.2025	виконано

Студент(ка)

\_\_\_\_\_

(підпис)

Керівник проекту (роботи)

\_\_\_\_\_

(підпис)

Антон ІГНАТОВ

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Ольга ВАСИЛЕНКО

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

## АНОТАЦІЯ

Пояснювальна записка до магістерської роботи: 81 с., 16 рис., 16 джерел.

СИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ ІОТ-СЕНСОРІВ, ЕНЕРГОХАРВЕСТИНГ, DC/DC ПЕРЕТВОРЮВАЧІ, С-TYPE ТОПОЛОГІЇ, РМУ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, АВТОНОМНІ КІБЕР-ФІЗИЧНІ СИСТЕМИ.

Об'єкт дослідження – системи енергоживлення сенсорних вузлів Інтернету речей та їх енергоефективні компоненти.

Предмет дослідження – методи забезпечення живлення, енергозбору, стабілізації напруги та перетворення енергії в автономних ІоТ-пристроях, включно з DC/DC-перетворювачами, суперконденсаторами, РМУ та технологіями EnergyHarvesting.

Мета роботи – проаналізувати сучасні системи живлення для сенсорів Інтернету речей, узагальнити методи підвищення автономності, дослідити роль енергоефективних протоколів, перетворювачів С-Type та розробити універсальну модель для проектування оптимальних мікросистем живлення.

Методи дослідження базуються на аналізі наукової літератури, огляді сучасних схем DC/DC-перетворювачів, оцінці ефективності топологій С-Type, вивченні технологій енергозбору, інтелектуальних РМУ, а також порівнянні підходів до оптимізації енергоспоживання в ІоТ-системах згідно з міжнародними стандартами та сучасними практиками проектування, математичному моделюванні.

Проведено детальний аналіз сучасних систем живлення для ІоТ-сенсорів, включно з технологіями EnergyHarvesting, перетворювачами buck/boost/buck-boost, суперконденсаторами та РМУ. Особливу увагу приділено перетворювачам С-Type, які забезпечують високий ККД та універсальність. Розглянуто їх роль у мікросистемах живлення, методи оптимізації енергоспоживання та аспекти теплового менеджменту. Виявлено ключові тенденції розвитку автономних сенсорних мереж та окреслено перспективи використання інтелектуальних енергетичних модулів, гібридних джерел живлення та систем PowerSystem-on-Chip для створення повністю автономних кібер-фізичних систем, розроблено математичні моделі для універсального чотириохлового DC-DC перетворювача (FSBB).

## ABSTRACT

Explanatory note to the master's thesis:81 p.,16 fig., 16 sources.

**POWER SYSTEMS FOR IoT SENSORS, ENERGY HARVESTING, DC/DC CONVERTERS, C-TYPE TOPOLOGIES, PMU, ENERGY EFFICIENCY, AUTONOMOUS CYBER-PHYSICAL SYSTEMS.**

The object of research is power supply systems for sensor nodes of the Internet of Things and their energy-efficient components.

The subject of research is methods of power supply, energy harvesting, voltage stabilization and energy conversion in autonomous IoT devices, including DC/DC converters, supercapacitors, PMU and EnergyHarvesting technologies.

The purpose of the work is to analyze modern power systems for IoT sensors, generalize methods for increasing autonomy, investigate the role of energy-efficient protocols, C-Type converters, and develop a universal model for designing optimal micropower systems.

The research methods are based on the analysis of scientific literature, a review of modern DC/DC converter circuits, an assessment of the effectiveness of C-Type topologies, the study of energy harvesting technologies, intelligent PMUs, as well as a comparison of approaches to optimizing energy consumption in IoT systems according to international standards and modern design practices, and mathematical modeling.

A detailed analysis of modern power systems for IoT sensors, including EnergyHarvesting technologies, buck/boost/buck-boost converters, supercapacitors, and PMUs, was conducted. Particular attention was paid to C-Type converters, which provide high efficiency and versatility. Their role in micropower systems, methods for optimizing energy consumption, and aspects of thermal management were considered. Key trends in the development of autonomous sensor networks have been identified and the prospects for using intelligent energy modules, hybrid power supplies, and PowerSystem-on-Chip systems to create fully autonomous cyber-physical systems have been outlined, and mathematical models for a universal four-switch DC-DC converter (FSBB) have been developed.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ СКОРОЧЕНЬ

- C-Type – Перетворювачі типу C (Capacitor-Based Topologies);
- CSP – Chip Scale Package, корпус мікросхеми з мінімальними габаритами;
- DC – Direct Current, постійний струм;
- DC/DC – Перетворювач постійної напруги;
- DLM – Double-Layer Metal, технологія двошарової металізації;
- DSP – Digital Signal Processor, цифровий сигнальний процесор;
- EMI – Electromagnetic Interference, електромагнітні завади;
- Energy Harvesting (EH) – Технології збору енергії з навколишнього середовища;
- ESR – Equivalent Series Resistance, еквівалентний послідовний опір;
- FPGA – Field Programmable Gate Array, програмована логічна матриця;
- FSBB – Four-Switch Buck-Boost, чотириключовий понижувально-підвищувальний перетворювач;
- GaN – Gallium Nitride, нітрид галію;
- IoT – Internet of Things, Інтернет речей;
- КФС (CPS) – Кібер-фізичні системи / Cyber-Physical Systems;
- LDO – Low Dropout Regulator, лінійний стабілізатор з малим падінням напруги;
- MCU – Microcontroller Unit, мікроконтролер;
- MHz – Megahertz, мегагерц;
- PCB – Printed Circuit Board, друкована плата;
- PMU – Power Management Unit, вузол керування живленням;
- PwrSiP – Power Supply in Package, живлення у корпусі;
- PwrSoC – Power Supply on Chip, живлення на кристалі.

## ЗМІСТ

Вступ.....	8
1 Аналіз тенденцій розвитку систем живлення.....	10
1.1 Тенденції розвитку імпульсних джерел живлення.....	11
1.2 Сучасна елементна база імпульсних джерел живлення .....	26
1.3 Технології температурного менеджменту .....	31
1.4 Постановка задач дослідження .....	37
2 Системи живлення для елементів кібер-фізичних систем .....	38
2.1 Кібер-фізичні системи.....	38
2.2 Системи живлення для сенсорів IoT .....	47
2.3 Перетворювачі type-C .....	52
3 Аналіз і розробка моделей універсальних перетворювачів для мікросистемних джерел живлення.....	60
3.1 Моделювання та симуляція силового каскаду FSBB .....	70
Висновки.....	80
Перелік джерел посилань.....	80

## ВСТУП

Стрімкий розвиток сучасної електроніки, мікропроцесорної техніки та кібер-фізичних систем зумовлює зростання вимог до систем живлення. Сьогодні джерела живлення мають забезпечувати не лише необхідні рівні напруги та струму, але й високу енергоефективність, малі габарити, надійність та здатність працювати у складних умовах експлуатації [1]. Особливої актуальності ці вимоги набувають у пристроях Інтернету речей (IoT) та елементах кібер-фізичних систем, де значна частина вузлів функціонує автономно та має обмежений енергобюджет [2].

Одним із ключових напрямів розвитку є імпульсні джерела живлення (SMPS), у яких підвищення робочої частоти дозволяє суттєво зменшити розміри індуктивних і ємнісних компонентів та перейти до мікросистемних рішень [1]. Використання сучасної елементної бази, зокрема широкозонних напівпровідників і мініатюрних пасивних елементів, відкриває можливості для побудови компактних і високоефективних перетворювачів [3]. Водночас зростання щільності потужності супроводжується ускладненням теплових режимів, що вимагає застосування спеціалізованих технологій температурного менеджменту для забезпечення стабільності та довговічності мікросистем живлення [1].

Паралельно активно розвиваються системи живлення для елементів кібер-фізичних систем і сенсорів IoT, які часто працюють від батарей або відновлюваних джерел енергії [2]. Для таких застосувань важливими є низьке енергоспоживання, можливість використання технологій енергозбору (energyharvesting) та здатність стабільно працювати при змінних режимах навантаження [2]. Особливе місце посідають перетворювачі типу buck–boost, які

забезпечують роботу пристроїв у широкому діапазоні вхідних напруг і є базою для побудови енергоефективних мікросистем живлення [1].

Мета даної роботи полягає у дослідженні тенденцій розвитку енергоефективних мікросистем живлення, аналізі сучасної елементної бази імпульсних джерел живлення та систем енергозабезпечення для елементів кібер-фізичних систем, а також у розробці моделі buck–boost перетворювача, придатної для використання у таких системах [1].

Для досягнення поставленої мети передбачено виконання таких основних завдань:

- проаналізувати сучасні тенденції розвитку систем живлення, зокрема вплив підвищення частоти в SMPS на мініатюризацію елементної бази [1];
- дослідити сучасні компоненти імпульсних джерел живлення та технології температурного менеджменту [3];
- розглянути системи живлення для сенсорів IoT та елементів кібер-фізичних систем [2];
- розробити та дослідити модель buck–boost перетворювача для застосування в енергоефективних мікросистемах живлення [1].

Структурно робота складається з трьох розділів. У першому розділі виконано аналіз тенденцій розвитку систем живлення та сучасної елементної бази імпульсних перетворювачів, а також розглянуто технології температурного менеджменту [1, 3]. У другому розділі проаналізовано системи живлення для елементів кібер-фізичних систем і сенсорів IoT[2]. У третьому розділі розроблено та досліджено модель buck–boost перетворювача, орієнтовану на використання в енергоефективних мікросистемах живлення [1].

## 1 АНАЛІЗ ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ СИСТЕМ ЖИВЛЕННЯ

Розвиток сучасної електроніки тісно пов'язаний з удосконаленням систем живлення, які забезпечують стабільну та ефективну роботу мікропроцесорних, телекомунікаційних, побутових та промислових пристроїв [4]. Зі зростанням функціональної складності та енергоспоживання цифрових систем все більш актуальними стають питання підвищення енергоефективності, зменшення розмірів та покращення теплових характеристик джерел живлення. На цьому фоні імпульсні системи живлення (SMPS) витісняють лінійні стабілізатори через вищий ККД, ширші можливості регулювання та кращу масштабованість [4].

Тенденції розвитку систем живлення формуються під впливом декількох ключових технологічних напрямів. По-перше, спостерігається стале підвищення частоти комутації, що дозволяє зменшувати індуктивно-ємнісні компоненти та підвищувати щільність потужності. По-друге, значний вплив має впровадження напівпровідникових матеріалів нового покоління, таких як нітрид галію (GaN) та карбід кремнію (SiC), які забезпечують швидші перехідні процеси та менші втрати. По-третє, відбувається глибока інтеграція силових елементів, контролерів, драйверів та індуктивностей у єдині модульні рішення, що спрощує проектування та підвищує надійність.

Крім того, сучасні тенденції диктують жорсткіші норми електромагнітної сумісності, необхідність роботи в умовах нестабільної мережі, а також підвищення рівня безпеки та захисту від аварійних режимів. Зростає роль цифрового керування, що відкриває можливості для адаптивного регулювання, телеметрії та оптимізації енергоспоживання в реальному часі [4].

Таким чином, аналіз тенденцій розвитку систем живлення є важливим етапом, який дозволяє визначити актуальні технологічні підходи, сформулювати вимоги до апаратної частини та обґрунтувати вибір топології для подальшого проектування DC–DC перетворювачів [4,6].

### 1.1 Тенденції розвитку імпульсних джерел живлення

Сучасна тенденція до мініатюризації електронних пристроїв, поєднана зі зростанням їх функціональності та обчислювальної потужності від портативної електроніки до високопродуктивних систем, висуває нові вимоги до імпульсних систем керування живленням . Такі системи повинні забезпечувати високу енергоефективність, стабільність роботи та мінімальні габарити за умов зростаючої щільності інтеграції компонентів, що є характерною тенденцією розвитку сучасної силової електроніки . Значного прогресу в цій галузі досягнуто завдяки розвитку напівпровідникових технологій і вдосконаленню схемотехнічних рішень у системах імпульсного перетворення енергії . Зокрема, інтеграція силових ключів із драйверами, контролерами та цифровими модулями керування дозволила створювати більш компактні й ефективні рішення для джерел живлення . Широкого поширення набули системи, реалізовані відповідно до концепцій System-in-Package (SiP) та Chip-ScalePackaging (CSP), які передбачають поєднання активних і пасивних елементів у межах одного корпусу та сприяють зменшенню паразитних параметрів і габаритів систем живлення [4].

Водночас одним із головних обмежень подальшої мініатюризації залишається використання традиційних дискретних індуктивних і ємнісних

компонентів, які займають значну площу друкованої плати та ускладнюють інтеграцію джерел живлення. Для подолання цих обмежень активно розвивається концепція «живлення в упаковці» (PowerSupplyinPackage, PwrSiP), що передбачає розміщення контролерів, драйверів і пасивних елементів у межах одного корпусу. Подібні рішення вже реалізовані низкою провідних виробників, зокрема Enpirion, TexasInstruments і Micrel, та зазвичай застосовуються в діапазоні потужностей 1–5 Вт, забезпечуючи суттєве зменшення площі друкованої плати й кількості зовнішніх компонентів. Наступним етапом розвитку інтегрованих систем живлення є концепція PowerSupplyonChip (PwrSoC), яка передбачає створення повністю інтегрованого джерела живлення безпосередньо на кристалі мікросхеми, що дозволяє знизити паразитні втрати, підвищити щільність потужності та загальну енергоефективність системи [4].

Одним із головних чинників, що дозволяють зменшити розміри компонентів без втрати ефективності, є підвищення робочої частоти імпульсних перетворювачів (SMPS). У типовій схемі DC/DC понижувального перетворювача значення індуктивності та ємності обернено пропорційні робочій частоті. Отже, збільшення частоти перемикання до діапазону 10–100 МГц дозволяє суттєво зменшити розміри індуктивних і ємнісних елементів до рівня, який сумісний із мікросхемною інтеграцією. Цевідкриває можливість реалізації мікротрансформаторів і мікроконденсаторів безпосередньо на кремнієвій підкладці.

Технологія PwrSiP є проміжним етапом між традиційними системами та повністю інтегрованими рішеннями. Вона забезпечує високу щільність розміщення компонентів, короткі з'єднання та зменшені втрати на комутацію. При цьому концепція PwrSoC розглядається як довгострокова стратегія розвитку, де пасивні елементи індуктивності, трансформатори, конденсатори

реалізуються у вигляді мікроструктур, вбудованих безпосередньо у кремнієву плас.

Підвищення робочої частоти дозволяє не лише зменшити розміри пасивних елементів, а й підвищити швидкодію перетворювачів. Це особливо актуально для мікросистем живлення кібер-фізичних систем, де критично важливими є швидке реагування, висока стабільність і мінімальні втрати при перетворенні енергії [4]. Проте зі збільшенням частоти зростають вимоги до матеріалів та технологій виготовлення. Для зменшення втрат на комутацію використовуються напівпровідники з широкою забороненою зоною GaN (нітрид галію) та SiC (карбід кремнію), що забезпечують менші втрати при високих частотах і температурах. Крім того, при високочастотній роботі особливого значення набуває правильна організація тепловідведення та зниження електромагнітних завад.

Використання інтегрованих мікроіндуктивностей, планарних котушок і тонкоплівкових конденсаторів дозволяє мінімізувати паразитні ефекти, а застосування багатошарових плат і 3D-інтеграції сприяє ефективнішому охолодженню. У результаті впровадження високочастотних технологій і 3D-інтеграції, сучасні SMPS досягають ККД понад 95–97 % [4], водночас зменшуючи габарити системи в кілька разів порівняно з традиційними аналогами [4]. Це відкриває шлях до створення повністю інтегрованих енергоефективних мікросистем живлення нового покоління, здатних забезпечити роботу компактних, автономних пристроїв у складі кібер-фізичних систем і IoT [4]. Порівняння щільності потужності силових модулів, PwrSiP- та PwrSoC-рішень наведено на рисунку 1.1.

Аналіз показує, що продукти, створені за концепцією PowerSupplyinPackage (PwrSiP), демонструють вищу щільність потужності порівняно з традиційними дискретними силовими модулями. Це зумовлено

насамперед підвищенням робочої частоти таких пристроїв, що дозволяє використовувати менші за розміром індуктивності, а отже, зменшити габарити та висоту системи [4]. Дослідні зразки PowerSupplyonChip (PwrSoC), представлені у наукових роботах, наразі показують дещо нижчу щільність потужності порівняно з комерційними PwrSiP-рішеннями за тієї самої частоти роботи [4].

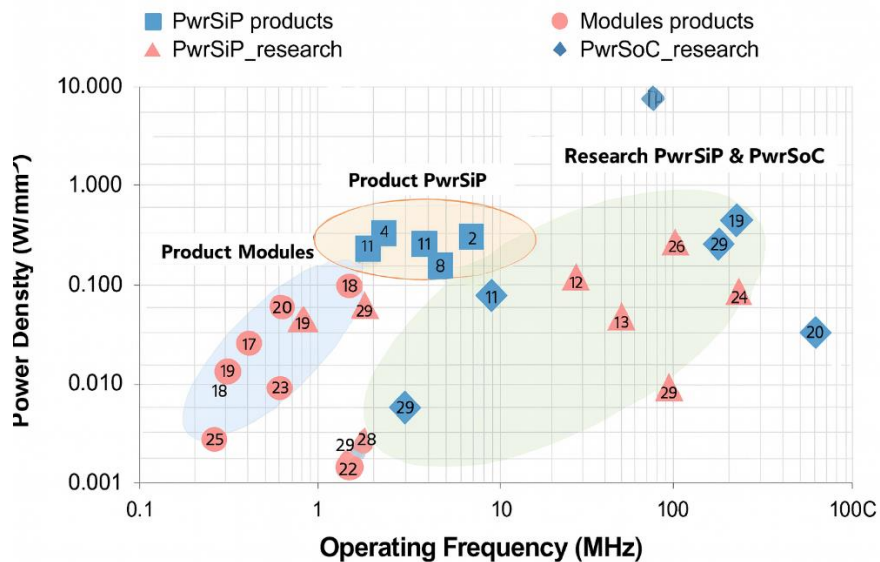


Рисунок 1.1 – Порівняння щільності потужності силових модулів, PwrSiP та PwrSoC [4]

Причиною цього є використання у промислових зразках феритових індуктивностей із товстим магнітним шаром, які забезпечують кращу накопичувальну здатність, тоді як у дослідних PwrSoC використовуються тонкоплівкові матеріали з обмеженою магнітною проникністю[4]. Проте зі збільшенням робочої частоти понад 50 МГц ситуація змінюється. Необхідна

індуктивність суттєво зменшується, і тому PwrSoC-перетворювачі починають досягати щільності потужності, порівнянної або навіть вищої за показники комерційних PwrSiP-платформ [6]. Це відкриває перспективи для переходу від гібридних до повністю інтегрованих систем живлення. Більшість експериментальних розробок у цій галузі використовують повітряні індуктивності (air-core) як у вигляді дискретних мікроіндуктивностей[4], так і у формі інтегрованих на кристалі спіральних структур . Деякі дослідження зробили подальший крок уперед, інтегрувавши конденсатор на тому ж кремнієвому чипі, де розташовано індуктивність, що сприяє зменшенню паразитних ефектів і втрат на з'єднаннях.

Для повнішого аналізу ефективності було проведено порівняння з лінійними регуляторами та DC/DC-конверторами на основі комутаційних конденсаторів (switched-capacitor, SC). Лінійні стабілізатори залишаються популярними завдяки простоті реалізації, низькому рівню шумів та стабільній роботі при невеликих навантаженнях . Проте їх енергоефективність зазвичай не перевищує 50–60 %, що обмежує їх використання у високопродуктивних або автономних мікросистемах[4]. Натомість SC-перетворювачі останнім часом привертають значну увагу завдяки своїй повній сумісності з кремнієвими технологіями. Вони не потребують індуктивностей, що робить їх придатними для повної інтеграції у мікросхему. Такі рішення забезпечують середню ефективність (60–80 %) при дуже високій щільності розміщення компонентів, проте їхнім обмеженням залишається відносно велика площа кремнію, необхідна для реалізації конденсаторних структур [4].

Навіть для малопотужних навантажень (порядку 100 мА) площа інтегрованого SC-конвертора може сягати 1 мм<sup>2</sup> [4] . Як свідчать експериментальні дані, імпульсні DC/DC-перетворювачі з індуктивною передачею енергії залишаються найефективнішими за показником ККД [4],

який перевищує 90–95 %. Вони забезпечують найкраще співвідношення між енергоефективністю, стабільністю вихідної напруги та габаритами пристрою. Тому саме такі топології вважаються найбільш перспективними для створення повністю інтегрованих мікросистем живлення нового покоління.

Імпульсні DC/DC-перетворювачі з індуктивною передачею енергії залишаються найбільш ефективними рішеннями, забезпечуючи ККД 90–95 % та оптимальне співвідношення між ефективністю [4], стабільністю та габаритами. Порівняння ефективності різних типів POL-перетворювачів наведено на рисунку 1.2.

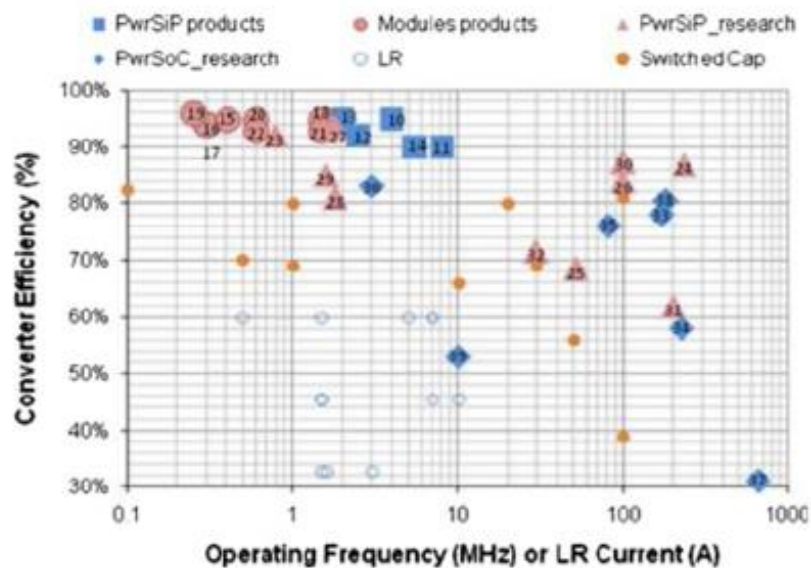


Рисунок 1.2 – Ефективність перетворювачів типу POL (Point-of-Load) з використанням комерційних корпусних модулів, інтегрованих індуктивностей та перетворювачів на комутаційних конденсаторах [4]

На рисунку 1.3 наведено частотну залежність індуктивності трьох різних індуктивностей у діапазоні 1–100 МГц. З графіка видно, що всі досліджувані

елементи демонструють зниження індуктивності зі збільшенням робочої частоти [4], що є типовою характеристикою високочастотних магнітних елементів [4].

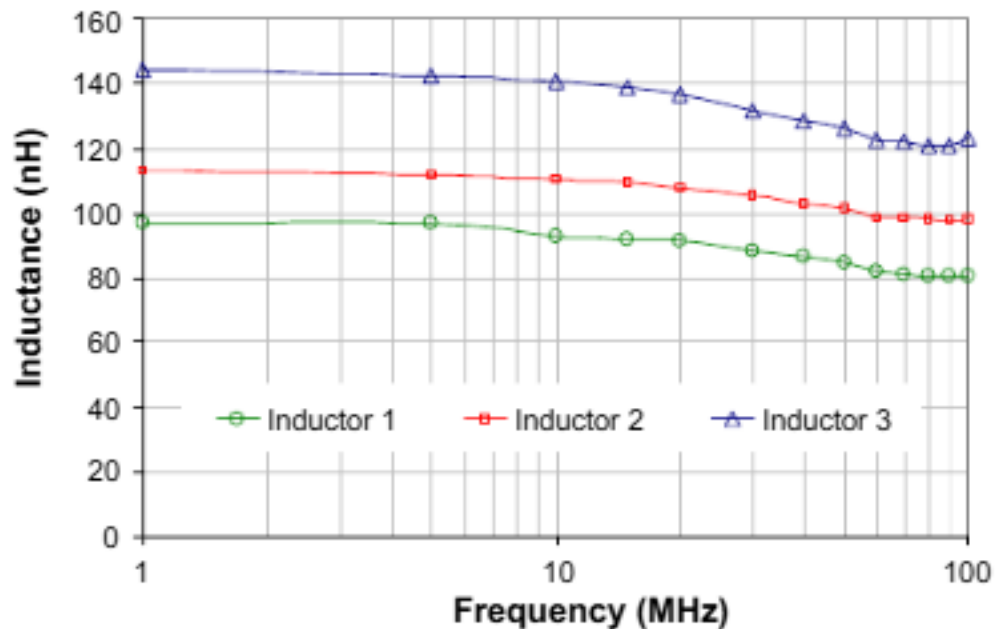


Рисунок 1.3 – Залежність індуктивності трьох типів індуктивностей від частоти в діапазоні 1–100 МГц [4]

Подальші виклики та напрями розвитку PwrSoC На сучасному етапі досліджень PowerSupplyonChip (PwrSoC) технології досягли значного прогресу, проте залишаються певні обмеження, що стримують їх комерційне впровадження. Поточна щільність струму для SC-конверторів становить близько  $0,7 \text{ A/mm}^2$  [4], що є прийнятним показником для мікросистем, але недостатнім для високопродуктивних пристроїв. Попри активний розвиток,

наразі не існує комерційних імпульсних джерел живлення (SMPS), здатних стабільно працювати на частотах понад 10 МГц.

Проте експериментальні зразки вже демонструють обнадійливі результати, досягаючи частот комутації у 100–230 МГц і вище. За даними досліджень [4], ефективність перетворення в таких системах може сягати 87 % при використанні сучасних CMOS-технологій. Водночас досягнення ефективності понад 93 %, характерної для комерційних SMPS, що працюють у діапазоні кількох мегагерц, залишається серйозним викликом для розробників. Основними завданнями, які потрібно вирішити для повноцінної реалізації концепції PowerSoC, є: подальше підвищення робочої частоти без значних втрат ефективності; мініатюризація та інтеграція пасивних елементів (індуктивностей, трансформаторів, конденсаторів) у кремнієвий шар; збереження високої енергоефективності при малих габаритах і високій щільності потужності. Одним із найбільш перспективних напрямів для досягнення цих цілей є розвиток технологій інтегрованих магнітних елементів на кремнії (magnetics-on-silicon), які дозволяють вбудовувати мікроіндуктивності та мікротрансформатори безпосередньо у структуру мікросхеми.

Саме цей підхід активно розвивається у провідних наукових центрах, зокрема в Національному інституті Тіндалла (TyndallNationalInstitute), який спеціалізується на створенні високоефективних рішень для енергоефективних мікросистем живлення. Технологія магнітних елементів на кремнії Технологія magnetics-on-silicon базується на комбінації електроосаджених тонких магнітних плівок з матеріалу пермалой (NiFe), який традиційно застосовується у виробництві зчитувальних головок жорстких дисків, та мікроструктур провідників із міді, сформованих за технологією Back-End-of-Line (BEOL). Цей підхід є сумісним із сучасними технологічними процесами силової напівпровідникової промисловості. Використовуючи різні варіації процесу

металізації, такі як Single-LayerMetal (SLM) і Double-LayerMetal (DLM), дослідникам вдається створювати планарні та багат шарові структури мікроіндуктивностей і мікротрансформаторів, що забезпечують високу щільність потужності при мінімальній площі.

В експериментах що ці пристрої мають добру відтворюваність і стабільні характеристики при інтеграції з CMOS-компонентами. Процеси виготовлення таких пристроїв передбачають послідовне формування шарів провідника, ізолятора та магнітного матеріалу з наступним їх гальванічним осадженням, що дозволяє точно контролювати товщину шарів і структуру мікроелементів. Робочі характеристики інтегрованих мікроіндуктивностей.

Експериментальні дослідження показали, що мікроіндуктивності з осердям із NiFe стабільно працюють на частотах понад 20 МГц, забезпечуючи при цьому задовільні параметри стабільності та теплового режиму [4]. Вимірювання демонструють, що пристрої з площею близько 2,5 мм<sup>2</sup> здатні пропускати струм до 600 мА без суттєвих втрат ефективності. Порівняльний аналіз із комерційними чип-індуктивностями, які працюють у схемах DC/DC-перетворювачів на частоті 8 МГц, показав, що ефективність мікроіндуктивностей, виготовлених за технологією *magnetics-on-silicon*, лише на 4–6 % нижча за традиційні керамічні рішення [4]. Зменшення ефективності пояснюється підвищеним опором мідних обмоток, сформованих методом гальванопокриття, а також вихровими втратами в магнітному шарі через його нижчий питомий опір порівняно з феритовими матеріалами. Попри це, результати демонструють високий потенціал для подальшої оптимізації структури мікроіндуктивностей і використання нових матеріалів з покращеними магнітними властивостями. Удосконалення технології *magnetics-on-silicon* є ключовим кроком до реалізації повністю інтегрованих *PowerSupplyonChip*,

здатних забезпечити високий рівень енергоефективності та мінімальні габарити майбутніх мікросистем живлення.

На рисунку 1.4 подано експериментальні характеристики інтегрованих мікроіндуктивностей, розроблених за технологією *magnetics-on-silicon*, та їх порівняння з комерційними дротяними чип-індуктивностями. Лівий графік демонструє залежність індуктивності від струму зміщення для трьох типорозмірів мікроіндуктивностей. Найбільший індуктивність площею  $2,5 \text{ мм}^2$  (0805) забезпечує максимальне значення індуктивності та зберігає стабільність при збільшенні струму. Менші за площею структури  $-1,3 \text{ мм}^2$  (0603) та  $0,5 \text{ мм}^2$  (0402)-показують нижчі значення індуктивності і швидше входять у режим насичення, що є характерним обмеженням мініатюрних магнітних елементів.

Правий графік ілюструє порівняння ефективності понижувального перетворювача з використанням інтегрованих індуктивностей і стандартних комерційних чип-індуктивностей. Інтегровані рішення, розроблені в TyndallNationalInstitute, демонструють ефективність на рівні  $\approx 90 \%$ , що лише на 4–6 % нижче за традиційні індуктивності при значно менших габаритах. Такий результат підтверджує високий потенціал технології *magnetics-on-silicon* у створенні компактних та енергоефективних мікросистем живлення нового покоління.

Для оцінки ефективності технології *magnetics-on-silicon* проведено експериментальні дослідження мікроіндуктивностей і мікротрансформаторів, виготовлених за структурами SLM (Single-LayerMetal) та DLM (Double-LayerMetal) [4]. Отримані дані демонструють високу узгодженість із теоретичними розрахунками та підтверджують придатність технології до практичної інтеграції у кремнієві джерела живлення.

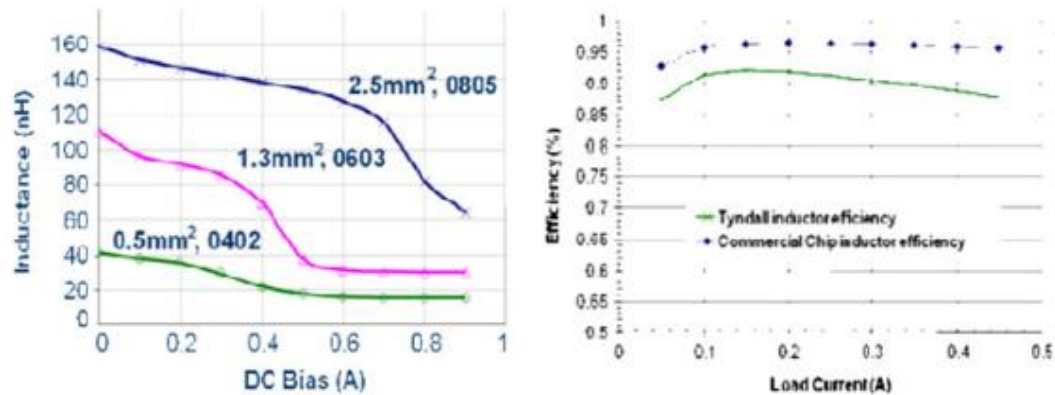


Рисунок 1.4 – Мікроіндуктивності: залежність індуктивності від струму зміщення та порівняння ефективності з комерційним чип-індуктивністю [4]

На рисунку наведено залежності вимірної індуктивності розімкненого кола ( $L_{oc}$ ) та опору розімкненого кола ( $R_{oc}$ ) від частоти для обох типів мікротрансформаторів. Для структури SLM, яка має одношарову металізацію, індуктивність становить близько 85 нГн при частоті 20 МГц.

Для DLM-структури, що використовує двошарову металізацію, індуктивність досягає 210 нГн за тих самих умов. В обох випадках індуктивність зберігає стабільність до частот понад 20 МГц, а зниження її значення не перевищує 15 %, що свідчить про добру частотну стійкість елементів. Незначне падіння індуктивності, зафіксоване в експериментах, пов'язане з паразитними ефектами та впливом шкіряного ефекту при високих частотах. Постійний опір (DC resistance) первинної та вторинної обмоток визначався методом чотирьохточкового зондування (Kelvin 4-probe method), який забезпечує високу точність вимірювань малих опорів. Для SLM-пристрою опір становив 0,367  $\Omega$  як для первинної, так і для вторинної обмоток.

У DLM-пристроях, де використано два провідні шари, виміряно  $1,096 \Omega$  для первинної обмотки та  $0,962 \Omega$  для вторинної. Отримані експериментальні результати добре узгоджуються з теоретичними розрахунками електричних параметрів і демонструють стабільність частотної характеристики у високочастотному діапазоні. Це свідчить про високий потенціал технології DLM для створення ефективних інтегрованих мікротрансформаторів, придатних для використання у PwrSoC-системах.

Рисунок 1.5 демонструє частотні залежності індуктивності ( $L_{oc}$ ) та опору ( $R_{oc}$ ) мікротрансформаторів, виготовлених за технологіями SLM та DLM. DLM-структури забезпечують вищу індуктивність (до 210 нГн) порівняно з SLM (близько 85 нГн), тоді як зростання опору на високих частотах спричинене шкіряним ефектом. Представлені результати підтверджують переваги DLM-технології для інтегрованих високочастотних PwrSoC-рішень.

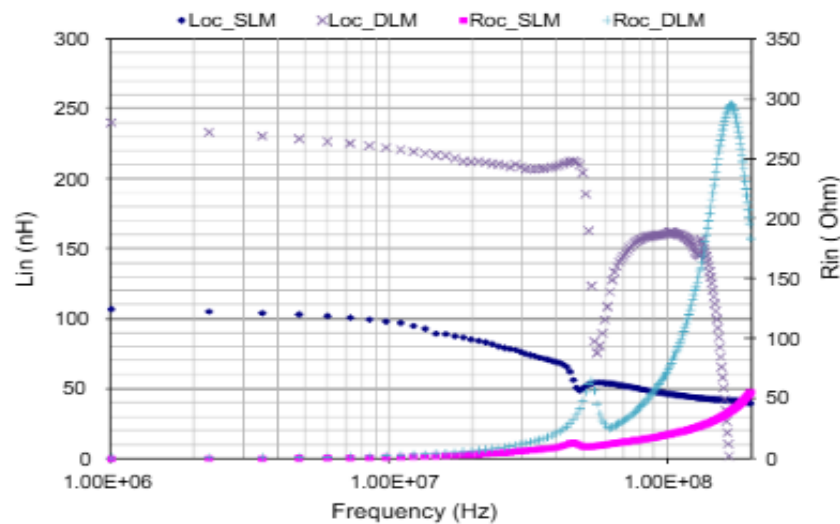


Рисунок 1.5 – Частотні характеристики  $L_{oc}$  та  $R_{oc}$  для SLM і DLM мікротрансформаторів [4]

Рисунок 1.6 демонструє виміряні частотні характеристики коефіцієнта підсилення напруги для мікротрансформаторів типів SLM та DLM при навантаженні  $50 \Omega$ . Отримані результати свідчать, що обидві структури забезпечують високий рівень передавання сигналу у діапазоні 10–30 МГц, досягаючи коефіцієнта підсилення близько  $-1$  дБ.

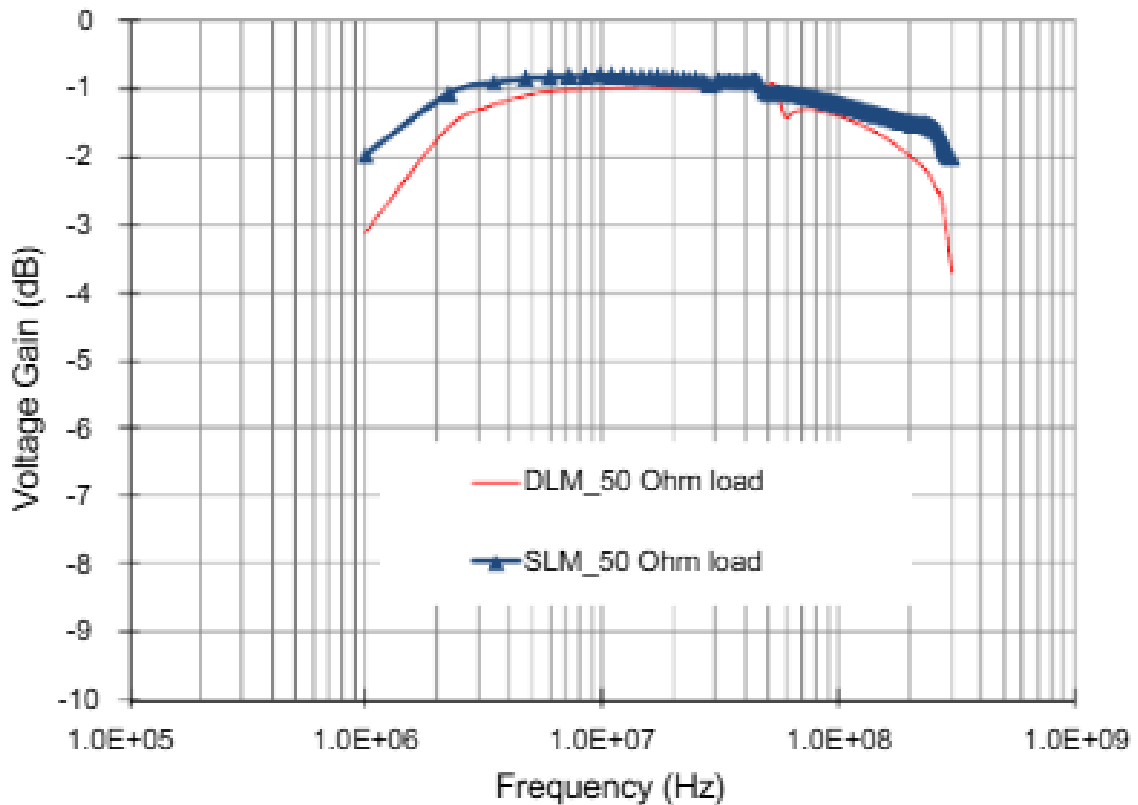


Рисунок 1.6 – Частотні характеристики коефіцієнта підсилення мікротрансформаторів SLM і DLM при навантаженні  $50 \Omega$  [4]

Це є одним із найкращих зафіксованих значень серед відомих мікротрансформаторів, реалізованих на кремнієвих підкладках. Зниження

коефіцієнта підсилення на низьких частотах пояснюється обмеженою намагнічувальною індуктивністю, яка зменшує ефективність енергопередачі між первинною та вторинною обмотками. У свою чергу, спад підсилення у високочастотному діапазоні зумовлений збільшенням втрат на вихрові струми в магнітному осерді, що є типовим для тонкоплівкових NiFe-матеріалів через їхню відносно низьку питомий опір.

Попри це, отримані параметри підтверджують ефективність підходу *magnetics-on-silicon* у реалізації високочастотних мікротрансформаторів. Високий коефіцієнт підсилення, стабільна робота у широкому діапазоні частот та низькі втрати свідчать про можливість використання таких елементів у складі інтегрованих DC/DC-конверторів для PwrSoC-систем нового покоління, де важливими є мініатюрність, енергоефективність та стабільність передавання енергії.

Отримані експериментальні результати свідчать, що мікротрансформатори, виготовлені за технологією *Double-LayerMetal (DLM)*, демонструють вищу ефективність, ніж одношарові структури *SLM* при однаковій площі компонента. Для *DLM*-топології прогнозується досягнення ефективності понад 70 % при площі всього 2 мм<sup>2</sup>, що є надзвичайно високим показником для інтегрованих рішень цього класу. Технологія *magnetics-on-silicon* відкриває широкий спектр можливостей для використання у сучасних мікроелектронних системах живлення, зокрема у таких напрямках.

Мікроіндуктивності для неізолюваних DC-DC перетворювачів та драйверів затворів. Такі елементи є ключовими у побудові *PowerManagementIntegratedCircuits (PMICs)* -багатоканальних мікросхем керування живленням, що широко використовуються у смартфонах, планшетах і портативній електроніці. Наразі більшість *PMIC* залежать від зовнішніх дискретних індуктивностей та конденсаторів, які збільшують габарити

пристрою та обмежують рівень інтеграції. Використання магнітних компонентів на кремнії дозволяє реалізувати повноцінний DC-DC перетворювач у межах одного кристала, який за площею може бути порівняний із лінійним стабілізатором, але має набагато вищу ефективність.

Мікротрансформатори для ізолюваних перетворювачів і драйверів затворів. Ізолювані системи живлення відіграють важливу роль у промислових, медичних та сенсорних застосуваннях, де необхідне передавання енергії через ізоляційний бар'єр. Сучасні рішення здебільшого базуються на інтегрованих мікротрансформаторах із повітряним осердям, які мають низьку ефективність [4].

Застосування NiFe-магнітного шару у технології *magnetics-on-silicon* дозволяє суттєво підвищити щільність потужності та зменшити втрати при передачі енергії. Робота з високочастотними напівпровідниковими матеріалами. Оскільки запропонована технологія оптимізована для роботи на частотах понад 20 МГц, вона добре поєднується з сучасними силовими напівпровідниками на основі GaN (нітрид галію), які характеризуються високим коефіцієнтом корисної дії, малою затримкою перемикачання та можливістю роботи на надвисоких частотах. Це відкриває перспективи для створення компактних, високоефективних джерел живлення нового покоління. Інтеграція в системи класу SoC.

Для складних платформ *System-on-Chip* (SoC) таких як вбудовані мікроконтролери, багатоядерні процесори або системи керування сенсорними мережами технологія магнітних елементів на кремнії забезпечує гранульоване керування енергоспоживанням безпосередньо на рівні кристала. Це дозволяє створювати автономні енергоефективні мікросистеми живлення, які мінімізують втрати енергії та забезпечують стабільну роботу навіть при значних коливаннях навантаження [4].

Таким чином, технологія *magnetics-on-silicon* є одним із ключових напрямів розвитку енергоефективних мікросистем живлення майбутнього. Її впровадження забезпечить зменшення габаритів, підвищення ефективності, інтеграцію з високочастотними напівпровідниками та можливість створення повністю інтегрованих *PowerSupplyonChip* (*PwrSoC*) систем, що визначатимуть наступний етап еволюції електронних пристроїв.

## 1.2 Сучасна елементна база імпульсних джерел живлення

Розвиток сучасної елементної бази імпульсних джерел живлення (*SMPS* *SwitchedModePowerSupply*) [4] є ключовим чинником підвищення ефективності та зменшення розмірів систем енергопостачання. Елементна база визначає рівень втрат енергії, робочу частоту, стабільність параметрів і здатність пристрою функціонувати в складних умовах експлуатації. Основними напрямками вдосконалення є використання нових напівпровідникових матеріалів, підвищення рівня інтеграції компонентів, а також застосування високоефективних керувальних мікросхем.

Традиційно в імпульсних перетворювачах використовувалися силові транзистори на основі кремнію (*Si*). Однак зі зростанням робочої частоти та вимог до щільності потужності кремнієві прилади почали поступатися місцем напівпровідниковим компонентам на основі широкозонних матеріалів - нітриду галію (*GaN*) та карбіду кремнію (*SiC*). Транзистори *GaN* мають меншу паразитну ємність і опір у відкритому стані (*R<sub>ds(on)</sub>*), що дозволяє зменшити комутаційні втрати та працювати на частотах у десятки мегагерц. Це, своєю

чергою, веде до суттєвого зменшення індуктивностей і конденсаторів у схемі, а отже до мініатюризації систем живлення [5].

SiC-компоненти, у свою чергу, відзначаються високою температурною стабільністю та здатністю працювати при підвищених напругах (до 1200 В і більше)[5]. Їх використання особливо актуальне для систем, що потребують високої потужності або функціонують у складних температурних умовах, наприклад у промисловій автоматизації, автомобільній електроніці чи системах відновлюваної енергетики.

Окрім силових транзисторів, важливе значення мають інтегральні контролери імпульсних джерел живлення. Сучасні мікросхеми керування поєднують у собі функції стабілізації напруги, захисту від перевантажень, плавного запуску, компенсації перешкод і синхронізації комутаційних елементів. Завдяки цьому забезпечується високий рівень надійності, зменшення кількості дискретних компонентів і підвищення енергоефективності. Особливої уваги заслуговують мікросхеми з цифровим керуванням (DigitalPowerControllers) [5], які дозволяють динамічно змінювати режим роботи перетворювача залежно від навантаження, тим самим мінімізуючи втрати енергії при малих струмах споживання.

Окремий напрям розвитку інтегровані модулі живлення (PowerModuleSystems), у яких силові елементи, драйвери, контролери та пасивні компоненти розміщуються в одному корпусі або на спільному підкладці. Це дозволяє суттєво скоротити втрати на з'єднаннях, покращити тепловідведення та зменшити електромагнітні перешкоди. Такі рішення особливо ефективні для мікросистем і IoT-пристроїв, де обмежений простір на платі.

Не менш важливими залишаються пасивні елементи індуктивності, дроселі та конденсатори. Сучасні технології дозволяють виготовляти мікроіндуктивності та тонкоплівкові конденсатори з високою питомою ємністю,

низьким ESR (еквівалентним послідовним опором) і стабільними параметрами при підвищених температурах. Використання феритових матеріалів нового покоління та нано структурованих діелектриків забезпечує подальше зниження втрат і покращення частотних характеристик[4,5].

Таким чином, сучасна елементна база імпульсних джерел живлення розвивається у напрямку високої інтеграції, застосування широкозонних напівпровідників і мініатюрних пасивних компонентів. Це створює умови для реалізації енергоефективних мікросистем живлення, здатних забезпечити стабільну роботу навіть у компактних пристроях з обмеженим енергобюджетом. Крім наведених технологічних рішень, значний вплив на розвиток імпульсних джерел живлення мають сучасні інновації у сфері мікроелектроніки та матеріалознавства[4,5].

Одним із найбільш перспективних напрямів є використання наноструктурованих матеріалів і тонкоплівкових технологій, що дозволяють створювати компоненти з покращеними електричними та тепловими властивостями. Зокрема, застосування наноферитових матеріалів у дроселях і трансформаторах забезпечує стабільність індуктивності при високих частотах і зменшує втрати на вихрові струми. Це відкриває можливість підвищення робочих частот перетворювачів до десятків мегагерц без істотного зниження ефективності.

Важливу роль у підвищенні енергоефективності відіграють також технології оптимізації тепловідведення. У сучасних рішеннях використовуються теплопровідні підкладки, наприклад алюміній-нітридні (AlN) або кремнієво-карбідні (SiC) основи, які значно покращують розсіювання тепла від силових елементів. Це дозволяє збільшити щільність потужності пристроїв, зберігаючи стабільні температурні характеристики навіть при високих навантаженнях [4,5]. Суттєвою тенденцією є також розвиток інтегрованих

рішень типу PwrSiP та PwrSoC, які забезпечують максимальну компактність і мінімальні втрати при передачі енергії.

У таких системах індуктивні та ємнісні елементи можуть бути реалізовані безпосередньо на кристалі або в складі багатошарової підкладки. Це не лише зменшує габарити, але й скорочує довжину з'єднань, що позитивно впливає на електромагнітну сумісність і загальну стабільність системи. Особливої уваги заслуговують технології керування на основі штучного інтелекту. Сучасні мікросхеми керування можуть виконувати адаптивне регулювання параметрів, використовуючи методи машинного навчання для прогнозування змін навантаження.

Це дозволяє зменшити втрати енергії у динамічних режимах та забезпечити високу стабільність вихідної напруги навіть у складних умовах роботи. Важливою тенденцією є також інтеграція систем моніторингу та діагностики, що дозволяють у реальному часі контролювати температуру, напругу, струм і стан компонентів [5]. Такі функції значно підвищують надійність і довговічність пристроїв, а також дають змогу запобігти аварійним ситуаціям. У результаті розвитку цих технологій імпульсні джерела живлення стають більш компактними, ефективними та інтелектуальними.

Вони поєднують у собі високі показники енергетичної ефективності, здатність працювати при високих частотах, стабільність у широкому діапазоні температур і можливість інтеграції з мікроелектронними системами нового покоління. Усе це робить сучасну елементну базу одним із ключових напрямів розвитку енергетичної електроніки та забезпечує основу для створення високопродуктивних мікросистем живлення майбутнього. Подальший розвиток імпульсних джерел живлення тісно пов'язаний із впровадженням технологій цифрового моделювання та оптимізації топології схем [5].

Використання сучасних програмних засобів, таких як LTspice, PSpice та Simulink, дозволяє ще на етапі проектування визначити оптимальні параметри компонентів, мінімізувати комутаційні втрати й покращити стабільність системи. Такі методи суттєво скорочують час розробки та підвищують точність моделювання електромагнітних і теплових процесів. Важливим напрямом є також інтеграція енергозберігаючих алгоритмів керування [5]. Сучасні джерела живлення все частіше використовують адаптивні системи керування енергоспоживанням, які забезпечують автоматичний перехід у режим низького споживання при малих навантаженнях. Це особливо актуально для портативних пристроїв, бездротових сенсорних мереж та IoT-систем, де мінімізація енергоспоживання є визначальним чинником ефективності [5].

Крім того, зростає роль екологічних стандартів у розробці нових джерел живлення. У сучасних рішеннях враховуються вимоги до утилізації матеріалів, зменшення викидів CO<sub>2</sub> і підвищення ефективності перетворення енергії. Це призвело до появи концепції GreenPowerElectronics, де оптимізація споживання енергії та зменшення теплових втрат розглядаються як ключові критерії якості електронних систем. Останнім часом активного розвитку набувають і технології тривимірної інтеграції компонентів (3D Packaging), які дозволяють розміщувати силові транзистори, контролери та пасивні елементи в компактних багатосарових структурах.

Таке компонування мінімізує паразитні індуктивності, покращує тепловідведення та дозволяє значно підвищити щільність потужності. Перспективним напрямом є застосування гібридних матеріалів, що поєднують електропровідні та діелектричні властивості, а також матеріалів із керованими параметрами так званих smartmaterials. Вони здатні змінювати свої характеристики залежно від температури або електричного поля, забезпечуючи адаптивну роботу системи та додатковий рівень стабілізації параметрів. Не

менш важливим аспектом є розвиток систем самодіагностики та прогнозування відмов. Вбудовані датчики температури, струму та напруги дозволяють створювати інтелектуальні джерела живлення, які не лише контролюють власний стан, а й передають дані до мережі для аналізу.

Завдяки цьому впроваджуються технології предиктивного обслуговування (PredictiveMaintenance), що суттєво підвищують надійність роботи обладнання. У перспективі очікується поява повністю інтегрованих енергетичних модулів із можливістю бездротового енергопостачання та взаємодії між компонентами через цифрові інтерфейси. Такі системи відкривають нові можливості для побудови автономних пристроїв, розумних сенсорних мереж і мікроенергетичних комплексів майбутнього.

### 1.3 Технології температурного менеджменту

Розвиток сучасної елементної бази імпульсних джерел живлення (SMPS) є ключовим чинником підвищення ефективності та зменшення розмірів систем енергопостачання. Елементна база визначає рівень втрат енергії, робочу частоту, стабільність параметрів і здатність пристрою функціонувати в складних умовах експлуатації. Основними напрямками вдосконалення є використання нових напівпровідникових матеріалів, підвищення рівня інтеграції компонентів, а також застосування високоефективних керувальних мікросхем [5].

Традиційно в імпульсних перетворювачах використовувалися силові транзистори на основі кремнію (Si). Однак зі зростанням робочої частоти та вимог до щільності потужності кремнієві прилади почали поступатися місцем

напівпровідниковим компонентам на основі широкозонних матеріалів — нітриду галію (GaN) та карбіду кремнію (SiC) [5]. Транзистори GaN мають меншу паразитну ємність і опір у відкритому стані ( $R_{ds(on)}$ ), що дозволяє зменшити комутаційні втрати та працювати на частотах у десятки мегагерц. Це, своєю чергою, веде до суттєвого зменшення індуктивностей і конденсаторів у схемі, а отже до мініатюризації систем живлення [6].

SiC-компоненти, у свою чергу, відзначаються високою температурною стабільністю та здатністю працювати при підвищених напругах (до 1200 В і більше). Їх використання особливо актуальне для систем, що потребують високої потужності або функціонують у складних температурних умовах, наприклад у промисловій автоматизації, автомобільній електроніці чи системах відновлюваної енергетики [6].

Окрім силових транзисторів, важливе значення мають інтегральні контролери імпульсних джерел живлення. Сучасні мікросхеми керування поєднують у собі функції стабілізації напруги, захисту від перевантажень, плавного запуску, компенсації перешкод і синхронізації комутаційних елементів. Завдяки цьому забезпечується високий рівень надійності, зменшення кількості дискретних компонентів і підвищення енергоефективності. Особливої уваги заслуговують мікросхеми з цифровим керуванням (DigitalPowerControllers), які дозволяють динамічно змінювати режим роботи перетворювача залежно від навантаження, тим самим мінімізуючи втрати енергії при малих струмах споживання [5].

Окремий напрям розвитку інтегровані модулі живлення (PowerModuleSystems), у яких силові елементи, драйвери, контролери та пасивні компоненти розміщуються в одному корпусі або на спільному підкладці. Це дозволяє суттєво скоротити втрати на з'єднаннях, покращити тепловідведення

та зменшити електромагнітні перешкоди. Такі рішення особливо ефективні для мікросистем і IoT-пристроїв, де обмежений простір на платі [5].

Не менш важливими залишаються пасивні елементи індуктивності, дроселі та конденсатори. Сучасні технології дозволяють виготовляти мікроіндуктивності та тонкоплівкові конденсатори з високою питомою ємністю, низьким ESR (еквівалентним послідовним опором) і стабільними параметрами при підвищених температурах. Використання феритових матеріалів нового покоління та наноструктурованих діелектриків забезпечує подальше зниження втрат і покращення частотних характеристик [6].

Таким чином, сучасна елементна база імпульсних джерел живлення розвивається у напрямку високої інтеграції, застосування широкозонних напівпровідників і мініатюрних пасивних компонентів. Це створює умови для реалізації енергоефективних мікросистем живлення, здатних забезпечити стабільну роботу навіть у компактних пристроях з обмеженим енергобюджетом. Крім того, останні досягнення у сфері мікроелектроніки сприяли появі нових технологій виготовлення силових елементів і пасивних компонентів, що забезпечують ще більшу ефективність та мініатюризацію. Особливу увагу приділяють наноструктурованим матеріалам, які мають покращені електричні, теплові та магнітні властивості [6].

Наприклад, використання наноферитів у магнітних елементах дозволяє працювати на частотах понад 50 МГц без значних втрат енергії, що відкриває шлях до створення ультракомпактних джерел живлення з високою щільністю потужності. Важливою тенденцією розвитку елементної бази є вдосконалення технологій тепловідведення. Для цього використовуються матеріали з підвищеною теплопровідністю – алюміній-нітридні або кремнієво-карбідні підкладки, що забезпечують стабільність роботи пристрою навіть при високих температурах і значних навантаженнях .

Ефективне розсіювання тепла дозволяє збільшувати робочу щільність потужності та підвищувати загальний коефіцієнт корисної дії. Окрему роль у сучасних системах живлення відіграють інтелектуальні контролери з підтримкою цифрового керування та алгоритмів оптимізації. Такі системи здатні самостійно адаптувати параметри роботи перетворювача до зміни навантаження або умов навколишнього середовища. Впровадження технологій машинного навчання у процес керування дозволяє підвищити точність стабілізації напруги та знизити енергоспоживання у режимах малої потужності.

Значного поширення набувають також інтегровані рішення на базі технологій PowerSystem-in-Package (PwrSiP) та PowerSystem-on-Chip (PwrSoC). У таких модулях усі активні та пасивні компоненти поєднуються в єдиному корпусі або навіть на одному кристалі. Це забезпечує мінімальні електромагнітні втрати, покращену теплову стабільність і надзвичайно компактні розміри, що особливо важливо для сучасних мобільних пристроїв, систем інтернету речей (IoT) та мікропроцесорних модулів. Важливим напрямом подальшого розвитку є інтеграція функцій моніторингу, захисту та діагностики в самі мікросхеми живлення.

Такі рішення дозволяють у реальному часі відстежувати температуру, струм, напругу та інші параметри системи, своєчасно реагуючи на відхилення. Це підвищує надійність пристроїв і подовжує термін їх експлуатації. Таким чином, сучасна елементна база імпульсних джерел живлення розвивається у напрямку використання наноматеріалів, впровадження високотеплопровідних підкладок, підвищення рівня інтеграції та інтелектуалізації керування. Це дозволяє створювати компактні, ефективні та надійні системи живлення нового покоління, здатні забезпечувати стабільну роботу навіть у високонавантажених і динамічних умовах експлуатації [6].

Однак ефективність роботи імпульсних джерел живлення визначається не лише вдосконаленням елементної бази чи рівнем інтеграції, але й якістю температурного менеджменту, що безпосередньо впливає на стабільність параметрів і довговічність пристроїв. Зростання щільності потужності вимагає все більш ефективних методів відведення тепла, адже навіть незначне підвищення температури здатне суттєво скоротити термін служби компонентів та знизити загальний коефіцієнт корисної дії системи.

Температурний менеджмент елементної бази імпульсних джерел живлення охоплює комплекс технічних рішень, спрямованих на забезпечення оптимальних теплових режимів під час роботи силових елементів транзисторів, діодів, дроселів, конденсаторів та мікросхем керування. Основними джерелами тепловиділення є комутаційні втрати у транзисторах, втрати на провідність у діодах, а також втрати в магнітних матеріалах і елементах керування. Для мінімізації перегріву використовуються як пасивні, так і активні методи охолодження.

До пасивних методів належать радіатори, теплопровідні підкладки, термопрокладки, а також раціональна компоновка друкованих плат, що забезпечує ефективне природне відведення тепла. Значну роль відіграють матеріали з високою теплопровідністю алюміній, мідь, алюміній-нітрид, які дають змогу стабілізувати температурні поля компонентів навіть у компактних пристроях. Активні методи включають використання вентиляторів або систем рідинного охолодження, які автоматично регулюють інтенсивність відведення тепла залежно від навантаження.

Такі рішення застосовуються у потужних перетворювачах або промислових системах, де теплові потоки перевищують можливості природної конвекції. У сучасних блоках живлення все ширше впроваджуються системи температурного моніторингу та захисту від перегріву. Вони здійснюють

контроль за станом силових елементів у реальному часі, а при перевищенні критичних меж знижують навантаження або вимикають пристрій. Деякі цифрові контролери мають адаптивні алгоритми керування, які змінюють частоту комутації або режим роботи перетворювача залежно від температури, що підвищує надійність і довговічність системи.

Особливу увагу привертають сучасні випарювальні камери та теплові труби, які застосовуються у високощільних джерелах живлення, телекомунікаційних модулях і мобільних пристроях. Такі системи забезпечують рівномірний розподіл тепла завдяки фазовому переходу робочої рідини, що дає змогу підтримувати стабільну температуру навіть при значних теплових навантаженнях [6]. Крім того, вдосконалюються матеріали для теплопровідних підкладок, зокрема, алюміній-нітрид і кремній-карбід, які поєднують високу електричну ізоляцію з чудовою теплопровідністю. Це дозволяє збільшувати робочу щільність потужності та зменшувати ризик локального перегріву.

Загалом, впровадження ефективних систем теплового менеджменту стає невід'ємною частиною розвитку сучасних імпульсних джерел живлення. Завдяки поєднанню оптимізованої конструкції, новітніх матеріалів і інтелектуальних алгоритмів контролю вдається досягати високої стабільності, надійності та тривалого ресурсу роботи навіть у найкомпактніших енергосистемах.

#### 1.4 Постановка задачі дослідження

Для прийняття оптимальних рішень на етапі вибору концептуальної моделі сучасних джерел живлення необхідно дослідити основні тенденції їх розвитку, зокрема в контексті застосування як модулів для кібер-фізичних систем у концепції Індустрії 4.0 та пов'язаній з нею концепції Energy 4.0.

Для виконання структурного синтезу доцільно визначити вимоги до таких джерел живлення з точки зору мініатюрності, універсальності та енергоефективності. Зокрема, джерела живлення мають забезпечувати стабільне енергопостачання смарт-сенсорів та інших підсистем, що працюють від джерел постійного струму. На цьому етапі необхідно обґрунтувати вибір структурних і функціональних схем джерел живлення, які відповідають сформульованим вимогам.

Для виконання параметричного синтезу необхідно розглянути конкретний приклад джерела живлення в ланці DC–DC. Це потребує розв'язання низки прикладних задач шляхом комп'ютерного моделювання, що, у свою чергу, вимагає розробки математичної моделі перетворювача обраного типу з урахуванням використаного програмного забезпечення для симуляції [6].

Наступні два розділи роботи присвячені розв'язанню зазначених завдань.

## 2 СИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ ЕЛЕМЕНТІВ КІБЕР-ФІЗИЧНИХ СИСТЕМ

### 2.1 Кібер-фізичні системи

Кібер-фізичні системи (КФС) сьогодні є одним із ключових елементів цифрової трансформації та становлять фундамент сучасних технологічних комплексів, включно з Інтернетом речей, інтелектуальними енергосистемами, автономним транспортом, роботизованими виробництвами та високоточною автоматизацією. У науково-технічній літературі кібер-фізичні системи визначаються як інтегровані комплекси, у яких фізичні процеси та компоненти нерозривно пов'язані з комп'ютерними алгоритмами керування, сенсорною інфраструктурою та мережевими комунікаціями. Фактично це системи, де фізичний світ і цифрове середовище з'єднані в єдину архітектуру, здатну працювати в реальному часі, виконувати складний аналіз і забезпечувати автономне прийняття рішень [7].

На відміну від класичних автоматизованих систем, які базуються на жорстко визначених алгоритмах, кібер-фізичні системи мають значно вищий рівень інтелектуальності та гнучкості. Вони здатні аналізувати значні масиви даних, отриманих від численних сенсорів, будувати математичні моделі навколишнього середовища, прогнозувати майбутні стани технологічного процесу та адаптувати параметри роботи залежно від поточної ситуації. Така адаптивність є можливою завдяки комплексному використанню обчислювальних технологій, систем реального часу, цифрових близнюків, алгоритмів машинного навчання та моделей предиктивної аналітики.

В основі будь-якої кібер-фізичної системи лежить фізична підсистема, що може містити механічні, електронні, енергетичні та сенсорні компоненти. Саме

фізична частина забезпечує збирання інформації про стан об'єкта або процесу та здійснює безпосередній вплив на середовище через виконавчі механізми. Дані, отримані від датчиків температури, тиску, струму, напруги, положення чи швидкості, передаються у систему керування, де проходять первинну обробку та фільтрацію. Залежно від складності процесів у цій ролі можуть виступати мікроконтролери, сигнальні процесори, програмовані логічні інтегральні схеми або спеціалізовані контролери реального часу [7].

Ключовим компонентом кібер-фізичних систем є їх кібернетична складова, яка забезпечує високорівневий аналіз, координацію та логіку роботи. Саме тут розміщуються алгоритми оптимізації, штучного інтелекту, навчання моделей, розпізнавання образів та обчислення для цифрових двійників. Кібернетичний рівень часто інтегрується з хмарними інфраструктурами або розподіленими обчислювальними платформами, що дає можливість швидко обробляти великі потоки даних і забезпечувати масштабованість системи. Водночас все більшу роль відіграють периферійні обчислення, коли частина інтелектуальних функцій виконується безпосередньо на локальних пристроях для зменшення затримок і підвищення надійності процесів.

Невід'ємним елементом КФС є комунікаційна інфраструктура, яка забезпечує обмін інформацією між фізичними пристроями, контролерами та хмарними сервісами. Завдяки використанню сучасних дротових та бездротових протоколів передавання даних, системи можуть здійснювати синхронізовану роботу в реальному часі, обмінюючись даними та керуючими командами з мінімальними затримками. Залежно від масштабу та призначення системи, комунікації можуть базуватися на промислових протоколах, таких як CAN або EtherCAT, або на сучасних IoT-технологіях, включаючи LoRaWAN, NB-IoT, Wi-Fi 6 чи 5G.

Кібер-фізичні системи характеризуються низкою властивостей, що відрізняють їх від традиційних автоматизованих комплексів. Найважливішою з них є здатність до роботи в реальному часі та інтерактивності, адже такі системи повинні миттєво реагувати на зміну зовнішнього середовища, що особливо актуально для транспортних систем, виробництв з високим рівнем динамічності та енергетичних об'єктів [7]. Іншою критичною властивістю є інтелектуальність, яка проявляється у здатності системи самостійно оптимізувати свої параметри, прогнозувати несправності та проводити самодіагностику. Наприклад, у складних виробничих лініях КФС можуть автоматично визначати відхилення технологічного процесу та вживати коригуючих заходів, зберігаючи якість і безперервність роботи.

Важливою характеристикою кібер-фізичних систем є їх самоадаптивність. Вони можуть перебудовувати алгоритми функціонування залежно від змін навантаження, зовнішніх умов або параметрів середовища. Наприклад, у енергетичних комплексах такі системи можуть перерозподіляти потужність між вузлами, зменшувати втрати та змінювати режими роботи для уникнення аварій. Це дозволяє забезпечити високу надійність, стійкість до відмов і довговічність обладнання. Для систем життєво важливої інфраструктури самоадаптація стає ключовою перевагою.

Застосування кібер-фізичних систем охоплює широкий спектр галузей. У енергетиці вони формують основу концепції “розумних мереж”, які здатні автоматично регулювати навантаження, прогнозувати споживання та оптимізувати генерацію. В автомобільній сфері КФС забезпечують автономність транспортних засобів, їх навігацію, координацію руху та аналіз навколишнього середовища. У промисловості такі системи дозволяють створювати інтегровані виробничі комплекси, де всі елементи від сенсорів до роботів працюють у синхронізованому цифровому середовищі. У медицині

кібер-фізичні системи застосовуються у високоточній діагностиці, роботизованій хірургії та телемедицині технологіях. Розумні будівлі, міські системи керування, охоронні комплекси, агротехнології це лише частина сфер, де КФС відіграють важливу [8].

Особливе значення кібер-фізичні системи мають у розвитку сучасних систем живлення. Сьогодні джерела живлення перестають бути суто силовими елементами і перетворюються на інтелектуальні пристрої, здатні комунікувати з іншими блоками, адаптувати режими роботи та здійснювати самодіагностику. Використання цифрових контролерів, сенсорів струму, напруги та температури, а також модулів зв'язку дозволяє створювати джерела живлення, що працюють як частина розподіленої кібер-фізичної інфраструктури. Завдяки цьому вони можуть оптимізувати власний ККД, прогнозувати теплові режими, реагувати на аварійні ситуації та забезпечувати стабільність роботи всієї системи.

У контексті розвитку DC-DC перетворювачів кібер-фізичні системи відкривають нові можливості для створення адаптивних силових модулів, здатних змінювати частоту комутації, керувати фазами перетворення, відстежувати параметри в реальному часі та динамічно перебудовувати роботу для досягнення максимальної ефективності. В умовах зростання вимог до компактності, надійності та ефективності джерел живлення, роль КФС у їхньому розвитку стає визначальною, оскільки саме кібернетична складова дозволяє реалізувати функції гнучкого керування, термічного контролю та інтегрованого моніторингу [8].

Таким чином, кібер-фізичні системи являють собою фундаментальну технологічну платформу, що забезпечує новий рівень інтеграції фізичних пристроїв з цифровими алгоритмами. Їх розвиток визначає вектор еволюції сучасних технічних систем, включаючи системи живлення, які завдяки впровадженню інтелектуальних функцій перетворюються на складні адаптивні

модулі, здатні працювати як частина глобального цифрового середовища. КФС формують основу для побудови високоефективних, стійких та інтелектуальних технічних комплексів майбутнього, де кожний фізичний компонент має цифрового “партнера”, що забезпечує оптимальну роботу, безпеку та інтегрованість у широку мережеву інфраструктуру.

Сучасні тенденції розвитку кібер-фізичних систем значною мірою формуються під впливом глобальної цифровізації та потреби в підвищенні ефективності промислових і енергетичних процесів. Одним з ключових драйверів розвитку є зростання обчислювальних можливостей периферійних пристроїв, які дають змогу переносити частину інтелектуальних функцій із хмари безпосередньо на локальні модулі [8]. Це скорочує затримки, підвищує стійкість системи до збоїв мережі та дозволяє обробляти критично важливі дані безпосередньо на місці їх виникнення. Поява доступних високопродуктивних мікроконтролерів, модулів із апаратними прискорювачами ШІ та інтегрованими засобами безпеки сприяє тому, що навіть компактні пристрої отримують можливість виконувати складні алгоритми у реальному часі.

Ще одним важливим аспектом розвитку кібер-фізичних систем є використання технології цифрових двійників. Цифровий двійник це програмна модель фізичного об’єкта або процесу, яка працює паралельно з реальним пристроєм, відтворюючи його поведінку на основі даних датчиків, математичних моделей та статистичних спостережень. Завдяки цьому система може прогнозувати майбутні стани, виявляти потенційні відхилення та виконувати оптимізацію до того, як виникне реальна проблема [9]. У контексті систем живлення цифровий двійник дає змогу моделювати теплові режими, аналізувати динаміку навантажень та прогнозувати деградацію компонентів, що значно підвищує надійність і довговічність джерел живлення.

Не менш важливою складовою розвитку КФС є кібербезпека. Оскільки кібер-фізичні системи часто пов'язані з критичною інфраструктурою енергетичними мережами, транспортом, медичними установами, навіть незначне втручання зловмисника може призвести до серйозних наслідків. Тому сучасні системи інтегрують засоби шифрування, автентифікації, контроль доступу, захист від вторгнень і функції постійного моніторингу аномалій у поведінці системи. Безпека стає не додатковою функцією, а базовим елементом архітектури КФС. Цей аспект має особливе значення у зв'язку з поширенням бездротових технологій, які значно збільшують площу потенційних атак на систему.

Стрімкий розвиток технологій штучного інтелекту відіграє ключову роль у формуванні нових можливостей кібер-фізичних систем. Алгоритми машинного навчання дозволяють системам автоматично визначати аномалії, прогнозувати несправності, адаптувати режими роботи до складних динамічних умов і навіть оптимізувати власне енергоспоживання. У промислових умовах це проявляється у підвищенні продуктивності виробничих процесів, більш точному контролі якості та скороченні простоїв завдяки превентивному обслуговуванню [8]. Для систем живлення алгоритми ШІ можуть аналізувати ефективність перетворення за різних режимів навантаження, передбачати теплове перевантаження та знаходити оптимальні точки роботи DC-DC перетворювачів.

Кібер-фізичні системи також відіграють важливу роль у формуванні розподілених архітектур керування. Замість використання одного централізованого контролера, сучасні комплекси часто складаються з численних інтелектуальних вузлів, кожен з яких може автономно приймати рішення в межах локальних задач. Такий підхід підвищує гнучкість, дозволяє масштабувати систему та гарантує її стійкість до відмов окремих компонентів.

У енергетичних мережах прикладом такої архітектури є мікромережі, де кожне джерело живлення, накопичувач або навантаження працює як самостійний інтелектуальний модуль, що координується з іншими через мережу.

У системах живлення тенденція до розподіленого керування проявляється у появі так званих інтелектуальних полі-перетворювачів (Point-of-Load), які можуть взаємодіяти між собою, обмінюватися інформацією про навантаження, температуру та режими роботи [8]. Такі модулі формують єдину кібер-фізичну платформу, здатну забезпечувати максимальну ефективність на всіх рівнях енергопостачання від первинних джерел до кінцевих споживачів. Це особливо актуально для складних систем, наприклад телекомунікаційних серверів, мережевих пристроїв та високопродуктивних обчислювальних кластерів, де стабільність та ефективність живлення впливають на продуктивність усього обладнання.

Важливим фактором розвитку кібер-фізичних систем є мініатюризація сенсорів і силової електроніки, зокрема джерел живлення. Сучасні технології дозволяють створювати високоточні сенсори з мінімальним енергоспоживанням, а також модулі живлення з інтегрованими індуктивностями, драйверами та контролерами в одному корпусі [8]. Поєднання цих технологій дає змогу проектувати компактні, енергоефективні та малошумні кібер-фізичні пристрої, які можна легко інтегрувати в системи будь-якого масштабу від портативних гаджетів до складних промислових комплексів.

Ще одним важливим аспектом є стандартизація. Створення універсальних протоколів взаємодії, єдиних вимог до безпеки, сумісності та структури даних суттєво спрощує розгортання кібер-фізичних систем. Завдяки стандартам виробники отримують можливість інтегрувати обладнання різних компаній в єдине середовище, а користувачі легко масштабувати інфраструктуру та

розширювати функціональні можливості своїх систем. Це особливо важливо в контексті промислових мереж і віддаленого моніторингу.

Усе це свідчить про те, що кібер-фізичні системи не є просто набором технологічних рішень, а являють собою цілісну концепцію нової епохи технічних систем, де цифрова та фізична складові взаємодіють настільки тісно, що стають фактично нероздільними. Поєднання інтелектуальних алгоритмів, розподіленого керування, мікроелектроніки нового покоління та гнучких комунікацій створює умови для появи технічних комплексів, здатних працювати майже автономно, здійснювати самодіагностику, забезпечувати оптимальну ефективність і відповідати жорстким вимогам сучасної інженерії.

У контексті теми дипломної роботи кібер-фізичні системи становлять важливий теоретичний і технологічний фундамент для розвитку сучасних систем живлення. Вони визначають нові вимоги до архітектури DC-DC перетворювачів, які мають бути не лише ефективними та компактними, але й здатними взаємодіяти з іншими модулями [10], динамічно змінювати режими роботи, аналізувати параметри в реальному часі та підтримувати розподілену логіку керування. Таким чином, впровадження кібер-фізичної парадигми у проектування силової електроніки стає ключовим етапом її подальшого розвитку і забезпечує випереджальне зростання продуктивності та надійності технічних систем майбутнього.

Ключовими компонентами сучасних промислових систем є «розумні» датчики (SmartSensors), які подають дані на контролери, монітори та інші операційні технології, що працюють на заводі. Мережа датчиків використовується роками, але поява Інтернету розширила можливості (та проблеми) використання цих систем. Можливості проектування CPS також розширилися, коли датчики стали частиною промислового Інтернету речей

(ІоТ). Архітектура та принципи побудови мехатронних систем та САР/САК також зазнала змін.

Датчики відіграють різноманітні ролі на сучасному заводі. Окрім надання даних для контролю процесу, вони допомагають оцінювати якість, відстежувати активи, параметри логістики та навіть безпеку працівників. Поява потужного хмарного аналітичного програмного забезпечення та штучного інтелекту дозволила використовувати дані датчиків для зниження витрат на виробництво шляхом оптимізації процесів та прогнозного, предиктивного обслуговування. Після того, як дані датчиків передані в Інтернет, вони можуть бути використані в різних сферах та цифрових платформах CPPS: від управління постачаннями до глобальної координації виробничих ресурсів [8].

Практично для кожного типу процесу або умов навколишнього середовища є тип датчика, відповідний для його вимірювання. Традиційно інформація, яку надає ця безліч типів датчиків, залишається локальним ресурсом, обмеженим лише одним засобом чи навіть однією машиною. Поява недорогих, ширококутових можливостей підключення, відкрила двері для доступу до даних датчиків з будь-якої точки Землі, а, отже, і до віддаленого моніторингу та контролю.

Оскільки Smart сенсори розвивалися в концепції 4.0 (див. рисунок 2.1), вони фактично самі стають вбудованими системами (EmbeddedSystem) із функціями вимірювання, первинної обробки та передачі даних, контролю, комунікації. Отже, Smart сенсори стають повноцінними функціональними підсистемами CPS та CPPS [8].

Розумні датчики 4.0, завдяки вбудованим трансміттерам та внутрішньому DSP-контролеру із алгоритмами спектрального аналізу [8], передають для подальшої обробки в хмарні сервіси вже очищені від шумів нормалізовані дані (тобто інформацію). Системи моніторингу на базі традиційних датчиків 3.0

мають іншу архітектуру, оскільки потребують «зовнішнього» мікроконтролера та інших засобів для передачі та обробки даних. Підключити датчик 3.0 до Інтернету можна, але це більш складна задача.

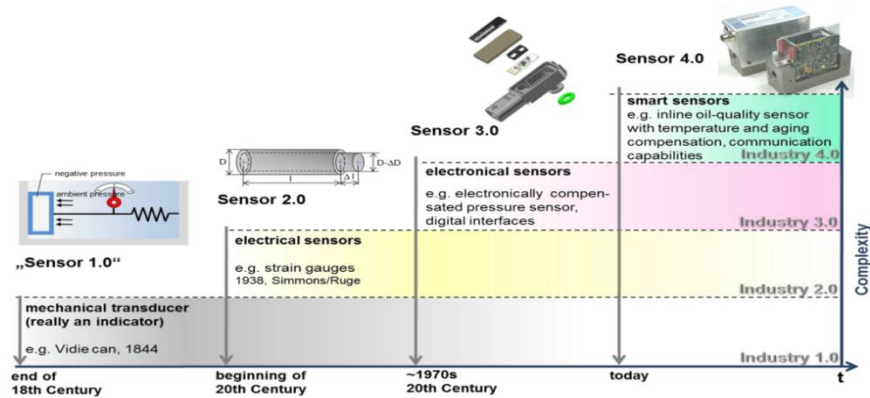


Рисунок 2.1 – Розвиток датчиків, перетворення їх на об’єкти 4.0 (Smartsensors) [8]

Як видно з рисунка 2.1, складність та функціонал датчиків зростає: від первинного перетворювача механічного типу на першому етапі, електричних та електронних датчиків другого та третього етапу до повноцінних систем, які подібно до інших об’єктів 4.0 є синергетичним поєднанням традиційного функціоналу із можливостями ІТ-галузі, зокрема, ІоТ/ІіоТ [8].

## 2.2 Системи живлення для сенсорів ІоТ

Системи живлення для сенсорів Інтернету речей (ІоТ) є одним із ключових компонентів сучасних кібер-фізичних систем, що забезпечують збір, обробку та передавання даних у реальному часі. Ефективність і тривалість роботи таких сенсорних вузлів безпосередньо залежать від енергетичного

забезпечення, адже більшість пристроїв функціонують автономно, часто в умовах обмеженого доступу до зовнішніх джерел живлення [8].

З огляду на це, питання оптимізації споживання енергії, вибору джерел живлення та застосування інноваційних технологій енергозбору є надзвичайно актуальними. Сенсорні пристрої IoT характеризуються низьким енергоспоживанням, проте їх кількість у мережі може сягати тисяч і навіть мільйонів одиниць [8], що робить проблему енергетичної ефективності системи комплексною. Кожен сенсорний вузол зазвичай складається з джерела живлення, мікроконтролера, сенсорних елементів, модуля зв'язку та схеми управління живленням (PowerManagementUnit — PMU).

У більшості випадків основну частку енергії споживають бездротові модулі зв'язку (Wi-Fi, BLE, LoRa, NB-IoT), тоді як сенсорні елементи та контролери працюють у режимах наднизького споживання. Для продовження автономної роботи пристрої переходять у сплячі або енергозберігаючі стани, активуючись лише під час вимірювань або передавання даних. Традиційно джерелом живлення сенсорів є батареї – одноразові або перезаряджувані. Найчастіше використовуються літій-тіонілхлоридні ( $Li-SOCl_2$ ) батареї завдяки їх високій енергетичній щільності та широкому температурному діапазону.

Вони здатні забезпечити автономну роботу пристрою протягом 10–20 років за низького струму споживання. У більш потужних пристроях застосовуються літій-іонні або літій-полімерні акумулятори, які дозволяють багаторазово заряджати систему [8]. Проте використання лише акумуляторних джерел не завжди є доцільним, оскільки з часом відбувається деградація ємності та потреба у технічному обслуговуванні.

Для підвищення автономності сенсорів активно застосовуються технології енергозбору (energyharvesting), які дозволяють перетворювати енергію

навколишнього середовища у електричну. Найпоширенішими є системи збору сонячної енергії, що використовують мініатюрні фотоелементи. Такі рішення особливо ефективні для зовнішніх IoT-пристроїв, наприклад, у системах моніторингу навколишнього середовища або «розумного міста» [8].

У місцях із нестабільним освітленням застосовують гібридні системи, у яких сонячна панель поєднується з літійовим акумулятором або суперконденсатором, що накопичує енергію для роботи у нічний час. Окрім сонячних систем, перспективним напрямом є термоелектричні генератори (TEG), які використовують різницю температур між поверхнями для генерування напруги. Вони ефективні у промислових установках, де присутні теплові джерела, наприклад, двигуни або трубопроводи [9].

Ще одним напрямом є п'єзоелектричні генератори, що виробляють енергію від механічних коливань чи тиску – такі рішення застосовують у транспортних системах, мостах або конструкціях, де відбуваються регулярні вібрації. Також розвиваються системи радіочастотного енергозбору (RF harvesting), які отримують енергію з електромагнітного випромінювання поблизу джерел Wi-Fi, GSM або телевізійних передавачів. Хоча їх потужність невелика (декілька мікроватів), цього достатньо для живлення мікроконтролерів з наднизьким енергоспоживанням у режимі очікування [9].

Для забезпечення стабільного функціонування сенсорів використовуються DC/DC-перетворювачі, які перетворюють напругу з джерела живлення у необхідний рівень для мікросхем. Найпоширенішими є топології buck (понижувальні), boost (підвищувальні) та buck-boost, здатні підтримувати стабільну напругу при зміні умов вхідного живлення [9]. Серед них buck-boost-перетворювачі є найуніверсальнішими, оскільки дозволяють працювати як при високому, так і при низькому рівні заряду батареї. Використання сучасних

мікросхем керування на базі ШІМ (широко-імпульсної модуляції) дає змогу мінімізувати втрати енергії та підвищити ефективність до 95–98 %.

Особливу роль у підвищенні енергоефективності відіграє PowerManagementUnit (PMU) - система керування живленням, що розподіляє енергію між різними компонентами сенсорного вузла. Вона може вмикати або вимикати окремі модулі залежно від робочого циклу пристрою. Наприклад, модуль зв'язку активується лише під час передавання даних, а решту часу перебуває у сплячому режимі. Також PMU відстежує стан батареї, контролює процес заряджання та запобігає глибокому розряду. Застосування таких інтелектуальних систем управління дозволяє значно збільшити термін роботи IoT-пристрою при мінімальному обсязі батареї [9].

Важливим аспектом є також вибір матеріалів та конструкцій елементів живлення. Для зменшення габаритів та ваги пристроїв використовуються тонкоплівкові акумулятори, гнучкі полімерні батареї та суперконденсатори з високою питомою ємністю. Останні особливо ефективні у системах, де необхідні короткочасні імпульси великої потужності, наприклад, під час передачі [9]. Їх перевага полягає у здатності швидко заряджатися та витримувати десятки тисяч циклів без деградації. Використання наноструктурованих матеріалів, таких як графен або оксиди металів, дозволяє збільшити площу поверхні електродів і, відповідно, підвищити ємність при збереженні компактних розмірів.

Окрім апаратних аспектів, енергозбереження досягається за рахунок оптимізації програмного забезпечення сенсорів. Використання енергоефективних протоколів зв'язку (BLE, ZigBee, LoRaWAN, NB-IoT) дозволяє скоротити час активності передавача та мінімізувати енергоспоживання під час комунікації.

Наприклад, протокол LoRaWAN забезпечує дальність передачі понад 10 км при споживанні струму менше 20 мА у режимі передачі, що робить його одним із найефективніших для автономних систем моніторингу. Додатково застосовується буферизація даних сенсор накопичує вимірювання протягом певного періоду, а потім передає їх пакетно, що дозволяє зменшити частоту активації передавача[9]. Сучасні дослідження у сфері енергозабезпечення IoT-пристроїв спрямовані на інтеграцію енергетичних систем безпосередньо у мікросхеми.

Концепція PowerSystem-on-Chip (PSoC) передбачає поєднання перетворювачів, контролерів та накопичувачів енергії на одному кристалі. Це зменшує втрати на з'єднаннях, покращує тепловідведення та дозволяє створювати повністю автономні мікросистеми з мінімальними розмірами. Додатково розвиваються системи інтелектуального управління енергією, що використовують алгоритми машинного навчання для прогнозування споживання та адаптації режимів роботи сенсорів до умов середовища[9]. Перспективним напрямом є також використання гібридних джерел живлення, які поєднують кілька способів енергозабезпечення наприклад, сонячну панель, суперконденсатор і батарею.

Такий підхід дозволяє компенсувати нестабільність одного джерела за рахунок іншого і забезпечити надійну роботу системи в різних умовах. Крім того, ведуться дослідження щодо біоелектричних джерел, які генерують електроенергію з біологічних процесів наприклад, різниці потенціалів у живих організмах або реакцій окиснення [9]. Ці технології поки мають низьку потужність, але відкривають нові можливості для живлення імплантованих або екологічних сенсорів.

Подальший розвиток систем живлення для сенсорів Інтернету речей безпосередньо пов'язаний із прогресом у галузях нанотехнологій,

мікроелектроніки та енергетичних матеріалів. Важливим напрямом є створення інтегрованих енергетичних модулів, здатних одночасно виконувати функції збору, зберігання та перетворення енергії [9]. Поєднання широкозонних напівпровідникових приладів, надтонких суперконденсаторів і високоефективних мікроперетворювачів на одному кристалі відкриває можливість створення повністю автономних енергосистем нового покоління.

Такі рішення не лише підвищують ефективність сенсорних мереж, але й забезпечують стійкість їх роботи у складних умовах експлуатації – при коливаннях температури, вологості чи освітленості. У перспективі це дозволить реалізувати концепцію енергонезалежних IoT-пристроїв, які зможуть працювати десятиліттями без заміни елементів живлення, що стане основою розвитку інтелектуальних інфраструктур майбутнього [9].

Отже, системи живлення для сенсорів Інтернету речей є комплексом взаємопов'язаних апаратних і програмних рішень, спрямованих на забезпечення максимальної автономності, стабільності та ефективності роботи пристроїв. Подальша еволюція енергетичних технологій від розвитку наноматеріалів до інтелектуальних алгоритмів керування визначатиме ефективність та довговічність майбутніх сенсорних мереж і стане ключем до реалізації повністю автономних кібер-фізичних систем.

### 2.3 Перетворювачі Type-C

USB-C, або USB Type-C, – це 24-контактний реверсивний роз'єм (не протокол), який замінив усі попередні USB-роз'єми, визнані застарілими у 2014 році, а також роз'єми Mini DisplayPort і Lightning. Він використовується для

передачі даних (наприклад, аудіо або відео), живлення або одночасно для обох цілей, для підключення до дисплеїв, зовнішніх накопичувачів, мобільних телефонів, клавіатур, тачпадів, мишок і багатьох інших пристроїв, іноді через хаби чи док-станції. USB-C підтримує не лише технологію USB, а й інші протоколи передачі даних, включно з Thunderbolt, PCIe, HDMI, DisplayPort та іншими, і має можливість розширення для підтримки майбутніх протоколів.

На рисунку 2.2 зображено універсальний роз'єм USB Type-C, який є сучасним стандартом інтерфейсів підключення для передачі даних та живлення електронних пристроїв. Роз'єм USB Type-C має симетричну конструкцію, що дозволяє підключення кабелю незалежно від його орієнтації, підвищуючи зручність експлуатації та надійність з'єднання.

Роз'єм містить 24 контакти, які забезпечують підтримку різних режимів роботи, зокрема передачу даних за стандартами USB 2.0, USB 3.x, а також альтернативні режими, такі як DisplayPort і HDMI. Окрім цього, USB Type-C підтримує технологію USB PowerDelivery, що дозволяє передавати електричну потужність до 100 Вт і використовувати роз'єм для живлення широкого спектра пристроїв – від сенсорних вузлів і вбудованих систем до ноутбуків та моніторів.

Завдяки поєднанню компактних габаритів, високої пропускну здатності та можливості передавання значної потужності, роз'єм USB Type-C широко застосовується в мікросистемних та кібер-фізичних пристроях і є перспективною основою для побудови універсальних систем живлення та обміну даними.

Важливою особливістю USB Type-C є підтримка специфікації USB PowerDelivery, яка дозволяє передавати потужність до 100 Вт за рахунок використання різних профілів напруги та струму. Це робить можливим живлення не лише малопотужних сенсорних вузлів, а й більш енергоємних пристроїв, таких як вбудовані системи, ноутбуки та дисплеї. Крім того, USB

Type-C підтримує двонаправлений обмін енергією, за якого пристрій може виступати як споживачем, так і джерелом живлення.

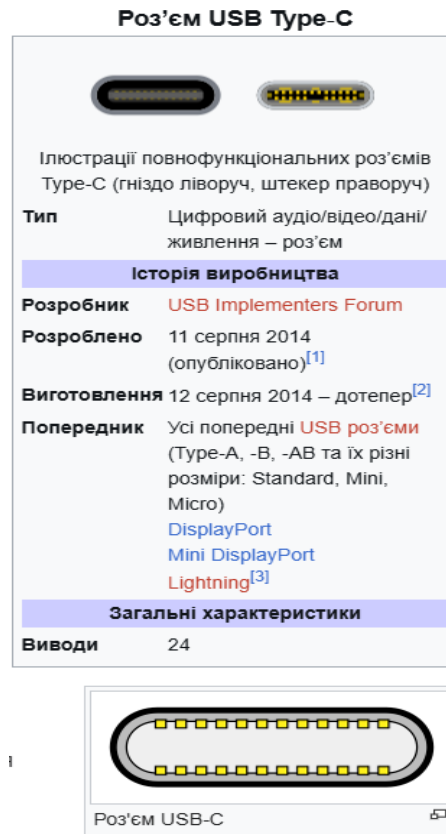


Рисунок 2.2 - Роз'єм USB-C [10]

Завдяки компактним габаритам, універсальності та широким функціональним можливостям USB Type-C є перспективним інтерфейсом для використання в енергоефективних мікросистемних джерелах живлення та кіберфізичних системах, де необхідне поєднання передавання даних і живлення через один стандартизований роз'єм.

Перетворювачі С-Туре посідають особливе місце серед імпульсних DC/DC схем завдяки високій енергоефективності та стабільності роботи в широкому діапазоні навантажень. Їх основна мета передавання електричної енергії з мінімальними втратами та забезпечення стійкого живлення для різних типів пристроїв, починаючи від мікроконтролерів і сенсорних модулів і закінчуючи потужнішими кібер-фізичними компонентами[10]. Розвиток цього типу перетворювачів зумовлений зростаючими вимогами до компактності та енергоефективності в сучасній електроніці.

У порівнянні з класичними топологіями типу Buck, Boost чи Flyback, перетворювачі С-Туре забезпечують плавніше передавання енергії завдяки комбінуванню ємнісної та індуктивної передачі в одній структурі. Таке поєднання дозволяє зменшити втрати на комутацію та підвищити загальний ККД до 95–98 %. Схема типу С-Туре має можливість працювати як у режимі пониження напруги (buck), так і в режимі підвищення (boost), а також у комбінованому режимі buck-boost, що забезпечує універсальність застосування. Основна особливість С-Туре перетворювачів полягає в одночасному накопиченні та віддачі енергії через два шляхи — індуктивний і ємнісний [10]. Під час роботи перетворювача енергія чергується між дроселем і конденсатором, що дозволяє підтримувати стабільну вихідну напругу та зменшити амплітуду струмових пульсацій.

Цей ефект важливий для живлення чутливих електронних вузлів та цифрових контролерів, де навіть незначні коливання можуть призводити до збоїв або зменшення точності вимірювань. Перевагою С-Туре є також низький рівень електромагнітних завад, що спрощує інтеграцію з іншими електронними модулями [10]. У сучасних системах живлення, особливо в IoT-пристроях, використання такої топології дозволяє зменшити необхідність додаткових фільтрів, а це знижує собівартість та габарити кінцевого виробу.

Завдяки високій частоті комутації можна використовувати менші дроселі та конденсатори, що ще більше зменшує розміри системи та покращує щільність потужності. Серед інших переваг варто згадати високу стабільність роботи при змінах вхідної напруги та навантаження. С-Туре перетворювач легко адаптується до динамічних умов, що робить його оптимальним рішенням для живлення сенсорних мереж, передавачів та автономних систем [11]. Його універсальність дозволяє використовувати різні джерела енергії — від сонячних панелей та елементів Пельтьє до акумуляторів та суперконденсаторів.

У кібер-фізичних системах перетворювачі С-Туре виконують ключову роль у підтримці стабільної енергетичної інфраструктури. Вони забезпечують живлення модулів зв'язку, сенсорних елементів та контролерів у реальному часі, що дозволяє підтримувати зворотний зв'язок між фізичною та обчислювальною частинами системи [11]. Такі рішення забезпечують енергонезалежність та стійкість роботи в умовах змінного енергопостачання.

Останні дослідження у галузі енергоефективних мікросистем показують, що інтеграція С-Туре перетворювачів з напівпровідниковими компонентами на основі GaN та SiC дозволяє підвищити частоту комутації до кількох мегагерц, зменшуючи втрати на комутацію та тепловиділення. Це дає змогу створювати компактні рішення з ККД понад 97 %.

Крім того, розвиваються цифрові контролери, які дозволяють адаптивно налаштовувати роботу перетворювача в залежності від поточного навантаження та умов навколишнього середовища. Сучасні тенденції також спрямовані на створення інтелектуальних С-Туре модулів, які зможуть самостійно здійснювати моніторинг параметрів, діагностику помилок та оптимізацію енергетичних режимів.

Такі рішення відкривають перспективи для використання перетворювачів С-Туре у робототехнічних системах, розумних будівлях та біомедичних

пристроях, де стабільне та ефективне живлення є критично важливим. У довгостроковій перспективі C-Туре топології можуть стати базовою основою для створення нових стандартів мікросистем живлення [11]. Їх поєднання з адаптивними цифровими контролерами та високотемпературними матеріалами створить передумови для виникнення повністю автономних енергоефективних рішень, які будуть здатні забезпечувати роботу мільйонів пристроїв у глобальних мережах Інтернету речей.

Таким чином, перетворювачі типу C-Туре є одним із найважливіших напрямів розвитку енергоефективних джерел живлення. Їх унікальна структура та гнучкість застосування дозволяють забезпечити високий рівень ефективності й надійності при мінімальних габаритах та витратах енергії [11]. Подальше вдосконалення цієї топології сприятиме створенню нового покоління енергонезалежних пристроїв та інтелектуальних систем живлення.

Проектування перетворювачів типу C-Туре потребує особливої уваги до вибору компонентів і конфігурації схеми, оскільки навіть незначні відхилення параметрів можуть вплинути на стабільність роботи системи. Одним із ключових завдань інженера є забезпечення оптимального співвідношення між індуктивністю, ємністю та частотою комутації [12]. При занадто великій індуктивності система стає інерційною, що призводить до зниження швидкодії. Якщо ж індуктивність занадто мала, зростає амплітуда пульсацій струму і, відповідно, втрати на комутацію. Конденсатори у схемах C-Туре виконують функцію енергетичного буфера.

Для зменшення паразитних ефектів рекомендується використовувати керамічні або танталові конденсатори з низьким еквівалентним послідовним опором (ESR). У разі використання електролітичних конденсаторів важливо враховувати їхній температурний дрейф, що може вплинути на стабільність

вихідної напруги. Особливу роль відіграє правильне розташування компонентів на друкованій платі [12].

Мінімізація довжини силових ланцюгів зменшує індуктивні втрати та рівень електромагнітних завад. Часто застосовують багатошарові плати, у яких окремі шари призначені для сигналів керування, живлення та заземлення. Такий підхід забезпечує кращу стабільність роботи та спрощує тепловідведення. У системах, де використовується мікроконтролер або цифровий регулятор, важливо правильно синхронізувати частоту комутації з частотою опитування сенсорів. Якщо ці частоти збігаються або перебувають у гармонійному співвідношенні, можливі резонансні ефекти, які призводять до коливань вихідної напруги.

Для уникнення цього, частоту комутації задають на 10–20 % вище або нижче частоти основного циклу керування. Ще одним важливим аспектом є тепловий менеджмент. Перетворювачі С-Туре працюють з високими щільностями потужності [12], тому локальні перегріву силових елементів можуть стати проблемою. Для ефективного охолодження використовують термопрокладки, мідні теплові шляхи або інтегровані металеві підкладки. У сучасних розробках застосовують методи активного моніторингу температури, коли контролер автоматично зменшує частоту комутації або струм навантаження при перевищенні критичних температур.

На практиці С-Туре перетворювачі часто використовуються у складі багаторівневих систем живлення [12]. Наприклад, у сенсорних вузлах ІоТ перший ступінь забезпечує стабілізацію напруги від сонячного елемента, а другий С-Туре модуль підтримує точну вихідну напругу для живлення мікроконтролера. Така архітектура дозволяє забезпечити безперервну роботу системи навіть при коливаннях зовнішніх умов.

Перетворювачі С-Туре також мають важливе значення у медичних пристроях, де стабільність і надійність живлення безпосередньо впливають на точність вимірювань і безпеку пацієнтів. Наприклад, у портативних діагностичних сенсорах застосовуються мініатюрні С-Туре модулі, здатні підтримувати стабільну напругу при мінімальних втратах енергії, що продовжує термін роботи пристрою від батареї [12]. Завдяки універсальності, високому ККД і широкому діапазону застосувань перетворювачі С-Туре продовжують залишатися одним із найактуальніших напрямів розвитку в галузі енергоефективної електроніки. Подальше вдосконалення методів їх проєктування, використання нових матеріалів та цифрових технологій управління відкриває шлях до створення нових поколінь автономних мікросистем живлення.

Які характеризуються підвищеною щільністю потужності, зниженими втратами енергії та покращеною стабільністю роботи в умовах змінних навантажень та вхідних параметрів. Інтеграція перетворювачів С-Туре з інтелектуальними системами управління, зокрема на основі цифрових сигнальних процесорів та мікроконтролерів, дозволяє реалізувати адаптивні алгоритми регулювання, що підвищують ефективність та надійність енергетичних систем загалом.

Таким чином, подальші дослідження, спрямовані на математичне моделювання, оптимізацію параметрів силових каскадів та розробку адекватних моделей управління, є актуальними та мають важливе практичне значення для створення сучасних автономних та вбудованих систем електроживлення.

### 3 АНАЛІЗ І РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ УНІВЕРСАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ МІКРОСИСТЕМНИХ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ

DC-DC перетворювач, це електронна схема, яка перетворює вихід джерела постійного струму (DC) від одного рівня напруги до іншого[13]. Це різновид перетворювача електроенергії, є складовою ефективних джерел живлення для компонентів КФС.Рівень потужності в них коливається від дуже низького (невеликі акумулятори) до дуже великого (високовольтне передавання потужності).

На рисунку 3.1 показано непроникний (ізолюваний) DC-DC перетворювач модульного типу для монтажу на друкованій платі. Такий модуль забезпечує стабілізацію напруги, гальванічну розв'язку та зниження електричних перешкод у системах живлення[13]. Він містить у собі трансформатор, силові елементи та фільтри, що спрощує інтеграцію в електронні пристрої та підвищує надійність роботи.



Рисунок 3.1—Непроникний DC-DC перетворювач модульного виконання для збирання на друкованій платі [13]

DC-DC перетворювачі використовуються в переносних електронних пристроях, як-от мобільні телефони та переносні комп'ютери, котрі живляться переважно від батарей [14]. Такі електронні пристрої часто містять кілька підсхем, кожна з яких має власну вимогу до рівня напруги, відмінну від тієї, що подається акумулятором або зовнішнім джерелом живлення (іноді вище або нижче напруги живлення). Водночас, напруга акумулятора зменшується з часом, коли його накопичена енергія витрачається. Перетворювачі постійний струм-постійний струм [14], забезпечують спосіб підвищення напруги від частково зниженої напруги акумулятора, і тим самим заощаджують місце, оскільки в іншому разі довелося б використовувати кілька акумуляторів різної напруги для одного пристрою.

Більшість схем DC-DC перетворювачів, також регулюють вихідну напругу [14]. Деякими винятками є високоефективні джерела живлення для світлодіодів, які є своєрідними перетворювачами постійного струму на постійний струм, що регулюють електричний струм крізь світлодіоди, і прості так звані помножувачі напруги, які подвоюють або потроюють вихідну напругу.

DC-DC перетворювачі, розроблені заради якнайбільшого відбору електроенергії для фотоелектричних систем вітрогенераторів, називаються оптимізаторами потужності.

На рисунку 3.2 представлено мікросхему AAT1118 удосконалений аналоговий триканальний контролер DC-DC, що використовується для живлення TFT LCD дисплеїв. Пристрій забезпечує формування кількох стабілізованих вихідних напруг, необхідних для роботи матриці, а також має захисти та високу енергоефективність [14]. Завдяки компактному виконанню та інтегрованим функціям він широко застосовується в портативній електроніці та дисплейних модулях.

На рисунку 3.2 наведено структурну схему DC–DC перетворювача типу buck-boost (FSBB), яка відображає основні функціональні блоки системи: силовий каскад, індуктивний елемент, вихідний фільтр та контур керування. Така структура дозволяє аналізувати енергетичні процеси в перетворювачі та слугує основою для побудови математичної моделі.



Рисунок 3.2 – Удосконалена аналогова технологія AAT1118 - керований триканальний TFT LCD перетворювач DC-DC

Трансформатори, які застосовуються для перетворення напруги на мережевих частотах 50–60 Гц, повинні бути великими та важкими для потужностей, що перевищують кілька ват. Це робить їх дорогими, і вони зазнають втрат енергії у своїх обмотках і через вихрові струми у власних осердях [14]. Методи DC-DC перетворення, які використовують трансформатори або індуктивності, працюють на значно більшій частоті, вимагаючи набагато менших, легших і дешевших складників намотування. Отже, ці способи застосовуються навіть там, де можна було б використовувати мережевий трансформатор; наприклад, для побутових електронних приладів, бажано випрямити напругумережідо постійного струму, використовувати способи перемикання в режимі комутації, щоби перетворити її на змінний струм високої частоти потрібної напруги, а потім, здебільшого, випрямити

до постійного струму. Весь цей складний контур дешевше і ефективніше, за простий мережевий трансформатор із таким же виходом.

Перетворювачі постійного струму, перетворюють один рівень напруги постійного струму на інший, який може бути вищим або нижчим, тимчасово зберігаючи вхідну енергію, а потім вивільняючи цю енергію на виході. Зберігання енергії може бути або в компонентах накопичувача магнітного поля (індуктивності, трансформатори), або в накопичувачі електричного поля (конденсатори). Індуктивності при цьому згладжують пульсації струму, а конденсатори згладжують пульсації напруги.

DC-DC перетворювач (регулятор або стабілізатор) це електронний пристрій, який перетворює постійну напругу одного рівня в постійну напругу іншого рівня та підтримує її стабільною, незалежно від змін вхідної напруги або навантаження за рахунок широтно-імпульсної модуляції. Широтно-імпульсна модуляція (ШІМ/PWM) це спосіб керування потужністю електричних сигналів або пристроїв, при якому змінюється тривалість імпульсів (їх ширина), а амплітуда та частота залишаються постійними [14]. Інакше кажучи, сигнал має форму прямокутних імпульсів, і саме тривалість «включеного» стану визначає середнє значення напруги або струму.

DC-DC перетворювачі називають SMPS (SwitchModePowerSupply), тому що вони працюють в імпульсному режимі комутації, коли напруга регулюється шляхом швидкого вмикання та вимикання електронних ключів (транзисторів), що дозволяє ефективно перетворювати енергію з мінімальними втратами та підтримувати стабільну вихідну напругу. DC-DC перетворювач також називають регулятором, тому що він може змінювати рівень напруги (підвищувати або знижувати її), а також стабілізатором, бо забезпечує сталість вихідної напруги за різних умов роботи [15].

Імпульсне перетворення часто є більш дієвим (типова ефективність становить від 75% до 98%), за лінійне регулювання напруги, яке розсіює небажану потужність у вигляді тепла. Вадю перемикальних перетворювачів є електронний шум, котрий виробляється на високих частотах, який зазвичай треба фільтрувати.

Проста електрична схема перетворювача FSBB отримана шляхом з'єднання понижувальних та підвищувальних каскадів разом з об'єднанням котушки індуктивності, як показано на рисунку 3.3. На рисунку 3.3 наведено електричну схему чотирьох ключового понижувально-підвищувального перетворювача типу FSBB (Four-Switch Buck-Boost). Дана топологія отримана шляхом об'єднання понижувального (buck) та підвищувального (boost) [15] каскадів зі спільною індуктивністю.

У схемі використовуються два напівмости на силових ключах SW1 та SW2, керування якими здійснюється широтно-імпульсним модулятором (PWM) [15]. Така структура забезпечує можливість стабілізації вихідної напруги як при значеннях вхідної напруги, менших за вихідну, так і при значеннях, що її перевищують. Використання спільної індуктивності дозволяє зменшити кількість пасивних елементів, підвищити енергоефективність та забезпечити безперервний режим струму індуктивності.

Таким чином, об'єднання та спрощення каскадних понижувальних та підвищувальних перетворювачів створює систему з одним індуктивністю. Незважаючи на додавання двох ключів, усунення одного індуктивності забезпечує значне зменшення розміру перетворювача та підвищення ефективності.

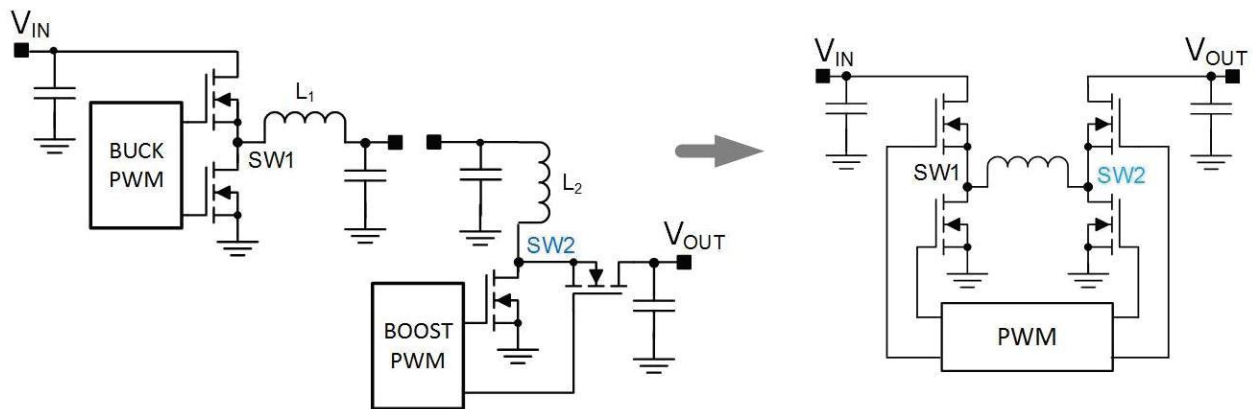


Рисунок 3.3 – Схема отримання перетворювача FSBB (Four-SwitchBuck-Boost)

Чотириключова структура дозволяє вибрати транзистори на основі вихідної напруги, а не вхідної, що також робить. Конструкція дешевша та зменшує навантаження на транзистори[15]. Також вибір підвищувальних ключів на основі вихідної напруги замість вхідної дозволяє використовувати пристрої з меншим зарядом затвора. Більше того, можна використовувати спільну систему керування, що підвищує надійність та стабільність роботи системи.

На рисунку 3.4 наведено структурно-функціональну схему чотириключового понижувально-підвищувального DC–DC перетворювача типу FSBB . Схема складається з двох основних силових каскадів: понижувального (buckleg) та підвищувального (boostleg), які з'єднані спільною індуктивністю фільтра  $L_F$ .

Понижувальний каскад утворений транзисторами  $Q_1$  та  $Q_2$ , які працюють у режимі керованого перемикування та синхронного випрямлення, забезпечуючи формування напруги на проміжному вузлі SW1. Підвищувальний каскад реалізований на транзисторах  $Q_3$  та  $Q_4$  і формує вихідну напругу  $V_{OUT}$  на вузлів SW2.

Передача енергії між каскадами здійснюється через індуктивність  $L_F$ , струм якої є безперервним у широкому діапазоні режимів роботи. Вхідний та вихідний конденсатори  $C_{IN}$  і  $C_{OUT}$  забезпечують згладжування пульсацій напруги відповідно на вході та виході перетворювача [16]. Для реалізації зворотного зв'язку та контролю струму використовується вимірювальний резистор  $R_S$ .

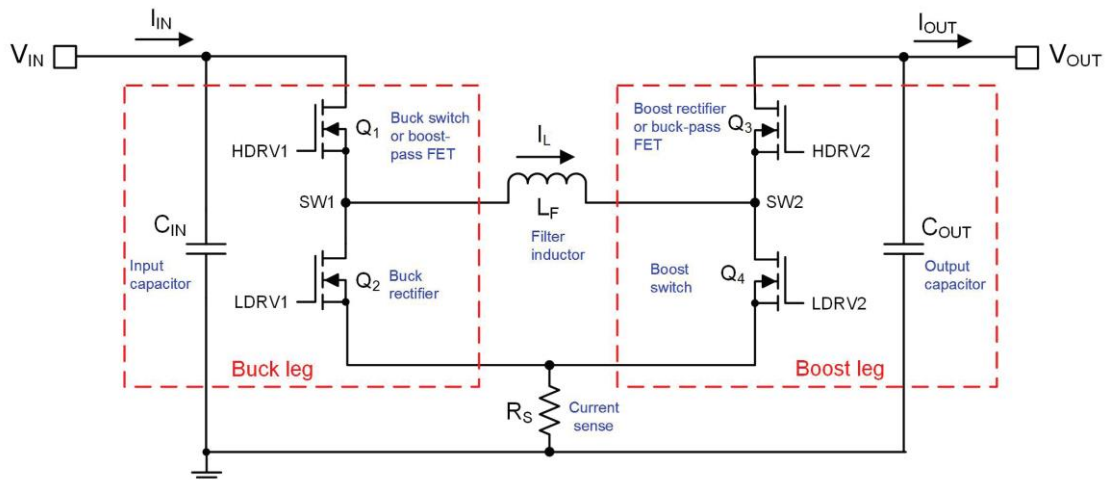


Рисунок 3.4 – Структурно-функціональна схема чотириключового понижувально-підвищувального DC–DC перетворювача (FSBB)

Така архітектура дозволяє перетворювачу працювати як у понижувальному, так і у підвищувальному режимах, забезпечуючи стабільну вихідну напругу при змінній вхідній напрузі та високий коефіцієнт корисної дії.

Отже, чотириключовий каскад живлення (рисунок 3.4) складається з підвищувального ключу (IGBT S1, S2 та вузол перемикача SW1) на високому боці (HS-індекси), підвищувального ключу (IGBT S3, S4 та вузол перемикача

SW2) на низькому боці (LS-індекси), індуктивності  $L$  між двома вузлами перемикача та конденсаторів (вхід  $C_{in}$  та вихід  $C_{out}$ ).

FSBB має три режими роботи залежно від відносних рівнів вхідної та вихідної напруги: режим зниження ( $V_{HSmin} > V_{LSmax}$ ), режим підвищення ( $V_{HSmin} < V_{LSmax}$ ) та режим зниження-підвищення (перехідний) (рис. 3.4).

На рисунку 3.5 схематично показано режими роботи чотириклучового понижувально-підвищувального перетворювача типу FSBB залежно від співвідношення вхідної та вихідної напруг. У понижувальному режимі (buckmode) перетворювач працює при значеннях вхідної напруги, більших за вихідну, і керування здійснюється переважно ключами понижувального каскаду. У підвищувальному режимі (boostmode), коли вхідна напруга є меншою за вихідну, активним стає підвищувальний каскад.

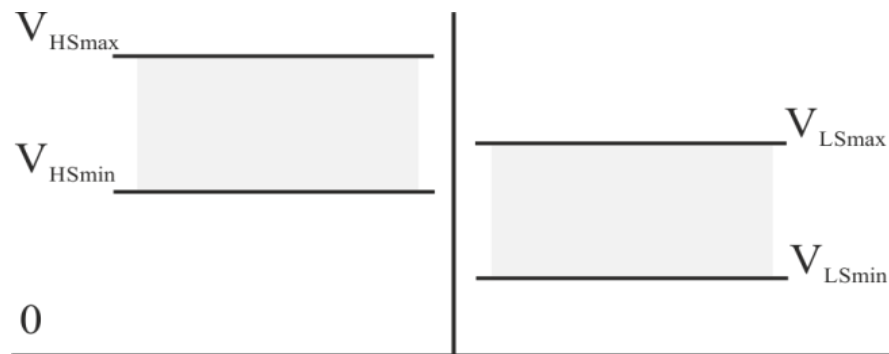


Рисунок 3.5 – Режимы работы FSBB

Між зазначеними режимами існує перехідна область, у якій значення вхідної та вихідної напруг є близькими [16]. У цьому режимі керування може здійснюватися обома каскадами, що забезпечує плавний перехід між понижувальним та підвищувальним режимами без різких змін струмів і напруг.

Така організація керування дозволяє використовувати один ШІМ-контролер для всіх режимів роботи та забезпечує безперервність струму індуктивності.

Завдяки симетричній структурі силового каскаду, перетворювач FSBB здатний працювати у двонаправленому режимі, що дає можливість передачі енергії в обох напрямках. Це робить дану топологію перспективною для застосування в системах з акумуляторами, накопичувачами енергії та у складі кібер-фізичних систем з адаптивним керуванням живленням.

Один ШІМ-контролер може керувати силовими ключами в усіх режимах роботи, включаючи понижувальний, підвищувальний та перехідний, під час яких вхідна та вихідна напруги майже однакові. Ця система дозволяє енергії проходити в обох напрямках, тобто FSBB є двонаправленим. Коли вхідна напруга ( $V_{HS}$ ) вища за бажану вихідну напругу ( $V_{LS}$ ), ключі понижувальної гілки працюють (режим пониження), а підвищувальні ключі статичні (100% робочий цикл) [16].

Схема перемикання ідентична понижувальному перетворювачу. У перехідній області всі чотири ключі повинні працювати з поєднанням понижувальної та підвищувальної дії на індуктивності, щоб підтримувати бажану регульовану напругу на навантаженні. Тому режим пониження-підвищення складається з чергування циклів пониження та підвищення. У режимі підвищення ключ високого рівня понижувальної гілки завжди ввімкнений, а транзистори підвищувального боку замкнені. Схема перемикання ідентична підвищувальному перетворювачу. Для перевірки моделі нам потрібно визначити основні параметри системи. Ми використовуватимемо їх пізніше для оцінки точності моделі.

Основними параметрами силового каскаду перетворювача є максимальний  $I_{Lmax}$  та середній струм через індуктивність  $I_{LAVG}$ , а також пульсації цього струму  $\Delta I_L$ . Ці параметри визначаються на основі таких

функцій: вихідний струм  $I_0$ , струм високої сторони  $I_{HS}$  та напруга  $V_{HS}$ , струм низької сторони  $I_{LS}$  та напруга  $V_{LS}$  (формули 3.1 -3.6).

$$I_{LSAVG} = I_0 \implies I_{LAVG} \cdot T_{OFF} = I_0 \cdot T, \quad (3.1)$$

де  $I_{LSAVG}$  – середній струм індуктивності, А;

$I_0$  – вихідний струм навантаження, А;

$T_{OFF}$  – інтервал вимкненого стану силового ключа, с;

$T$  – період перемикання, с

$$I_{LAVG} = \frac{I_0 \cdot T}{T_{OFF}} = \frac{I_0}{1-D} \quad (3.2)$$

де  $D$  – коефіцієнт заповнення ШІМ-сигналу.

$$I_{Lmax} = I_{LAVG} + \frac{\Delta i_L}{2}, \quad (3.3)$$

де  $I_{Lmax}$  – максимальне значення струму індуктивності, А;

$\Delta i_L$  – амплітуда пульсацій струму індуктивності, А.

$$\Delta i_L = \frac{V_{HS}}{L} \cdot T_{ON} = \frac{V_{LS}}{L} \cdot T_{OFF}, \quad (3.4)$$

де  $V_{HS}$  – напруга на індуктивності у фазі вмикання ключа, В;

$V_{LS}$  – напруга на індуктивності у фазі вимикання ключа, В;

$L$  – індуктивність фільтра, Гн;

$T_{ON}$  – інтервал увімкненого стану ключа, с.

де TON та TOFF – це тривалість увімкненого та вимкненого стану перемикача  $S_1$  відповідно, а  $D$  – це робочий цикл.

Максимальний струм через індуктивність  $L$  можна отримати таким чином.

$$I_{L\max} = \frac{I_0}{1-D} + \frac{1}{2} \cdot \frac{V_{LS}}{L} \cdot T_{OFF} \cdot \quad (3.5)$$

Передавальна функція була отримана за допомогою вольт-секундного балансу:

$$V_{HS} \cdot T_{ON} = V_{LS} \cdot T_{OFF}, \frac{V_{LS}}{V_{HS}} = \frac{D}{1-D}, \quad (3.6)$$

де  $V_{LS}$  – вихідна напруга  $V_0$ .

### 3.1 Моделювання та симуляція силового каскаду FSBB

Розглянемо моделювання силового каскаду перетворювача з параметрами:  $V_{in} = 250$  В;  $L = 500$  мкГн;  $D = 0,706$  (позначено S1 на рис. 3.6);  $I_0 = 2$  А;  $f = 100$  кГц. Враховуючи, що FSBB працює в режимі безперервної провідності, всі необхідні параметри для перевірки результатів моделювання були розраховані за формулами 3.1 - 3.6.

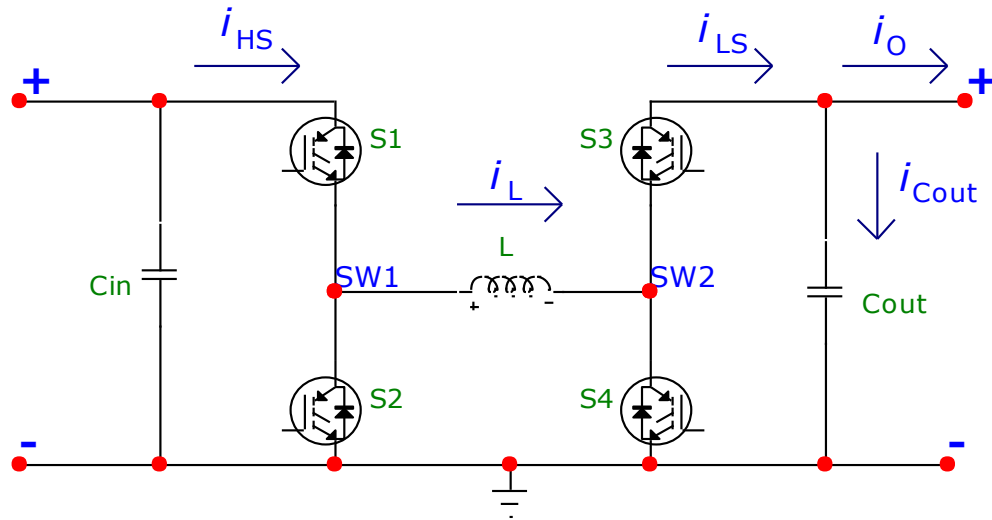


Рисунок 3.6 - Електрична схема перетворювача FSBB

Напруга індуктивності у ввімкненому стані

$$V_{Lon} = V_{in}, V_{Lon} = 250V, \quad (3.7)$$

де  $V_{Lon}$  – напруга на індуктивності у ввімкненому стані, В;

$V_{in}$  – вхідна напруга перетворювача, В.

Формула (3.7) відображає режим, у якому силові ключі забезпечують безпосереднє підключення індуктивності до джерела живлення. У цьому режимі в індуктивності накопичується енергія, що супроводжується зростанням струму.

Напруга індуктивності у вимкненому стані

$$V_{Loff} = -V_0, V_{Loff} = -600.34V, \quad (3.8)$$

де  $V_{Loff}$  – напруга на індуктивності у вимкненому стані, В;

$V_0$  – вихідна напруга перетворювача, В.

Формула (3.8) описує режим розряду індуктивності, у якому накопичена енергія передається до навантаження. Від’ємний знак напруги свідчить про зміну полярності напруги на індуктивності порівняно з режимом ввімкнення.

Середній струм індуктивності

$$I_L = \frac{I_0}{1-D} = 6.803\text{A}, \quad (3.9)$$

де  $I_L$  – середній струм індуктивності, А;

$I_0$  – вихідний струм навантаження, А;

$D$  – коефіцієнт заповнення імпульсів керування.

Формула (3.9) встановлює зв’язок між середнім струмом індуктивності та вихідним струмом перетворювача з урахуванням коефіцієнта заповнення. Зі збільшенням значення  $D$  струм індуктивності зростає, що необхідно враховувати під час вибору силових елементів і параметрів індуктивності.

Пульсації струму індуктивності

$$\Delta i_L = \frac{V_{in} \cdot D}{L \cdot f_{sw}} = 3.53\text{A}, \quad (3.10)$$

де  $\Delta i_L$  – амплітуда пульсацій струму індуктивності, А;

$V_{in}$  – вхідна напруга перетворювача, В;

$D$  – коефіцієнт заповнення імпульсів керування;

$L$  – індуктивність дроселя, Гн;

$f_{sw}$  – частота комутації, Гц.

Формула (3.10) показує, що величина пульсацій струму індуктивності прямо пропорційна вхідній напрузі та коефіцієнту заповнення і обернено пропорційна значенню індуктивності та частоті комутації.

Максимальний струм індуктивності

$$I_{L_{\max}} = I_L + \frac{1}{2} \cdot \Delta i_L = 8.568 \text{ A}, \quad (3.11)$$

де  $I_{L_{\max}}$  – максимальне значення струму індуктивності, А;

$I_L$  – середній струм індуктивності, А;

$\Delta i_L$  – амплітуда пульсацій струму індуктивності, А.

Формула (3.11) використовується для визначення пікового струму, який протікає через індуктивність та силові ключі перетворювача, і є критично важливою під час вибору силових елементів.

Мінімальний струм індуктивності

$$I_{L_{\min}} = I_L - \frac{1}{2} \cdot \Delta i_L = 5.038 \text{ A}, \quad (3.12)$$

де  $I_{L_{\min}}$  – мінімальне значення струму індуктивності, А;

$I_L$  – середній струм індуктивності, А;

$\Delta i_L$  – амплітуда пульсацій струму індуктивності, А.

Формула (3.12) дозволяє визначити мінімальний струм індуктивності та перевірити умову безперервного режиму струму. Якщо значення  $I_{L\min}$  є додатним, перетворювач працює в режимі безперервного струму індуктивності [16].

Поведінкова нова модель перетворювача FSBB для Micro-Cap 12 показана на рисунку 3.7.

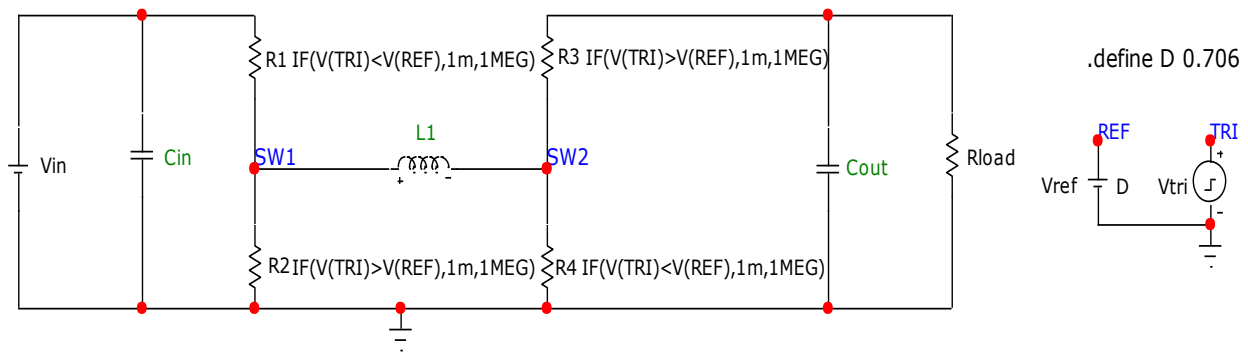


Рисунок 3.7– Поведінкова Spice-модель FSBB

Ця компактна та оригінальна модель поєднує систему широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) з властивостями електронних ключів змінювати свій опір [16]. Тобто, підсистема керування включена до моделі в адаптованому вигляді, який не прив'язаний до типу ШІМ (аналоговий чи цифровий), оскільки вона лише забезпечує алгоритм керування, задаючи закон зміни опору ключів, тим самим перетворюючи їх на поведінкові елементи. Такі модульовані, програмовані резистори можуть емулювати будь-які силові транзистори, тому ця модель є універсальною.

Транзистори замінено на резистори, щоб пришвидшити моделювання, оскільки з фізичними моделями транзисторів навіть така проста схема є

жорсткою та вимагає десятків ітерацій розв'язання нелінійних алгебраїчних рівнянь на кожному кроці за часом. З такою великою індуктивністю, мікроконденсатору потрібно було близько 100 000 кроків для моделювання в перехідному режимі. Ми також пропонуємо використовувати значення шпаруватості як опорний сигнал (заданий джерелом  $V_{ref}$ ). Можна запрограмувати тенденцію його зміни залежно від вибраного профілю споживаної потужності, що значно спрощує модель.

Значення опорів програмується наступним чином. Алгоритм для діагоналі R1-R4:

If  $V(V_{tri}) < V(V_{ref})$

Then  $R = 10^{-4}$  [Ом]

Else  $R = 10^6$  [Ом].

Тобто, коли амплітуда трикутного (несучого) сигналу, емульованого джерелом  $V_{tri}$ , менша за амплітуду опорного сигналу, діагональ R1-R4 (які моделюють транзистори) вмикаються (їх опір падає до 0,1 мОм) [16]. Одночасно резистори R2-R3 (також відомі як транзистори) вимикаються та мають високий опір (1 мОм).

Алгоритм для діагоналі R2-R3:

If  $V(V_{tri}) < V(V_{ref})$

Then  $R = 10^{-4}$  [Ом]

Else  $R = 10^6$  [Ом]

Тобто, коли амплітуда трикутного сигналу стає більшою за амплітуду опорного сигналу, транзистори діагоналі R2-R3 вмикаються. Одночасно діагональні транзистори R1-R4 вимикаються. Отже, в цих поведінкових елементах умови перемикавання програмуються шляхом порівняння несучого сигналу з опорним сигналом підсистеми ШІМ-керування; обидва сигнали нормалізуються, а опорне значення пропорційне шпаруватості. Завдяки

динамічному перевизначенню параметра шпаруватості модель адаптується для будь-якого режиму перетворювача (понижувальний, підвищувальний та перехідний), що робить її універсальною.

Різниця між максимальним та мінімальним значеннями опорів транзисторів визначає жорсткість моделі та, відповідно, впливає на час моделювання. При цьому мінімальна провідність не повинна бути меншою за фіксований параметр  $G_{min}$ . Результати моделювання основних змінних (струму через індуктивність та напруги на індуктивності) підвищувального режиму FSBB в Micro-Cap 12 показані на рисунку 3.6.

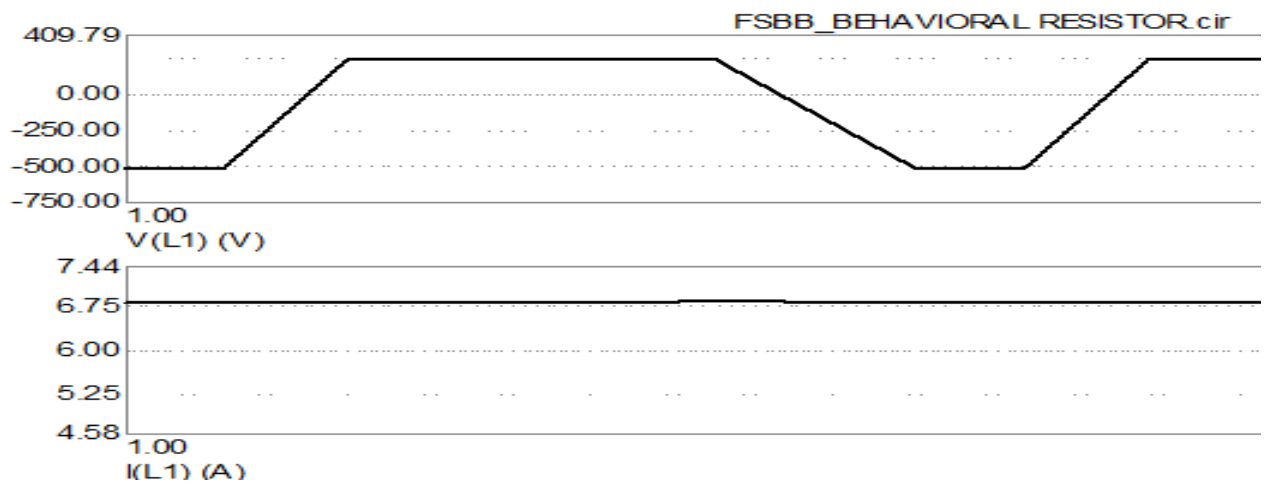


Рисунок 3.8– Результати моделювання FSBB

Ці результати були порівняні з теоретичним розрахунком при коефіцієнті  $d=0.7$ , вхідній напрузі  $V_{in} = 250$  В, виконаним за вищезазначеними формулами. Існує похибка у визначенні напруги індуктивності у вимкненому стані 12%, що пов'язано з тим, що при такій великій індуктивності перехідний процес триває кілька секунд. Струм індуктивності визначається досить точно.

## ВИСНОВКИ

У дипломній роботі проведено комплексне дослідження сучасних енергоефективних систем живлення, а також проаналізовано особливості їх застосування у мікросистемних та кібер-фізичних пристроях. На основі проведеного аналізу тенденцій, теоретичного огляду та комп'ютерного моделювання сформульовано такі основні висновки.

По-перше, виявлено, що розвиток імпульсних джерел живлення значною мірою зумовлений потребою у підвищенні енергоефективності, зменшенні габаритів та забезпеченні стабільності роботи електронних систем. Підвищення робочої частоти перетворювачів до десятків мегагерц дозволяє суттєво зменшувати індуктивно-ємнісні компоненти, що відкриває можливість реалізації мікроіндуктивностей та мікроконденсаторів безпосередньо на кристалі. Це підтверджується сучасними підходами PwrSiP та PwrSoC, які стали ключовими технологіями створення компактних і високоефективних джерел живлення.

По-друге, показано, що кібер-фізичні системи та сенсорні вузли Інтернету речей пред'являють нові вимоги до автономності, енергетичного менеджменту, стабільності та адаптивності джерел живлення. Для таких пристроїв особливе значення мають технології EnergyHarvesting, інтелектуальні вузли керування живленням (PMU) та надкомпактні DC/DC перетворювачі. Вони забезпечують можливість тривалої автономної роботи та створюють передумови для побудови енергонезалежних мікросистем, здатних функціонувати десятиліттями без заміни батарей.

По-третє, досліджено систему живлення C-Type, яка поєднує властивості понижувальних та підвищувальних перетворювачів і забезпечує широку

область регулювання при високому ККД. Переваги таких топологій проявляються у гнучкості керування, двонаправленості енергопередачі, низьких комутаційних втратах та можливості роботи в широкому діапазоні вхідних напруг. Це робить C-Туре перетворювачі перспективними для застосування в автономних сенсорних і кібер-фізичних системах.

По-четверте, у ході роботи розроблено та досліджено комп'ютерні моделі універсальних DC/DC перетворювачів для мікросистемних джерел живлення. Отримані результати моделювання підтверджують працездатність та ефективність обраних схемних рішень, а також демонструють можливість забезпечення стабільної вихідної напруги за різних режимів навантаження. Аналіз перехідних характеристик показав, що правильний вибір індуктивності, ємності та частоти комутації є ключовим фактором підвищення ККД і зменшення пульсацій напруги.

По-п'яте, встановлено, що подальший розвиток систем живлення для кібер-фізичних пристроїв буде пов'язаний із такими технологіями, як використання GaN та SiC напівпровідників, впровадження алгоритмів штучного інтелекту для адаптивного керування енергоспоживанням, інтеграція магнітних компонентів на кремнії та збільшення ступеня інтеграції енергетичних модулів у структурах типу System-on-Chip.

Загалом робота підтверджує, що енергоефективні мікросистемні джерела живлення є критичним елементом сучасних технологій, а вдосконалення їх структури, елементної бази та алгоритмів керування є важливим кроком у розвитку кібер-фізичних систем, IoT-пристроїв та автономних сенсорних мереж. Отримані результати можуть бути використані для розробки компактних, високоефективних та надійних систем живлення нового покоління.

Додатково в роботі розроблено математичну модель універсального buck–boost DC/DC-перетворювача, яка дозволяє описувати його динамічну поведінку

в режимах підвищення та пониження напруги. Модель побудована з використанням малосигнального підходу та може застосовуватись для аналізу стійкості, перехідних процесів і синтезу системи керування. Отримані результати підтверджують доцільність використання розробленої моделі під час проєктування енергоефективних мікросистемних джерел живлення для кіберфізичних та IoT-пристроїв.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. **Erickson R. W.**, Maksimović D. *Fundamentals of Power Electronics*. – 3rd ed. – New York: Springer, 2020. – 1080 p.
2. **Mohan N.**, Undeland T., Robbins W. *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*. – Hoboken: Wiley, 2019. – 832 p.
3. **Rashid M. H.** *Power Electronics: Circuits, Devices and Applications*. – 4th ed. – Harlow: Pearson, 2014. – 912 p.
4. **Hart D. W.** *Power Electronics*. – New York: McGraw-Hill, 2011. – 480 p.
5. **Millán J.**, Godignon P., Perpiñà X. et al. A survey of wideband-gap semiconductor power devices // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2014. – Vol. 29, No. 5. – P. 2155–2163.
6. **Basso C.** *Switch-Mode Power Supplies: SPICE Simulations and Practical Designs*. – New York: McGraw-Hill, 2008. – 874 p.
7. **Gungor V. C.**, Sahin D., Kocak T. et al. Cyber-physical systems and smart applications // *IEEE Systems Journal*. – 2018. – Vol. 12, No. 3. – P. 2381–2394.
8. **Lee E. A.** *Cyber-Physical Systems: Design Challenges* // *IEEE International Symposium on Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing*. – 2008. – P. 363–369.
9. **Makowski M.**, Maksimović D. *Switched-capacitor DC–DC converters: A survey* // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2019. – Vol. 34, No. 6. – P. 4985–5000.
10. **Seeman M. D.** *A Design Methodology for Switched-Capacitor DC–DC Converters*: PhD dissertation. – Berkeley: University of California, 2009. – 210 p.

11. **Ben-Yaakov S.** Switched-capacitor converters // Power Electronics Handbook. – Elsevier, 2018. – P. 873–915.
12. **Steyaert M., Wens M.** Integrated Switched-Capacitor DC–DC Converters. – Cham: Springer, 2016. – 220 p.
13. **Middlebrook R. D.** Small-signal modeling of power converters // IEEE Power Electronics Specialists Conference. – 1976. – P. 11–20.
14. **Middlebrook R. D., Ćuk S. A.** General unified approach to modelling switching converters // IEEE Power Electronics Specialists Conference. – 1977. – P. 18–34.
15. **Vorperian V.** Simplified analysis of PWM converters using the model of the PWM switch // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 1990. – Vol. 26, No. 3. – P. 490–505.
16. **Vasylenko O. V., Snizhnoi G. V.** Adaptive model of the four-switch buck-boost converter // *Electrical Engineering & Power Engineering*. – 2024. – No. 4. – P. 36–47. – DOI: 10.15588/1607-6761-2024