

**Міністерство освіти і науки України**  
**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу**  
**Факультет інформаційних технологій**  
**Кафедра інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем**

**Радченко Ярослав Русланович**

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 621.311.243:621.314:681.51

**МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА**

**Розроблення МРРТ-контролера та системи автоматичного позиціонування  
сонячної панелі**

(назва роботи)

**Комп'ютеризовані системи управління та автоматика**

(назва освітньої програми)

**174-Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка**

(шифр і назва спеціальності)

**Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і  
текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:**

Здобувач освітнього ступеня \_\_\_\_\_ **Я.Р. Радченко**  
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник \_\_\_\_\_ **Еліяшів Олег Миронович, к.т.н.**  
(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

**Допущено до захисту**  
Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ **Заміховський Л.М.**  
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

**Івано-Франківськ – 2026**





## РЕФЕРАТ

Розрахунково-пояснювальна записка: 88 сторінок, 35 малюнків, 4 таблиці, 24 посилань.

Об'єктом дослідження є процеси перетворення сонячної енергії в електричну, принципи роботи MPPT-контролерів та систем автоматичного позиціонування сонячних панелей, що забезпечують максимальну ефективність у умовах змінної інсоляції.

Мета роботи – розроблення MPPT-контролера та системи автоматичного позиціонування сонячної панелі з використанням мікроконтролерних технологій, DC-DC перетворювачів та гібридного трекера для підвищення енергетичної ефективності автономних систем відновлюваної енергетики.

У першому розділі роботи проведено всебічний аналіз принципів роботи MPPT-контролерів, включаючи огляд алгоритмів P&O, IncCond та Fuzzy Logic, їх переваг та недоліків при швидких змінах освітленості.

У другому розділі здійснено детальний опис функціональних схем: перетворювача напруг з використанням FM9836 для 5 В, TPS62046 для 3,3 В та LM2621 для регульованої напруги; сонячного трекера гібридного типу на базі мікроконтролера Atmega8, сервоприводів SG90, GPS-модуля Neo-6M та фотодатчиків. Проведено аналіз принципів роботи компонентів, алгоритмів відстеження та інтеграції з MPPT.

У третьому розділі проведено комплексний аналіз розроблення друкованої плати в P-CAD 2006, монтажу компонентів та готової плати. Виконано опис роботи пристрою з тестуванням напруг. Проаналізовано переваги (компактність, гнучкість, автономність) та недоліки (обмежена потужність, залежність від освітлення), перспективи розвитку (IoT-інтеграція, вдосконалення алгоритмів, масштабування).

**СОНЯЧНА ЕНЕРГІЯ, MPPT-КОНТРОЛЕР, АЛГОРИТМ, СОНЯЧНИЙ ТРЕКЕР, DC-DC ПЕРЕТВОРЮВАЧ, СТАБІЛІЗАТОР НАПРУГИ.**

## **ABSTRACT**

Solving and explanatory note: 8 pages, 35 figures, 4 tables, 24 references.

The object of the study is the processes of converting solar energy into electricity, the principles of operation of MPPT controllers and automatic positioning systems for solar panels, which ensure maximum efficiency in conditions of variable insolation.

The purpose of the work is to develop an MPPT controller and an automatic positioning system for a solar panel using microcontroller technologies, DC-DC converters and a hybrid tracker to increase the energy efficiency of autonomous renewable energy systems.

The first section of the work provides a comprehensive analysis of the principles of operation of MPPT controllers, including a review of the P&O, IncCond and Fuzzy Logic algorithms, their advantages and disadvantages during rapid changes in illumination.

The second section provides a detailed description of the functional circuits: voltage converter using FM9836 for 5 V, TPS62046 for 3.3 V and LM2621 for regulated voltage; hybrid solar tracker based on Atmega8 microcontroller, SG90 servos, Neo-6M GPS module and photosensors. The principles of operation of components, tracking algorithms and integration with MPPT are analyzed.

In the third section, a comprehensive analysis of the development of the printed circuit board in P-CAD 2006, the assembly of components and the finished board is carried out. The operation of the device with voltage testing is described. The advantages (compactness, flexibility, autonomy) and disadvantages (limited power, dependence on lighting), development prospects (IoT integration, algorithm improvement, scaling) are analyzed.

**SOLAR ENERGY, MPPT CONTROLLER, ALGORITHM, SOLAR TRACKER, DC-DC CONVERTER, VOLTAGE STABILIZER.**

## ЗМІСТ

	с.
ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ .....	9
ВСТУП .....	10
1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА СИСТЕМ ФУНКЦІОНУВАННЯ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ .....	15
1.1 Переваги і недоліки сонячної енергетики .....	15
1.2 Будова та принцип роботи сонячних панелей .....	19
1.3 Аналіз сучасних систем позиціонування сонячних панелей і МРРТ-трекерів .....	26
2 РОЗРОБЛЕННЯ МРРТ-КОНТРОЛЕРА ТА СИСТЕМИ ПОЗИЦІОНУВАННЯ .....	36
2.1 Методи позиціонування сонячних панелей.....	36
2.2 Аналіз принципів роботи МРРТ-контролера .....	39
2.3 Розроблення функціональної схеми системи .....	44
2.4 Вибір моделі МРРТ-контролера .....	50
2.5 Вибір DC-DC перетворювачів .....	59
2.6 Вибір Вибір GPS-модуля .....	66
3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРОБЛЕННЯ МРРТ-КОНТРОЛЕРА ТА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ .....	71
3.1 Аналіз розробки друкованої плати .....	71
3.2 Аналіз монтажу компонентів друкованої плати .....	75
3.2 Опис роботи пристрою і системи в цілому .....	78
ВИСНОВКИ .....	84
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА .....	85
БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА .....	88

					КРМ.АКСм-19.00.00.000ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	Розроблення МРРТ- контролера та системи автоматичного позиціону- вання сонячної панелі	Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Радченко						
Перев.		Еліяшів					8	88
Н. контр.		Возний				ІФНТУНГ гр.АКСм-24-1		
Затв.		Заміховський						

## ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

ВАХ	– вольт-амперна характеристика
ДП	– друкована плата
МК	– мікроконтролер
ПЗ	– програмне забезпечення
СЕ	– сонячна енергія
СП	– сонячна панель
ФС	– функціональна схема
ШІ	– штучний інтелект
MPPT	– Maximum Power Point Tracking
GPS	– Global Positioning System

					КРМ.АКСм-19.00.00.000ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

## ВСТУП

У сучасному світі енергетична криза та екологічні проблеми набувають все більшої гостроти, що змушує людство активно шукати альтернативні джерела енергії, які б були стійкими та менш шкідливими для довкілля. Сонячна енергетика виділяється серед інших напрямків як один з найбільш перспективних, оскільки сонячне випромінювання є невичерпним ресурсом, що не призводить до забруднення атмосфери та доступний практично в будь-якій точці планети. Ефективність сонячних панелей, однак, залежить від низки факторів, включаючи інтенсивність сонячного світла, температуру навколишнього середовища, кут нахилу панелі та інші зовнішні умови. Для оптимізації вихідної потужності застосовуються технології відстеження точки максимальної потужності (Maximum Power Point Tracking – MPPT) та системи автоматичного позиціонування, які дозволяють динамічно коригувати орієнтацію панелі відносно Сонця, тим самим підвищуючи загальну продуктивність системи.

Розроблення MPPT-контролера та системи автоматичного позиціонування сонячної панелі є актуальним завданням у сфері автоматизації та робототехніки, оскільки сприяє значному підвищенню ефективності сонячних енергетичних систем. Згідно з даними Міжнародного енергетичного агентства (IEA) у звіті "Renewables 2025", частка відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячної, продовжує зростати, хоча прогноз на 2025–2030 роки скориговано на 5% вниз через зниження темпів додавання сонячних потужностей. Тим не менш, фотоелектрика (PV) залишається домінуючим сегментом, представляючи значну частину нових потужностей. У глобальному масштабі до 2050 року сонячна енергія може становити до 25% від загального виробництва електроенергії, як зазначається в звітах IEA. В Україні, де середня інсоляція становить 1200-1400 кВт·год/м<sup>2</sup> на рік,

					<i>KPM.AKCM-19.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

потенціал сонячної енергії є значним. За оцінками, країна може досягти 80 ГВт потужності сонячних установок за умови впровадження відповідних політик, а в першій половині 2025 року вже додано щонайменше 500 МВт сонячних потужностей. Плани децентралізації енергетики передбачають зростання сонячної генерації до 12,2 ГВт, що на 77,5% більше поточного рівня, сприяючи енергетичній незалежності та зменшенню залежності від традиційних джерел, таких як викопне паливо. Існуючі рішення, однак, часто виявляються дорогими, складними в реалізації або недостатньо адаптованими до місцевих кліматичних умов, що підкреслює актуальність досліджень для спеціальності "Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка". Крім того, у 2025 році спостерігається помітний сплеск у розвитку відновлюваної енергетики в Україні, з акцентом на вітрову та сонячну генерацію, що пов'язано з післявоєнними планами реконструкції та інвестиціями в зелену енергетику.

Розвиток технологій МРРТ-контролерів також демонструє прогрес: за прогнозами, до 2025 року МРРТ-контролери займуть близько 60% ринку сонячних зарядних пристроїв завдяки своїй здатності підвищувати ефективність збору енергії. Нові алгоритми, що включають машинне навчання та прогнозне моделювання, дозволяють швидше та точніше відстежувати точку максимальної потужності, особливо в умовах змінної освітленості. Аналогічно, системи позиціонування сонячних панелей, такі як одно- та двовісні трекери, можуть підвищувати продуктивність на 10-20% для одноосьових і до 30-40% для двоосьових систем порівняно з фіксованими установками, з більшим ефектом у літній період (40-50%) та меншим взимку (10-20%). Ці покращення роблять тему дослідження не тільки теоретично важливою, але й практично необхідною для оптимізації сонячних систем в умовах обмежених ресурсів [1].

Мета мігістерської роботи полягає в розробленні МРРТ-контролера та системи автоматичного позиціонування сонячної панелі з метою підвищення

					<i>KPM.AKCM-19.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ефективності перетворення сонячної енергії в електричну. Ця мета спрямована на створення інтегрованої системи, яка б мінімізувала втрати енергії та адаптувалася до реальних умов експлуатації. Для досягнення цієї мети поставлено такі завдання:

- проаналізувати існуючі методи відстеження точки максимальної потужності, включаючи класичні алгоритми, такі як Perturb and Observe (P&O) та Incremental Conductance (IC), а також сучасні підходи з використанням штучного інтелекту, та алгоритми позиціонування сонячних панелей, враховуючи сенсорні та астрономічні методи;

- розробити математичну модель сонячної панелі та системи позиціонування з урахуванням зовнішніх факторів, таких як варіації сонячного випромінювання, температура, вітер та географічне положення, використовуючи рівняння для розрахунку потужності та ефективності;

- створити апаратну частину MPPT-контролера на базі крокконтролера з інтеграцією датчиків напруги, струму, температури та позиції, забезпечуючи стійкість до перешкод та високу точність вимірювань;

- реалізувати програмне забезпечення для керування системою, включаючи алгоритми MPPT (наприклад, P&O або IC з елементами адаптації) та автоматичного відстеження Сонця на основі комбінації сенсорних даних і астрономічних розрахунків;

- провести моделювання та експериментальну перевірку розробленої системи для оцінки її ефективності в різних умовах, порівнюючи з фіксованими панелями;

- оцінити економічну доцільність впровадження запропонованої системи в реальних умовах, включаючи розрахунок окупності, витрат на компоненти та потенційного зменшення вуглецевого сліду.

Об'єктом дослідження є процеси перетворення сонячної енергії в електричну з використанням сонячних панелей, включаючи фізичні та електричні характеристики систем. Предметом дослідження є MPPT-

					<i>KPM.AKCM-19.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

контролер та система автоматичного позиціонування сонячної панелі як інтегрована автоматизована система, що поєднує апаратні та програмні компоненти для оптимізації енерговиробництва.

Методи дослідження. У роботі застосовуються теоретичні методи аналізу літературних джерел для вивчення сучасних тенденцій у сонячній енергетиці, математичного моделювання, а також експериментальні методи для тестування прототипу в лабораторних та польових умовах. Для реалізації апаратної частини використовуються мікроконтролери AtMega, датчики (фотодіоди для виявлення світла, акселерометри для орієнтації, енкодери для точного позиціонування), а також приводи (серводвигуни або крокові двигуни) для механічного переміщення панелі. Програмне забезпечення розробляється на мовах C/C++ з інтеграцією бібліотек для обробки сигналів, фільтрації шумів та реалізації адаптивних алгоритмів. Додатково, для оцінки ефективності застосовуються статистичні методи аналізу даних, отриманих з експериментів, з метою порівняння з існуючими системами.

Наукова новизна роботи полягає в інтеграції МРРТ-контролера з системою двовісного позиціонування сонячної панелі на базі адаптивних алгоритмів, що враховують реальні кліматичні умови України, такі як змінна хмарність та сезонні коливання. Пропонована система використовує комбінацію сенсорного відстеження (на основі фотодіодів) та астрономічних розрахунків (з урахуванням географічних координат та часу доби) для точного позиціонування, що дозволяє підвищити ефективність на 20-40% порівняно з фіксованими панелями. Крім того, впровадження елементів машинного навчання в алгоритми МРРТ забезпечує швидшу адаптацію до динамічних умов, що є новим підходом у контексті локальних застосувань.

Практичне значення результатів. Розроблена система може бути застосована в автономних сонячних установках для приватних домогосподарств, фермерських господарств, малих підприємств або навіть критичної інфраструктури, як-от перші сонячні проекти для муніципальних

					<i>KPM.AKCM-19.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

об'єктів в Україні, завершені у 2025 році. Вона сприяє зниженню витрат на електроенергію, зменшенню вуглецевого сліду та підвищенню стійкості енергосистем. Результати роботи можуть бути використані в освітньому процесі для вивчення курсів з автоматизації, відновлюваної енергетики та комп'ютерно-інтегрованих технологій, а також як основа для подальших розробок у промисловості.

					<i>КРМ.АКСм-19.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						14
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>		

# 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА СИСТЕМ ФУНКЦІОНУВАННЯ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

## 1.1 Переваги і недоліки сонячної енергетики

Сонячна енергетика, як один із ключових напрямків відновлюваної енергії, відіграє важливу роль у сучасному світі, особливо в умовах зростання енергетичних потреб та екологічних викликів. Вона базується на перетворенні сонячного випромінювання в електричну енергію за допомогою фотоелектричних елементів, таких як сонячні панелі. У контексті магістерської роботи, присвяченої розробленню МРРТ-контролера та системи автоматичного позиціонування сонячної панелі, аналіз переваг і недоліків сонячної енергетики є необхідним для обґрунтування актуальності теми. Це дозволяє зрозуміти, чому такі технології, як МРРТ та автоматичне позиціонування, є критичними для подолання обмежень і максимізації переваг сонячної енергії. У 2025 році сонячна енергетика продовжує демонструвати динамічний розвиток, з урахуванням глобальних тенденцій та специфіки України, де війна та енергетична криза стимулюють перехід до децентралізованих джерел енергії.

Сонячна енергія має низку значних переваг, які роблять її привабливою для впровадження як на індивідуальному, так і на промисловому рівні. Ці переваги охоплюють екологічні, економічні та соціальні аспекти, сприяючи стійкому розвитку.

По-перше, сонячна енергія є відновлюваним і стійким джерелом. Сонячне випромінювання є невичерпним ресурсом, доступним протягом мільярдів років, на відміну від викопних палив, таких як вугілля чи нафта, запаси яких обмежені. У 2025 році глобальна потужність сонячних установок продовжує зростати, і за даними експертів, сонячна енергія може забезпечити

					<i>КРМ.АКСм-19.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

значну частку світового енергобалансу. В Україні, де середня інсоляція становить 1200-1400 кВт·год/м<sup>2</sup> на рік, цей потенціал особливо високий. Наприклад, у 2025 році в країні додано щонайменше 800 МВт нових сонячних потужностей, що сприяє децентралізації енергосистеми та зменшенню залежності від централізованого постачання, яке стало вразливим через військові дії.

По-друге, використання сонячної енергії значно знижує рахунки за електроенергію. Власники сонячних панелей генерують власну електрику, зменшуючи потребу в покупці від комунальних компаній. За оцінками 2025 року, середня домогосподарство може заощадити близько 1500 доларів США на рік, а за 25 років експлуатації системи – до 57 000 доларів, залежно від регіону та розміру установки. В Україні, де енергетична криза призвела до зростання тарифів, сонячні панелі дозволяють домогосподарствам та підприємствам скоротити витрати на 70%. Це особливо актуально для критичної інфраструктури, де сонячні проекти, завершені у 2025 році, забезпечують стабільне постачання електрики без залежності від мережі.

По-третє, сонячні системи вимагають низьких витрат на обслуговування. Панелі не мають рухомих частин, що мінімізує ризик поломок, а дощ часто очищає поверхню від пилу. Рекомендується щорічний огляд, але загальні витрати на утримання залишаються мінімальними. Гарантії виробників зазвичай покривають 25-30 років експлуатації, що робить інвестиції надійними. У контексті України, де ресурси обмежені через війну, низькі експлуатаційні витрати роблять сонячну енергетику ідеальним рішенням для віддалених районів.

Четвертою перевагою є екологічна дружність. Сонячні панелі не виробляють шкідливих викидів, таких як вуглекислий газ чи тверді частинки, на відміну від традиційних джерел. Це сприяє зменшенню забруднення повітря та боротьбі зі зміною клімату. У глобальному масштабі перехід на сонячну енергетику може скоротити викиди на мільйони тонн щорічно. В

					<i>KPM.AKCM-19.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Україні сонячна енергія підтримує здоров'я населення, зменшуючи забруднення від вугільних станцій, і є ключовим елементом для відновлення післявоєнної енергетики, як зазначається в звітах про роль відновлюваних джерел у кризових умовах.

П'ятою перевагою є доступність стимулів та субсидій. У багатьох країнах, включаючи Україну, уряди пропонують податкові кредити, гранти та програми, що покривають до 30% витрат на установку. У 2025 році федеральні програми в США та аналогічні в ЄС стимулюють зростання, а в Україні державні ініціативи спрямовані на досягнення 12% частки відновлюваних джерел у споживанні енергії. Це робить сонячну енергетику доступнішою для малих користувачів.

Шостою перевагою є зростання вартості нерухомості. Будинки з сонячними панелями продаються на 5-10% дорожче, оскільки покупці бачать у них довгострокову економію. Аналіз ринку показує, що в середньому це додає 6,9% до ціни. В Україні, де енергетична незалежність стає пріоритетом, такі інвестиції підвищують привабливість об'єктів для інвесторів.

Сьомою перевагою є енергетична незалежність. Сонячні системи дозволяють зменшити залежність від імпорту енергоносіїв та коливань цін. На національному рівні це знижує геополітичні ризики. В Україні сонячна енергетика стала "маяком надії" під час війни, забезпечуючи енергію в умовах пошкоджень мережі та підтримуючи критичну інфраструктуру.

Восьмою перевагою є масштабованість технології. Сонячні системи можна адаптувати від маленьких домашніх установок до великих ферм, що робить їх універсальними. У 2025 році ефективність панелей зросла до 20-23%, а вартість зменшилася на 60% порівняно з 2010 роком.

Дев'ятою перевагою є створення робочих місць у зеленому секторі. Розвиток сонячної енергетики стимулює зайнятість у виробництві, монтажі та обслуговуванні. Глобально це мільйони робочих місць, а в Україні – можливість для післявоєнного відновлення економіки.

					<i>КРМ.АКСм-19.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Десятою перевагою є інтеграція з системами зберігання енергії. Сучасні батареї дозволяють накопичувати надлишок для використання вночі чи в похмуру погоду, підвищуючи надійність.

Попри численні переваги, сонячна енергетика має й недоліки, які потребують технологічних рішень, таких як МРРТ-контролери та системи позиціонування, для їх мінімізації.

По-перше, висока початкова вартість. Установка системи в 2025 році коштує в середньому 21600-29649 доларів до застосування стимулів, що вимагає значних інвестицій. В Україні географічне розташування може збільшити витрати через нижчу інсоляцію в деяких регіонах, хоча довгострокова окупність компенсує це.

По-друге, залежність від погоди. Виробництво енергії зменшується в похмуру погоду чи взимку, роблячи джерело інтермітивним. У Україні сезонні коливання вимагають додаткових рішень, як батареї, вартість яких додає до витрат.

По-третє, обмеження щодо даху та місця. Не всі дахи підходять – потрібен південний нахил 15-40 градусів, відсутність тіні та міцна конструкція. Для малих ділянок це проблема, а великі ферми вимагають землі, що може впливати на екосистеми.

Четвертим недоліком є екологічний вплив виробництва. Виготовлення панелей включає видобуток матеріалів та викиди, хоча загалом менші, ніж від викопних палив. У 2025 році програми переробки розширюються, але утилізація панелей після 25-30 років залишається викликом, оскільки вони містять метали, як свинець чи кадмій.

П'ятим недоліком є залежність від місцевої політики. Фінансова вигода варіюється залежно від регіону; в менш сприятливих областях інвестиції менш прибуткові. В Україні війна впливає на регуляції, але плани на 25% відновлюваних до 2035 року стимулюють розвиток.

					<i>KPM.AKCM-19.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Шостим недоліком є можливе зростання податків та страхування. Збільшення вартості нерухомості може підвищити податки, хоча існують пільги. Страхові компанії враховують ризики, пов'язані з установками.

Сьомим недоліком є обмежена ефективність перетворення. Панелі перетворюють лише 20-25% сонячного світла в енергію, що вимагає вдосконалень. У роботі це вирішується МРРТ-алгоритмами.

Восьмим недоліком є складність переміщення. Панелі важко транспортувати без додаткових витрат.

Переваги сонячної енергетики, такі як відновлюваність, економія та екологічність, переважають недоліки, особливо з урахуванням технологій оптимізації. У контексті України 2025 року, де сонячна енергія забезпечує резилієнтність, розробка МРРТ-контролера та позиціонування є ключовою для подолання інтермітивності та підвищення ефективності.

## 1.2 Будова та принцип роботи сонячних панелей

Сонячні панелі (фотоелектричні модулі) є основним елементом систем перетворення сонячної енергії в електричну. Вони базуються на фотоелектричному ефекті, відкритому ще у XIX столітті, але масово впроваджені лише у другій половині XX століття. У контексті розроблення МРРТ-контролера та системи автоматичного позиціонування розуміння будови та принципів роботи сонячних панелей є фундаментальним, оскільки саме нелінійні характеристики фотоелектричних елементів зумовлюють необхідність застосування алгоритмів відстеження точки максимальної потужності (Maximum Power Point – МРР) та механізмів оптимальної орієнтації панелі відносно Сонця.

Станом на 2025 рік найпоширенішими залишаються кремнієві сонячні панелі, які займають понад 95% ринку. Існують три основні типи:

					<i>КРМ.АКСм-19.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

монокристалічні, полікристалічні та тонкоплівкові. Монокристалічні панелі виготовляються з єдиного кристала кремнію, мають найвищу ефективність (20-23% у серійному виробництві, до 25% у лабораторних зразках) і характеризуються однорідним темно-синім або чорним кольором. Полікристалічні панелі формуються з багатьох кристалів, мають трохи нижчу ефективність (17-20%), але дешевші у виробництві та впізнаються за характерним «мармуровим» блакитним відтінком. Тонкоплівкові панелі (на основі аморфного кремнію, CdTe, CIGS або органічних сполук) мають ефективність 10-13%, але краще працюють при розсіяному світлі та високих температурах, а також є гнучкими, що розширює сферу застосування.

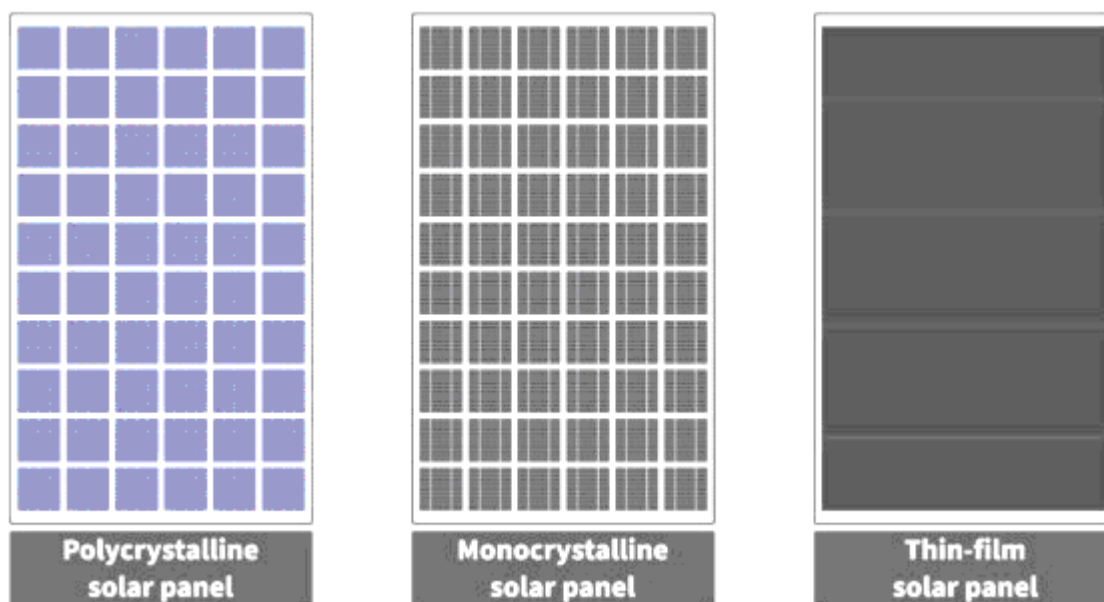


Рисунок 1.1 – Типи сонячних панелей

Переваги та недоліки монокристалічних панелей, переваги:

- найвищий ККД (до 23-27% у 2025 році);
- найкраща продуктивність при низькій та прямій освітленості;
- найдовший термін служби (30-40 років з деградацією <0,5%/рік);
- менша необхідна площа для однакової потужності;

- висока стійкість до високих температур у сучасних модифікаціях (TOPCon, HJT).

Недоліки:

- найвища вартість (хоча різниця зменшилася до 10-15% порівняно з полікристалічними);
- більше енергії витрачається при виробництві (через обрізання круглих злитків);
- чутливість до часткового затінення без оптимізаторів.

Переваги та недоліки полікристалічних панелей, переваги:

- нижча ціна порівняно з монокристалічними (на 10-20%);
- простіший та менш енергоємний процес виробництва;
- менше відходів кремнію при виготовленні.

Недоліки:

- нижчий ККД (17-20%);
- гірша продуктивність при розсіяному світлі та низькій освітленості;
- більша деградація при нагріванні (температурний коефіцієнт гірший на 0,05-0,1%/°C);
- поступово витісняються з ринку (частка <5% у 2025 році).

Переваги та недоліки тонкоплівкових панелей, переваги:

- найнижча вартість виробництва;
- гнучкість та мала вага (можна монтувати на вигнуті поверхні);
- найкраща продуктивність при високих температурах та розсіяному світлі (коефіцієнт температури кращий на 20-30%);
- менша залежність від кута падіння променів.

Недоліки:

- найнижчий ККД (10-13%, максимум 18-20% у CIGS);
- найбільша необхідна площа (у 1,8-2,2 раза більше);
- швидша деградація (1-2%/рік);
- деякі види містять токсичні матеріали (кадмій у CdTe);

					КРМ.АКСМ-19.00.00.000ПЗ	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

- коротший гарантійний термін (15-25 років).

У 2025 році ринок майже повністю перейшов на монокристалічні панелі (понад 95%), особливо з технологіями half-cell, PERC, TOPCon та гетероструктурними (HJT), які поєднують високу ефективність та прийнятну ціну.

Типова сонячна панель складається з кількох шарів, які забезпечують механічний захист, електричну ізоляцію та максимальне пропускання світла до фотоелектричних елементів, рис. 1.2.

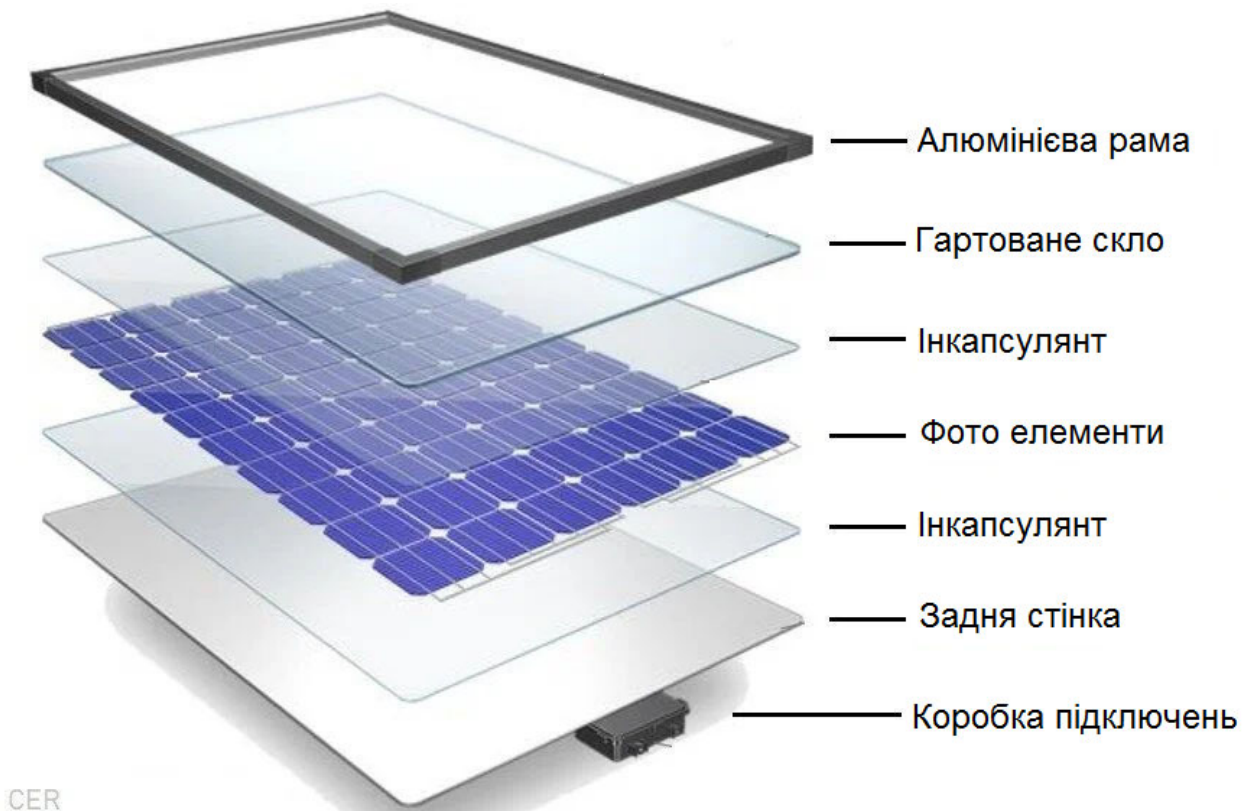


Рисунок 1.2 – Будова сонячної панелі

Загартоване скло товщиною 3,2-4 мм з низьким вмістом заліза (low-iron glass) – забезпечує коефіцієнт пропускання світла понад 91% і механічний захист від граду, вітру та снігу.

Етиленвінілацетатна плівка (EVA) – прозорий енкапсулянт, який фіксує фотоелементи та захищає їх від вологи й кисню.

					КРМ.АКСм-19.00.00.000ПЗ	Арк.
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Фотоелектричні елементи (сонячні комірки) – основний функціональний шар розміром зазвичай 156×156 мм, 166×166 мм або 182×182 мм (стандарти М6, М10, М12 у 2025 році). Елементи з'єднуються послідовно-паралельно для досягнення потрібної напруги та струму.

Задній захисний шар (backsheet) – багатошарова полімерна плівка (наприклад, ТРТ – Tedlar-PET-Tedlar), що забезпечує електричну ізоляцію та захист від вологи. Алюмінієва рама – забезпечує жорсткість і кріплення. Розподільна коробка (junction box) з діодами байпаса (зазвичай 3-4 шт.) та конекторами МС4.

Сучасні панелі типу half-cell (півкоміркові), PERC (Passivated Emitter and Rear Cell), bifacial (двосторонні), TOPCon або HJT мають додаткові шари пасивації та антирефлексне покриття, що підвищує ефективність на 2-5% порівняно з класичними конструкціями.

Основою панелі є сонячний елемент – напівпровідниковий р-п перехід, зазвичай на основі кремнію. Верхній шар легований фосфором (п-тип), нижній – бором (р-тип). Між ними формується збіднена область з вбудованим електричним полем.

При попаданні фотона з енергією більшою за ширину забороненої зони кремнію (1,12 eV) відбувається генерація електрон-діркової пари. Вбудоване поле р-п переходу розділяє носії заряду: електрони рухаються до п-шару, дірки – до р-шару. При підключенні зовнішнього навантаження виникає фотострум, рис.1.3.

Передня поверхня елемента має пірамідальну текстуру та антирефлексне покриття (SiNx), що зменшує відбиття світла до 2-3%. Задня поверхня в PERC-технології покрита шаром Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> для зменшення рекомбінації.

					<i>KPM.AKCM-19.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

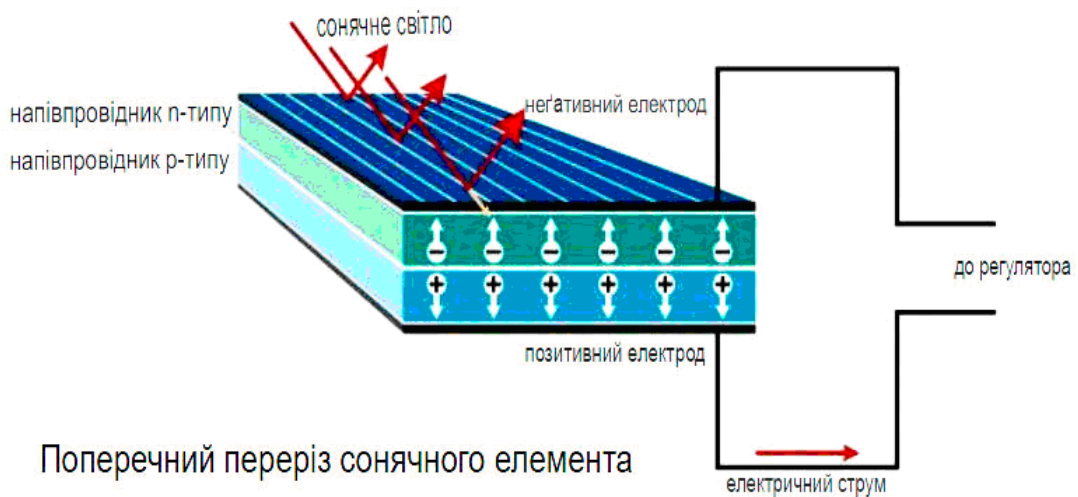


Рисунок 1.3 – Будова сонячного елемента

Найпоширенішою є однодіодна модель (модель з п'ятьма параметрами), яка включає, рис.1.4:

- джерело струму  $I_{ph}$  – фотогенерований струм, пропорційний освітленості.
- діод  $D$  – враховує рекомбінацію в p-n переході.
- послідовний опір  $R_s$  ( $0,001-0,01 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$ ) – опір контактів і кремнію.
- паралельний опір  $R_{sh}$  ( $100-10000 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$ ) – враховує струми витоку через дефекти.

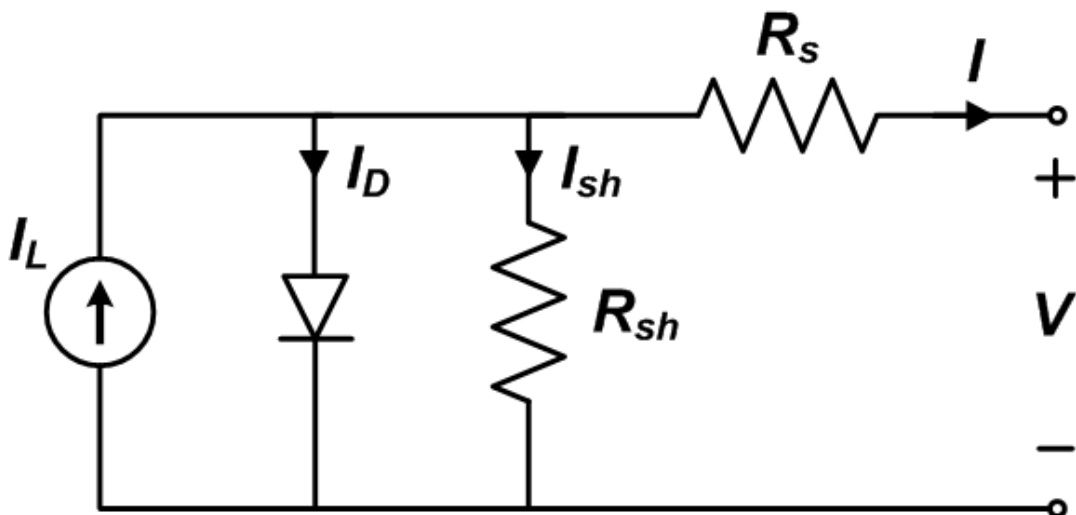


Рисунок 1.4 – Модель сонячного елемента

Рівняння моделі:

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} = I_{ph} - I_0 \times (e^{(q(V + I \times R_s)/(k \times T \times n))} - 1) - (V + I \times R_s)/R_{sh} \quad (1.1)$$

де  $I_0$  – зворотний струм насичення діода,

$q$  – заряд електрона,

$k$  – стала Больцмана,

$T$  – температура,

$n$  – коефіцієнт ідеальності діода.

Вольт-амперна характеристика (ВАХ) сонячної панелі має характерну нелінійну форму з трьома ключовими точками:

- точка короткого замикання ( $I_{sc}$ ) – максимальний струм при  $V=0$ .

- точка холостого ходу ( $V_{oc}$ ) – максимальна напруга при  $I=0$ .

- точка максимальної потужності (МРР) – точка, де добуток  $I \times V$  є максимальним.

Потужність  $P = I \times V$  досягає максимуму в коліні ВАХ. Положення МРР залежить від освітленості ( $G$ ) та температури ( $T$ ):

Зі збільшенням  $G$ , струм  $I_{sc}$  зростає майже лінійно,  $V_{oc}$  – логарифмічно.

Зі збільшенням  $T$ ,  $V_{oc}$  зменшується (температурний коефіцієнт  $\approx -0,3 \dots -0,4\%/^{\circ}\text{C}$ ),  $I_{sc}$  злегка зростає.

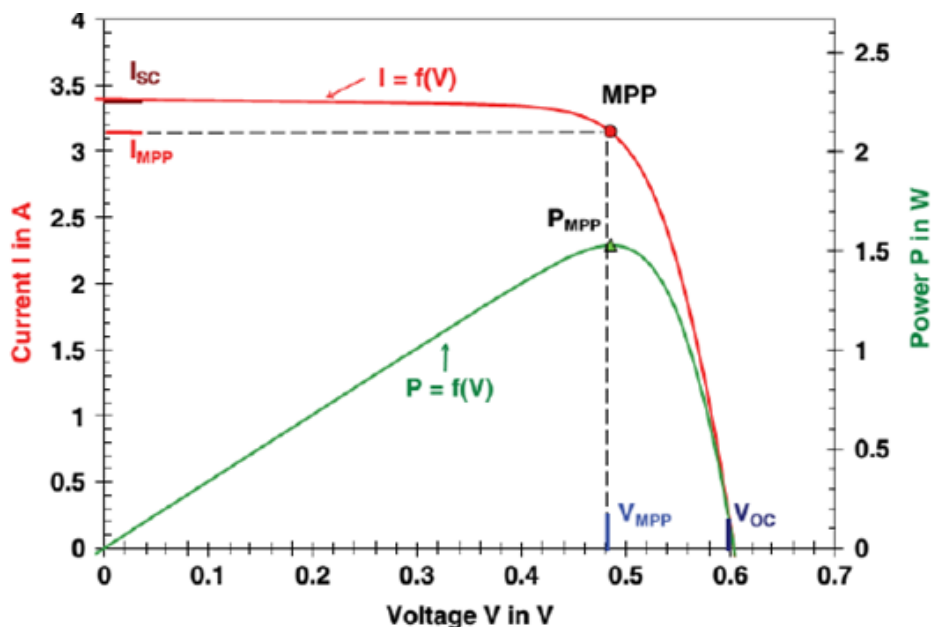


Рисунок 1.5 – Вольт-амперна характеристика сонячної панелі

Фактор заповнення  $FF = (P_{mpp}) / (I_{sc} \times V_{oc})$  характеризує якість елемента і становить 0,75-0,85 для сучасних панелей.

Вплив зовнішніх факторів на характеристики. Освітленість – основний параметр. При  $G=1000 \text{ Вт/м}^2$  (STC – Standard Test Conditions) панель видає номінальну потужність. При зменшенні освітленості MPP зміщується в бік нижчих напруг.

Температура – при нагріванні понад  $25^\circ\text{C}$  потужність падає приблизно на  $0,4\%/^\circ\text{C}$  через зменшення  $V_{oc}$ .

Спектральний склад світла – оптимальний для кремнію в діапазоні 400-1100 нм.

Кут падіння променів – за законом косинуса, при відхиленні від перпендикуляра потужність зменшується пропорційно  $\cos\theta$ .

Саме через сильну залежність MPP від зовнішніх умов (особливо освітленості та температури) і необхідність постійного підтримання роботи в цій точці виникає потреба в МРРТ-контролерах, які динамічно змінюють опір навантаження.

Розуміння будови та принципів роботи сонячних панелей дозволяє обґрунтувати вибір математичних моделей для моделювання системи, розробки алгоритмів МРРТ та механізмів автоматичного позиціонування. У наступних розділах ці знання будуть використані для створення апаратно-програмного комплексу, що забезпечить максимальну ефективність енерговидобутку в реальних умовах експлуатації.

### **1.3 Аналіз сучасних систем позиціонування сонячних панелей і МРРТ-трекерів**

Системи автоматичного позиціонування сонячних панелей (сонячні трекари) відіграють ключову роль у підвищенні ефективності

					<i>KPM.AKCM-19.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		26

фотоелектричних систем завдяки постійній орієнтації панелей перпендикулярно до сонячних променів. За даними Wood Mackenzie та IEA на 2025 рік, застосування трекерів збільшує річне вироблення електроенергії на 15–45 % залежно від типу системи та регіону порівняно з фіксованими установками. В Україні, особливо в південних областях з високою часткою прямої радіації, цей приріст є максимальним [2].

Ринок сонячних трекерів у 2025 році перевищує 10 млрд дол. США, де понад 92 % займають одноосьові системи для великих сонячних ферм. Двоосьові трекери використовуються в малих і середніх установках, де обмежена площа вимагає максимальної продуктивності.

Системи класифікуються за осями обертання (одно- та двоосьові), принципом керування (пасивні, активні з датчиками чи астрономічним алгоритмом) та конструкцією (горизонтальні, нахилені).

**Array Technologies (Nextracker) – модель NX Horizon-XTR.** Лідер ринку 2025 року з часткою  $\approx 28\%$ . Особливості: адаптація до рельєфу до 15 %, алгоритм TrueCapture з ШІ (+2–6 % при хмарності), stow-режим при сильному вітрі. Встановлено понад 120 ГВт. Вартість: 0,08–0,10 USD/Вт, рис.1.5.



Рисунок 1.5 – Модель NX Horizon-XTR

					КРМ.АКСМ-19.00.00.000ПЗ	Арк.
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

**TrinaTracker – модель Vanguard 2P.** Особливості: SuperTrack AI-алгоритм (+3–8 % при змінній хмарності), сумісність з біфациальними панелями та модулями 600+ Вт. Одна з найнижчих цін на ринку (0,07–0,09 USD/Вт), рис.1.6.



Рисунок 1.6 – Модель TrinaTracker Launches New Generation Vanguard 2P

**Eco-Worthy Dual Axis Solar Tracker.** Найпопулярніший серед приватних користувачів, рис.1.7. Керування фотодатчиками та вітровим сенсором, підтримка до 3 кВт панелей. Приріст до 45 %. Вартість даного комплекту становить 480–650 USD.



Рисунок 1.7 – Модель Eco-Worthy Dual Axis Solar Tracker

					<i>KPM.AKCM-19.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		28

**DEGERtracker (Deger Energie, Німеччина).** Пристрій містить патентований сенсор MLD для максимального виявлення світла. Сертифікований приріст +42,8 % (TÜV). Висока точність при хмарності, рис.1.8.



Рисунок 1.8 – Модель DEGERtracker

**Smartflower POP+ (Австрія)** Унікальна конструкція у вигляді "сонячної квітки" з автоматичним складанням та самоочищенням. Потужність до 6,2 кВт, приріст до 40 %. Ідеальна для комерційних об'єктів та приватних будинків, рис.1.9.



Рисунок 1.9 – Модель Smartflower POP+

					КРМ.АКСм-19.00.00.000ПЗ	Арк.
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

В таблиці 1.1 приведені основні характеристики і порівняльні дані кількох трекерів.

Таблиця 1.1 - Порівняльна таблиця серійних трекерів

Виробник, Модель	Тип	Приріст енергії, %	Вартість, USD/Вт	Встановлена потужність, ГВт	Особливості
Array Tech NX Horizon- XTR	Одноосьовий	20–30	0,08–0,10	>120	TrueCapture, адаптація до рельєфу
TrinaTracker Vanguard 2P	Одноосьовий	22–32	0,07–0,09	>60	SuperTrack AI, біфасціальна сумісність
Eco-Worthy Dual Axis	Двоосьовий	35–45	0,45–0,65	– (малі системи)	Доступний, фотодатчики + вітровий захист
DEGERtracker HD	Двоосьовий	40–45	3,2–4,0	>2	Сенсор MLD, найвища точність
Smartflower POP+	Двоосьовий	35–40	≈4,0–4,5	–	Дизайн "квітка", самоочищення

MPPT-контролери малої потужності (від 20 до 60 А, призначені для сонячних систем потужністю від 0,5 до 4 кВт) відіграють ключову роль у сучасних автономних сонячних енергетичних установках. За даними аналітичних звітів Wood Mackenzie та обговорень на форумах DIY Solar Forum (станом на 26.11.2025 р.), продажі таких пристроїв зросли на 45% порівняно з 2024 роком. Це пов'язано з поширенням літій-залізо-фосфатних

(LiFePO<sub>4</sub>) акумуляторів, децентралізацією енергетики в Європі, США та країнах, що розвиваються, а також з необхідністю ефективного збору енергії в умовах змінної сонячної активності. Лідери ринку пропонують моделі з ефективністю понад 99%, широким діапазоном вхідної напруги від сонячних панелей (до 150 В) та інтеграцією з мобільними додатками для моніторингу через Bluetooth або Wi-Fi. Такі контролери забезпечують відстеження точки максимальної потужності з використанням алгоритмів, таких як Perturb and Observe (P&O) або Incremental Conductance (IC), що дозволяє підвищити ефективність перетворення на 15-30% порівняно з PWM-контролерами [3].

У 2025 році акцент робиться на сумісності з літєвими батареями, стійкості до екстремальних температур (від -40°C до +60°C) та інтеграції з системами IoT для віддаленого керування. За відгуками користувачів на Reddit (r/SolarDIY) та YouTube-каналах, як-от Will Prowse (огляд від 22.11.2025 р.), найкращі моделі поєднують високу ефективність з доступною ціною, роблячи їх ідеальними для приватних домогосподарств, фермерських господарств та мобільних установок.

**Victron Energy SmartSolar MPPT 100/50.** Цей контролер є еталоном надійності у 2025 році, з гарантією 5 років і понад 500 тис. проданих одиниць з початку року, рис.1.10. Він використовує алгоритм Ultra-Fast Tracking для швидкого відстеження точки максимальної потужності, що особливо ефективно в умовах часткового затінення панелей (підвищення збору енергії на 5-10%). Технічні характеристики включають вхідну PV-напругу до 100 В, зарядний струм 50 А та підтримку всіх типів акумуляторів з кастомними профілями зарядки через додаток VictronConnect. Перевагою є висока стабільність, відмінна телеметрія (моніторинг у реальному часі), стійкість до екстремальних умов. Недоліком є висока вартість, відсутність вбудованого дисплея (потрібен смартфон). Застосовується у автономних будинках (близько 50% продажів), морські яхти та катери (30%), телекомунікаційні вишки (15%). В Україні цей контролер популярний для систем з резервним

					<i>KPM.AKCM-19.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		31

живленням, оскільки витримує низькі температури та забезпечує стабільну роботу в умовах нестабільної сонячної активності [4].



Рисунок 1.10 – Модель Victron Energy SmartSolar MPPT 100/50

**EG4 MPPT 60A v2.0** (оновлення жовтня 2025 р.) Ця модель визнана "найкращою покупкою 2025 року" за версією оглядача Will Prowse (відео від 22.11.2025 р.), рис.1.11. З ефективністю 99,5%, вона має масивний радіатор, що запобігає перегріву (температура не перевищує 45°C при повному навантаженні), вхідну напругу до 150 В та зарядний струм 60 А. Підтримує LiFePO4 та інші батареї з автоматичним регулюванням. Перевагою є оптимальне співвідношення ціна/якість, AI-оптимізація для хмарної погоди, вбудований LCD-дисплей. Недоліком є менш інтуїтивний додаток порівняно з Victron. Застосовується в домашніх автономних системах потужністю 1-3 кВт (65% продажів), малі ферми та теплиці (25%), де потрібен швидкий заряд акумуляторів. В українських умовах ця модель ідеальна для замських будинків, оскільки забезпечує ефективний збір енергії в регіонах з середньою інсоляцією (1200-1400 кВт·год/м<sup>2</sup> на рік).



Рисунок 1.11 – Модель EG4 MPPT 60A v2.0

					<i>KPM.AKCM-19.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		32

**Renogy Rover 60A Li** (оновлення з RS485 у листопаді 2025 р.) Модель орієнтована на початківців, з автоматичним виявленням LiFePO4-акумуляторів, вхідною напругою 100 В та струмом 60 А, рис.1.12. Ефективність 99%, з підтримкою Bluetooth для прогнозу виробництва енергії. Перевагою є легке налаштування, RS485 для інтеграції з іншими пристроями. Недоліком є нагрівання при повному навантаженні, потребує додаткового охолодження. Застосування: Van life та фургони (55% продажів), човни (25%), портативні сонячні станції (15%). В мобільних системах України, як-от для кемпінгу чи аварійного живлення, ця модель забезпечує гнучкість завдяки компактності та швидкому заряду.



Рисунок 1.12 – Модель Renogy Rover 60A Li

**EPEVER Tracer 6415BN.** Бюджетний лідер з ефективністю 99,2%, вхідною напругою 150 В та струмом 40 А. У комплекті MT50-дисплей для моніторингу. Перевагою є низька ціна, Bluetooth-модуль. Недоліки - гучний вентилятор, менш зручний додаток. Застосування: Бюджетні автономні системи в країнах, що розвиваються (60%), теплиці та курники (30%). В Україні підходить для дач та малих господарств, де потрібен простий пристрій без надмірних функцій, рис.1.13.

					<i>KPM.AKCM-19.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		33



Рисунок 1.12 – Модель Epever 60A Solar Charge Controller

**PowMr MPPT 60A v3** (листопад 2025 р.) Найдешевша модель з ефективністю 98,7%, напругою 150 В та струмом 60 А, рис.1.13. Переваги: доступність, базовий LCD. Недоліки: менша надійність, обмежений моніторинг. Застосування: тестові прототипи (40%), ультрабюджетні портативні системи (50%). В.



Рисунок 1.13 – Модель PowMr 60A MPPT Solar Charge Controller 12V

**Morningstar TriStar 45A.** Професійна модель з ефективністю 99,4%, напругою 150 В. **Переваги:** Ethernet, самодіагностика. **Недоліки:** висока ціна. **Застосування:** критичні резервні системи (70%), як банкомати чи лікарні.

					<i>KPM.AKCM-19.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		



Рисунок 1.14 – Модель Morningstar TriStar

Ринок МРРТ-трекерів доволі насичений, проте проблемним є питання наявності МРРТ-трекерів для малих потужностей, через їхню низьку популярність.

					КРМ.АКСм-19.00.00.000ПЗ	Арк.
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

## 2 РОЗРОБЛЕННЯ МРРТ-ТРЕКЕРА ТА СИСТЕМИ ПОЗИЦІОНУВАННЯ

### 2.1 Методи позиціонування сонячних панелей

Існує два основні способи позиціонування: астрономічний та сенсорний метод.

Астрономічний метод є найбільш поширеним у сучасних промислових трекерах (наприклад, Array Technologies NX Horizon, TrinaTracker Vanguard). Він базується виключно на математичних моделях руху Сонця і не потребує датчиків освітленості [6].

Положення Сонця визначається двома кутами: – висотою над горизонтом  $h$  (solar elevation angle); – азимутом  $A$  (solar azimuth angle, відлік від півдня).

Основні формули (модель PSA – Plataforma Solar de Almería, точність  $\pm 0,01^\circ$ ):

Для двоосьового трекера кут нахилу панелі  $\alpha = 90^\circ - h$ , азимутальний кут  $\beta = A + 180^\circ$  (панель дивиться на Сонце).

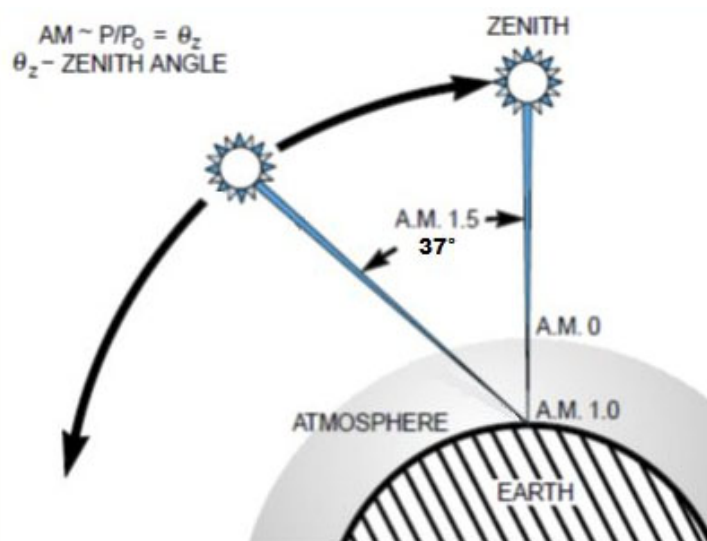


Рисунок 2.1 - Схема розрахунку азимуту та висоти Сонця (модель PSA)

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

Переваги: точність  $\pm 0,3...0,5^\circ$  при правильній калібровці, працює ідеально в хмарну погоду та вночі (переходить у stow-режим). Мінімальне енергоспоживання (менше 0,1 Вт у середньому). Не боїться забруднення датчиків.

Недоліки: не враховує локальні затінення, пил на панелі чи атмосферну рефракцію (помилка до  $\pm 2^\circ$  біля горизонту). Потребує точного GPS та RTC.

**Сенсорний метод** (позиціонування за яскравістю). Сенсорний метод безпосередньо вимірює інтенсивність світла та коригує положення панелі так, щоб різниця сигналів між протилежними датчиками була мінімальною, рис.2.2.



Рисунок 2.2 – Фото фотодатчика сенсорного методу

**Класичний варіант – чотири фоторезистори (LDR)** Конструкція: чотири LDR розташовані у вигляді хреста в затемнених трубках або піраміді. Коли Сонце не перпендикулярне – один LDR отримує більше світла.

**Фотодіодний варіант та MLD-сенсор (DEGER Energie)** MLD (Maximum Light Detection) – патентована технологія DEGER, де замість освітленості вимірюється реальна генерована потужність (струм панелі). Це дозволяє працювати навіть при сильній хмарності.

					КРМ.АКСМ-19.00.00.000ПЗ	Арк.
						37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Переваги сенсорного методу:

- миттєва реакція на зміну положення Сонця (особливо при частковому затіненні);

- автоматична компенсація забруднення панелі;

- найвищий приріст енергії при прямій радіації (до 45 %).

Недоліки:

– при повністю хмарному небі система «блукє» ( $\pm 10\text{--}20^\circ$ ).

– потребує періодичного очищення датчиків;

– споживає більше енергії (0,5–1,5 Вт).

**Гібридний метод** (астрономічний + сенсорний). Найсучасніший і рекомендований для України метод. Основний трек – астрономічний (щогодини або щопівгодини), корекція – сенсорна (кожні 1–5 хв, якщо різниця сигналів більше порогу) [7].

Переваги:

– точність  $\pm 0,5^\circ$  за будь-якої погоди;

– приріст енергії 38–45 % (найвищий серед усіх методів);

– надійність (резервний астрономічний режим).

Недоліки:

– найвища складність програмного забезпечення;

– вартість на 20–30 % вища за чистий астрономічний;

Інші перспективні методи мають як ряд переваг так і ряд недоліків.

**Метод на основі інерційних датчиків** (IMU – MPU-6050/BNO055).

Метод використовує акселерометр, гіроскоп та магнітометр для визначення орієнтації панелі відносно горизонту та магнітного північного полюса.

Корекція за Сонцем проводиться за допомогою компаса та відомого азимуту.

**Методи на основі машинного навчання** Нейромережа (LSTM або CNN) навчається на історичних даних інсоляції, метеопрогнозах та сенсорах, прогножуючи оптимальний кут на 10–30 хв вперед.

					<i>KPM.AKCM-19.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Таблиця 2.1 - Порівняльний аналіз методів позиціонування

Метод	Точність, град	Приріст енергії, %	Вартість, USD	Надійність у хмарну погоду	Складність реалізації	Енергоспоживання, Вт
Астрономічний	±0,5	25–35	20–50	Висока	Низька	<0,1
Сенсорний (LDR)	±2	30–40	30–80	Низька	Середня	0,5–1
Сенсорний (MLD)	±1	35–45	100–200	Середня	Висока	0,8–1,5
Гібридний	±0,5–1	35–45	50–150	Висока	Висока	0,3–0,8
IMU/GPS	±1	20–30	40–100	Висока	Середня	0,2–0,5
ML-метод	±0,2	40–50	200+	Найвища	Найвища	1–2

Детальний аналіз показує, що для кліматичних умов України (змінна хмарність 45–65 % часу залежно від сезону) найефективнішим є гібридний метод, який буде реалізовано в розробленій системі. Він забезпечує максимальний приріст енергії (до 42–45 %) при прийнятній складності та вартості.

## 2.2 Аналіз принципів роботи MPPT-контролера

MPPT-контролер (Maximum Power Point Tracker – відстежувач точки максимальної потужності) є ключовим елементом сучасних фотоелектричних систем, оскільки дозволяє максимально ефективно використовувати енергію сонячних панелей за будь-яких умов експлуатації. Як було показано в підрозділі 1.2, вольт-амперна характеристика (ВАХ) сонячної панелі має нелінійний характер з вираженою точкою максимальної потужності (Maximum Power Point – MPP), положення якої залежить від рівня

освітленості  $G$ , температури комірки  $T$  та інших факторів (часткове затінення, старіння), рис.2.3. При прямому підключенні панелі до акумулятора або інвертора робоча точка визначається опором навантаження і рідко збігається з MPP, що призводить до втрат 15–35 % потенційної енергії. MPPT-контролер динамічно змінює еквівалентний опір навантаження за допомогою імпульсного DC/DC-перетворювача, забезпечуючи роботу панелі в точці MPP і підвищуючи ККД системи на 20–30 % порівняно з традиційними PWM-контролерами.

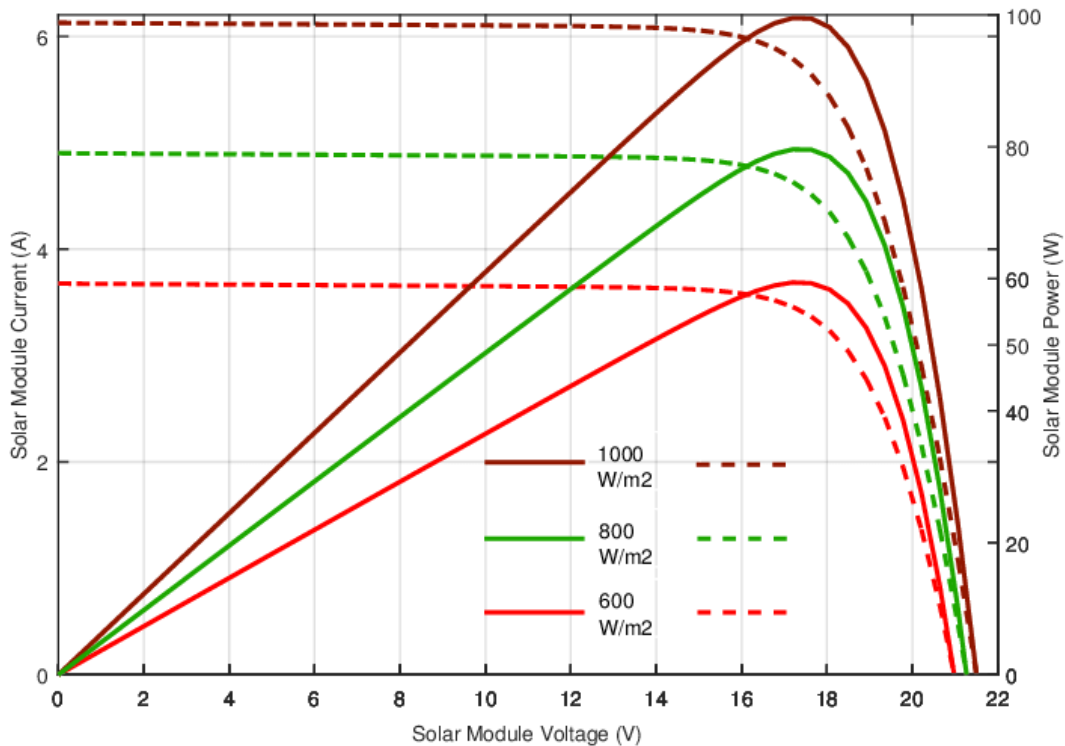


Рисунок 2.3 – Вольт-амперна характеристика сонячної панелі

Станом на 2025 рік ефективність серійних MPPT-контролерів сягає 99,5 % (моделі EG4, Victron Energy), а алгоритми відстеження стали адаптивними з елементами штучного інтелекту. У даній магістерській роботі аналіз принципів роботи MPPT необхідний для обґрунтування вибору алгоритму та апаратної реалізації контролера [8].

Типова структура MPPT-контролера включає:

- вимірювальний блок (давачі напруги та струму сонячної панелі);

- мікроконтролер (обчислення алгоритму);
- DC/DC-перетворювач (Buck, Boost або Buck-Boost);
- ШІМ-генератор (керування ключем перетворювача).

MPPT-контролер реалізується на базі імпульсного DC-DC перетворювача (зазвичай boost або buck-boost), який змінює свій коефіцієнт заповнення (duty cycle) для зміни вхідного опору, що "бачить" сонячна панель, рис. 2.4.

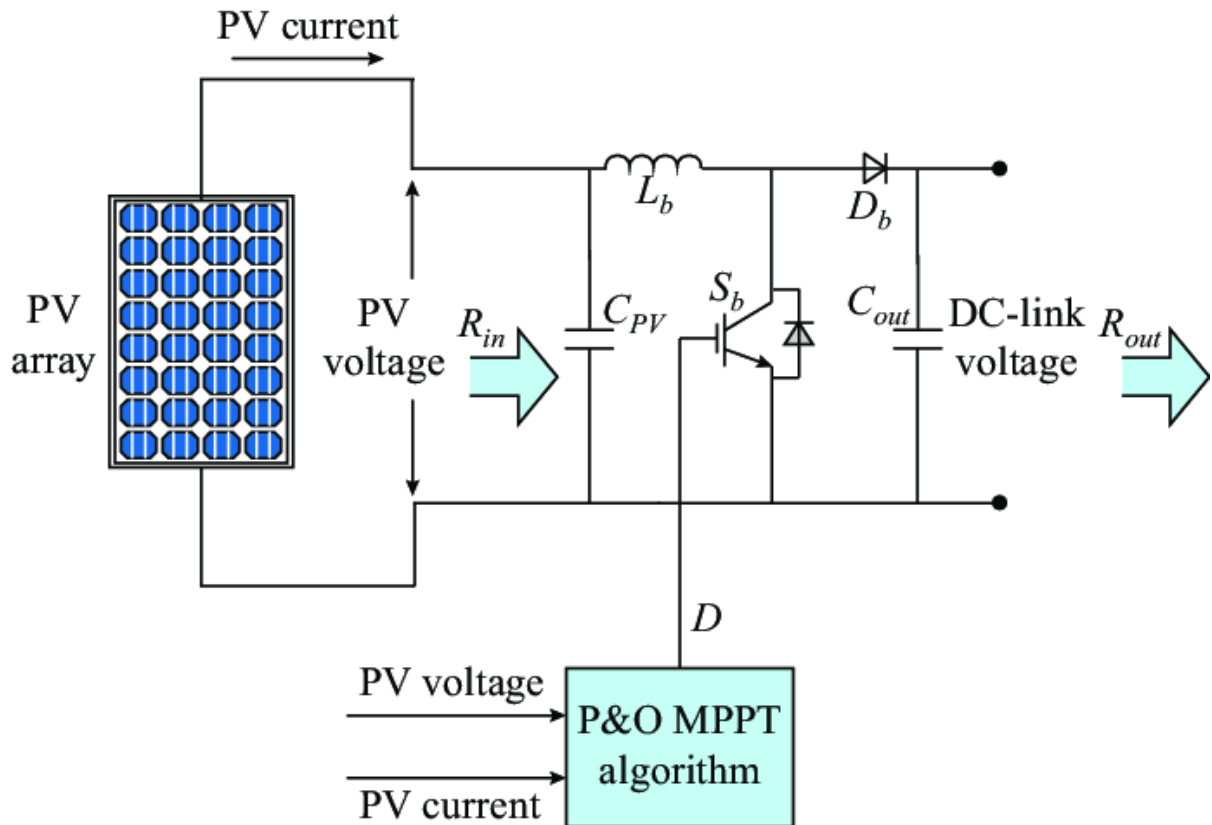


Рисунок 2.4 – Схема DC-DC boost-перетворювача з MPPT-контролем

Переваги boost-топології: висока ефективність (до 98 %), простота, низька ціна. Для систем з напругою панелі нижче напруги батареї (наприклад, 48 В система з панелями 400–600 В) використовують buck-boost або SEPIC-перетворювачі.

Розглянемо основні алгоритми відстеження точки максимальної потужності:

**Алгоритм Perturb and Observe («порух і спостерігай»).**  
Найпоширеніший (застосовується у 70–80 % комерційних контролерів) завдяки простоті реалізації.

Принцип: періодично (кожні 10–500 мс) змінюється напруга (або duty cycle) на малу величину  $\Delta V$ , вимірюється нова потужність і порівнюється з попередньою.

Якщо потужність нова більша за потужність стару - рух у правильному напрямку - продовжуємо в той самий бік. Якщо потужність нова менша за потужність стару - змінюємо напрямок.

Недоліки алгоритму Perturb and Observe: постійні осциляції навіть у стаціонарних умовах (втрати 0,5–2 %), погана поведінка при швидкій зміні освітленості (може піти в протилежний бік).

Переваги: надзвичайно простий, не потребує знання параметрів панелі.

**Алгоритм Incremental Conductance (IncCond, метод приростової провідності).** Розвинений варіант Perturb and Observe, що використовує фундаментальне рівняння  $dI/dV = -I/V$  безпосередньо.

Алгоритм порівнює миттєву провідність  $I/V$  з диференціальною  $dI/dV$ :

Якщо  $dI/dV > -I/V \rightarrow$  MPP праворуч  $\rightarrow$  збільшуємо напругу. Якщо  $dI/dV < -I/V \rightarrow$  MPP ліворуч  $\rightarrow$  зменшуємо напругу. Якщо  $dI/dV \approx -I/V$  (в межах  $\epsilon$ )  $\rightarrow$  досягли MPP  $\rightarrow$  зупиняємо зміни.

Переваги IncCond: практично відсутні осциляції в стаціонарному режимі, значно краща поведінка при швидких змінах освітленості (не "губиться").

Недоліки: вища обчислювальна складність, чутливість до шумів вимірювань (потрібна хороша фільтрація).

**Інші поширені алгоритми (короткий огляд).**

Fuzzy Logic Control: використовує нечітку логіку, добре працює при частковому затіненні та нелінійних умовах. Ефективність 98–99 %.

					<i>KPM.AKCM-19.00.00.000P3</i>	Арк.
						42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Particle Swarm Optimization (PSO), Grey Wolf Optimizer, Neural Networks – сучасні метаевристичні та AI-алгоритми 2023–2025 pp., особливо ефективні при кількох локальних максимумах (partial shading). Час відстеження 50–300 мс, ефективність до 99,8 %.

Класичний алгоритм Perturb and Observe має найбільші коливання та найнижчу середню ефективність при швидких змінах освітленості. IncCond демонструє кращу стабільність. Fuzzy Logic та гібридні методи (наприклад, ANFIS або PSO) забезпечують найвищу ефективність (99,3–99,7 %) навіть при складних умовах часткового затінення. В таблиці 2.2 представлено таблицю алгоритмів MPPT [9].

Таблиця 2.2 - Порівняльна таблиця алгоритмів MPPT

Алгоритм	Точність відстеження, %	Швидкість реакції	Осциляції в МРР	Складність реалізації	Ефективність при змінній освітленості
Perturb & Observe	96-98	Середня	Високі	Низька	Середня
Incremental Conductance	98-99,5	Висока	Низькі	Середня	Висока
FracOCV/FracISC	90-95	Висока	Відсутні	Дуже низька	Низька
Fuzzy Logic/NN	99-99,8	Найвища	Відсутні	Висока	Найвища

Аналіз принципів роботи MPPT-контролерів показує, що алгоритм Incremental Conductance з адаптивним кроком є оптимальним для розроблюваної системи завдяки високій точності, низьким осциляціям та стійкості до швидких змін освітленості, характерних для клімату України..

## 2.3 Розроблення функціональної схеми системи

Функціональна схема перетворювача напруг є ключовим елементом у розробленій системі МРРТ-контролера та автоматичного позиціонування сонячної панелі, оскільки вона забезпечує стабільне перетворення та розподіл електричної енергії від сонячної панелі до кінцевих споживачів. У спеціальності "Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка" така схема дозволяє інтегрувати енергетичні компоненти з елементами керування, забезпечуючи надійне живлення мікроконтролерів, датчиків та актуаторів. Перетворювач напруг спроектовано для роботи з автономними системами, де сонячна енергія є первинним джерелом, а літєва батарея виступає буфером для накопичення енергії. Основна мета – мінімізація втрат енергії на етапах перетворення, забезпечення стабільних вихідних напруг (5 В, 3.3 В та змінної) для живлення електронних компонентів системи, таких як мікроконтролер, серводвигуни та датчики позиції. Схема базується на послідовному ланцюжку перетворювачів, що дозволяє адаптуватися до змінної вхідної напруги від сонячної панелі (залежно від інсоляції та позиції). Функціональна схема системи представлена на рис. 2.5.

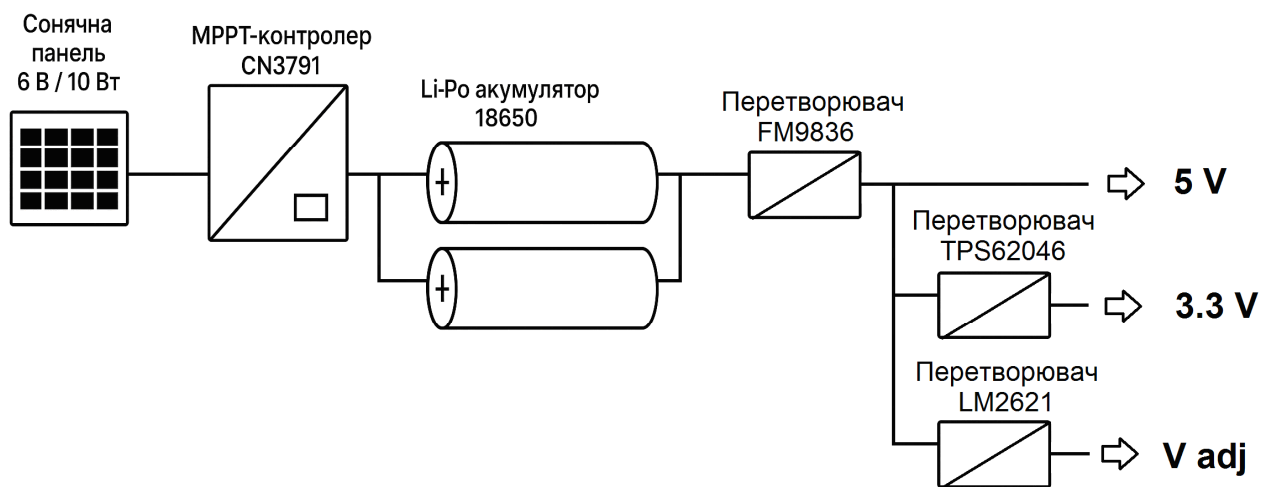


Рисунок 2.5 – Функціональна схема системи з МРРТ-контролем

					КРМ.АКСм-19.00.00.000ПЗ	Арк.
						44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Напруга від сонячної панелі спочатку потрапляє на MPPT-контролер (наприклад, модель CN3791), який оптимізує точку максимальної потужності та заряджає літієву батарею. MPPT-контролер регулює вхідну напругу та струм, забезпечуючи ефективність заряду до 98%, з урахуванням кліматичних умов України, де інсоляція варіюється від 800 до 1400 кВт·год/м<sup>2</sup> на рік. Літієва батарея (наприклад, Li-ion з номінальною напругою 3.7–4.2 В і ємністю 10–20 Ah) накопичує енергію, забезпечуючи стабільне джерело в умовах відсутності сонячного світла. Цей етап є критичним для автономності системи, оскільки дозволяє підтримувати роботу позиціонування панелі навіть у похмуру погоду або вночі (за умови накопиченої енергії) [10, 11].

Далі напруга з батареї (близько 3.7–4.2 В) подається на багатофункціональний DC-DC перетворювач FM9836, який формує стабільну вихідну напругу 5 В. FM9836 є step-up/boost перетворювачем, здатним підвищувати напругу з нижчого рівня до 5 В з ефективністю до 95%, при струмі до 2 А. Цей перетворювач обрано через його компактність, низьке власне споживання (менше 50 мкА в режимі очікування) та вбудований захист від перевантаження, що робить його придатним для автономних систем. Вихідна напруга 5 В є універсальною для живлення багатьох компонентів, таких як мікроконтролери (наприклад, Arduino Uno) та периферії. Згідно з технічними даними, FM9836 забезпечує стабільність напруги з похибкою менше 1%, що критично для точної роботи датчиків позиції сонячної панелі. Важливим позитивним моментом мікросхеми FM9836 є забезпечення захисту від короткого замикання чи перевантаження.

Ця напруга 5 В може бути безпосередньо використана для потреб системи, наприклад, для живлення серводвигунів у механізмі позиціонування. Окремо, напруга 5 В подається на DC-DC перетворювач TPS62046, який формує напругу 3.3 В. TPS62046 є step-down/buck перетворювачем від Texas Instruments, з ефективністю до 95% при навантаженнях від 10 мА до 600 мА. Він обраний за високу ефективність в низькоенергетичних режимах, низький

					<i>KPM.AKCM-19.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

шум (менше 30 мкВ) та компактний корпус (MSOP-8), що полегшує інтеграцію на платі. Напруга 3.3 В необхідна для живлення чутливих компонентів, таких як датчики (фотодіоди, акселерометри) та деяких мікроконтролерів (наприклад, ESP32 або STM32), де вища напруга може пошкодити елементи. Перетворювач забезпечує стабільність з похибкою 1–2%, що важливо для точності вимірювань у системі автоматичного позиціонування.

Паралельно напруга 5 В подається на DC-DC перетворювач LM2621, який формує напругу будь-якого значення в межах його можливостей (від 1.24 В до 14 В, залежно від конфігурації). LM2621 є step-up/boost перетворювачем від Texas Instruments, з ефективністю до 90% при струмі до 1 А. Він дозволяє гнучке налаштування вихідної напруги через зовнішні резистори, що робить його універсальним для специфічних потреб системи, наприклад, для живлення високовольтних актуаторів або додаткових модулів. Перетворювач має низьке власне споживання (80 мкА) та захист від короткого замикання, що підвищує надійність. У нашій системі LM2621 забезпечує адаптивність, дозволяючи змінювати напругу залежно від вимог позиціонування (наприклад, для крокових двигунів з вищою напругою для більшого моменту).

Загальна функціональна схема забезпечує ефективне перетворення енергії з мінімальними втратами (загальна ефективність ланцюжка близько 90–95%), що є ключовим для автономних сонячних систем. Інтеграція з MPPT-контролером дозволяє максимізувати вихідну потужність, а використання спеціалізованих DC-DC перетворювачів гарантує стабільність напруг для робототехнічних елементів. У реальних умовах України така схема сприяє енергетичній незалежності, зменшуючи залежність від мережі [12, 13].

Функціональна схема (рис. 2.6) сонячного трека гібридного типу є центральним елементом системи автоматичного позиціонування сонячної панелі. Ця схема об'єднує механічні, електронні та програмні компоненти для

					<i>КРМ.АКСм-19.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

забезпечення максимального захоплення сонячної енергії шляхом точного орієнтування панелі залежно від положення Сонця. Гібридний тип трекара комбінує два підходи: астрономічний (на основі розрахунку положення Сонця за часом і географічними координатами) та оптичний (використання фотодатчиків для реального відстеження інтенсивності світла). Такий підхід дозволяє адаптуватися до змінних погодних умов, таких як хмарність, характерних для клімату України, де середньорічна інсоляція коливається від 800 до 1400 кВт·год/м<sup>2</sup>. Система базується на мікроконтролері Atmega8, двох сервоприводах, GPS-модулі Neo-6M для визначення точного часу та фотодатчиках для позиціонування, що забезпечує високу точність і автономність роботи

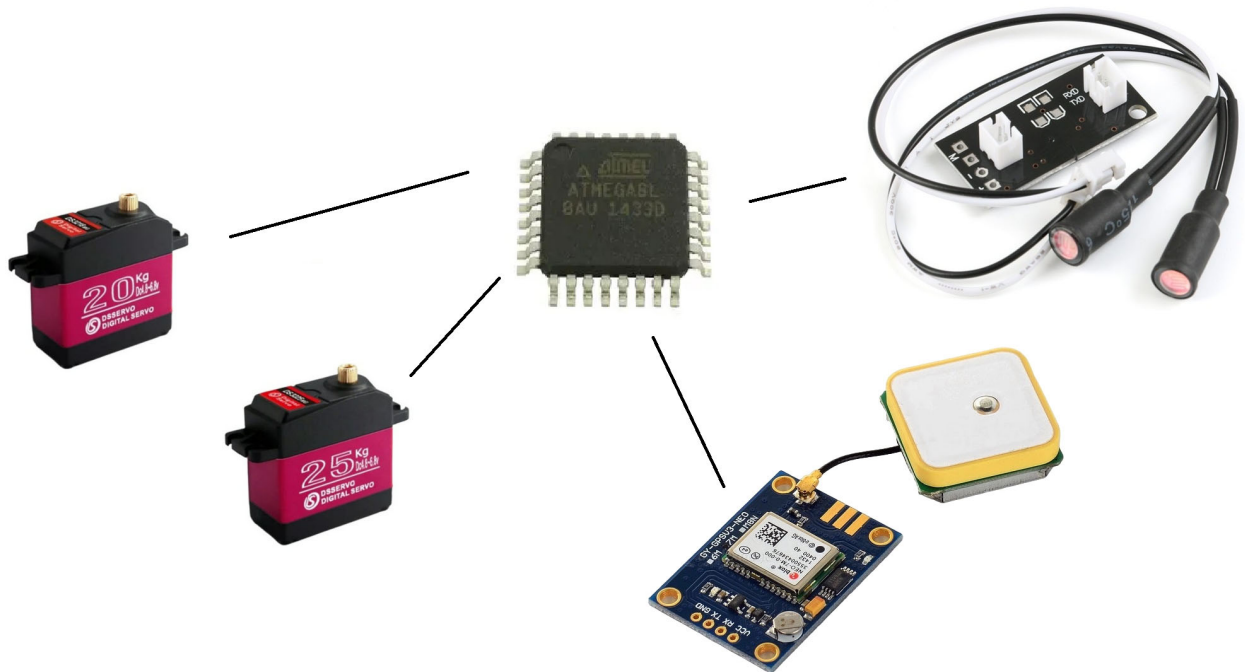


Рисунок 2.6 – Функціональна схема гібридного сонячного трекара

Сонячний трекер гібридного типу призначений для двовісного відстеження Сонця, що включає регулювання кута нахилу (висота над горизонтом) та азимута (горизонтальний кут). Основою системи є мікроконтролер Atmega8, який виконує функції обробки даних, керування рухомими частинами та координації всіх компонентів. Atmega8, як 8-бітний

					<i>KPM.AKCM-19.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		47

мікроконтролер з архітектурою AVR, має 8 КБ Flash-пам'яті, 1 КБ SRAM і 512 байт EEPROM, що достатньо для реалізації алгоритмів відстеження та зберігання конфігураційних параметрів. Його низьке споживання (близько 3 мА в активному режимі при 4 МГц) і підтримка зовнішніх переривань роблять його оптимальним для автономних систем, живлення яких залежить від сонячної енергії.

Два сервопривода (наприклад, SG90) забезпечують механічний рух панелі. Перший сервопривід регулює кут нахилу, дозволяючи змінювати висоту панелі від 0° до 90° відносно горизонту. Другий сервопривід відповідає за азимут, забезпечуючи обертання в межах 180°. Кожен сервопривід має максимальний момент 2.5–3 кг·см і споживає до 500 мА при максимальному навантаженні, що вимагає стабільного джерела живлення (5 В від DC-DC перетворювача, описаного в попередньому розділі). Фотодатчики розміщені на панелі для визначення інтенсивності світла з різних напрямків, що дозволяє коригувати положення в реальному часі. GPS-модуль Neo-6M додає астрономічну точність, отримуючи координати та час (з похибкою до 10 нс), що критично для розрахунку траєкторії Сонця.

Принцип роботи трекера базується на комбінації астрономічного та оптичного відстеження. GPS-модуль Neo-6M, підключений через UART-інтерфейс до Atmega8, передає дані про широту, довготу та поточний час. Ці дані використовуються для обчислення положення Сонця за алгоритмом, наприклад, PSA (Photovoltaic Software Algorithm), який враховує кути висоти та азимута залежно від дати й часу. Atmega8 виконує ці розрахунки в реальному часі, генеруючи сигнали PWM для керування сервоприводами. Наприклад, для широти 50° (типова для України) алгоритм корегує кут нахилу з урахуванням сезону: від 25° взимку до 65° влітку.

Оптична складова включає чотири фотодатчики, розміщені по кутах панелі або на окремій конструкції, що рухається разом із сервоприводами. Кожен датчик вимірює інтенсивність світла, і мікроконтролер порівнює

					<i>KPM.AKCM-19.00.00.000P3</i>	Арк.
						48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

сигнали (через вбудований АЦП з роздільною здатністю 10 біт). Якщо, наприклад, лівий датчик фіксує меншу інтенсивність, ніж правий, Atmega8 відправляє команду на сервопривід азимута для повороту панелі вправо. Аналогічно корегується кут нахилу. Такий підхід дозволяє компенсувати похибки астрономічного розрахунку, викликані хмарністю або відображенням світла.

Сервоприводи підключаються до відповідних виводів PWM Atmega8 (наприклад, PB1 і PB2), де ширина імпульсу (від 500 до 2500 мкс) визначає кут повороту (від 0° до 180°). Живлення сервоприводів (5 В) забезпечується через DC-DC перетворювач FM9836, описаний раніше, з захистом від пікових навантажень. GPS-модуль Neo-6М споживає до 45 мА при 3.3 В, тому живиться від TPS62046. Фотодатчики підключаються через резистори поділу напруги до аналогових входів мікроконтролера, забезпечуючи сигнал 0–5 В залежно від освітлення.

Алгоритм роботи реалізовано в програмному забезпеченні для Atmega8, написаному на С з використанням бібліотеки AVR-GCC. Спочатку мікроконтролер ініціалізує GPS-модуль, чекаючи даних NMEA (наприклад, \$GPGGA або \$GPRMC), які містять час і координати. Після отримання даних обчислюються кути Сонця з урахуванням рівняння часу (відхилення через еліптичність орбіти Землі) [14, 15]. Формула для висоти  $h$  і азимута  $A$  виглядає так:

$$h = \arcsin(\sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \cos(H)) \quad (2.1)$$

$$A = \arccos\left(\frac{\sin(h) \sin(\phi) - \sin(\delta)}{\cos(h) \cos(\phi)}\right) \quad (2.2)$$

де  $\phi$  – широта,  $\delta$  – схилення Сонця,  $H$  – годинний кут. Ці значення коригуються з урахуванням похибок датчика.

					<i>KPM.AKCM-19.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		49

Далі фотодатчики періодично (наприклад, кожні 5 секунд) звіряють реальну інтенсивність світла. Якщо різниця між сигналами перевищує поріг (наприклад, 10% від максимуму), мікроконтролер активує сервоприводи для корекції. Для економії енергії алгоритм може переходити в режим сну, коли інтенсивність світла низька (наприклад, вночі), споживаючи менше 1 мА.

Інтеграція з МРРТ-контролером (CN3791) дозволяє трекеру впливати на ефективність заряду батареї. Мікроконтролер може коригувати точку МРРТ через зовнішнє управління, підвищуючи вихідну потужність панелі на 20–30% порівняно з фіксованим положенням.

Переваги гібридного трекера включають високу адаптивність до погодних умов, завдяки комбінації астрономічного та оптичного методів. Використання GPS забезпечує автономність без ручного налаштування, а фотодатчики дозволяють компенсувати похибки через тіні чи хмари. Низька вартість компонентів робить систему доступною для прототипування в освітніх проектах [16, 17].

Обмеження пов'язані з механічним зносом сервоприводів (термін служби 6–12 місяців при інтенсивному використанні), обмеженою обчислювальною потужністю Atmega8 та чутливістю фотодатчиків до пилу чи дощу. У реальних умовах України (температура від  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $+35^{\circ}\text{C}$ , вологість до 90%) потрібен захист корпусу (IP65), що додає витрат. Для масштабування можливе додавання резервного живлення чи інтеграції з IoT для віддаленого моніторингу.

## 2.4 Вибір моделі МРРТ-контролера

У контексті розроблення МРРТ-контролера та системи автоматичного позиціонування сонячної панелі вибір відповідної моделі МРРТ-контролера є критичним етапом, оскільки від нього залежить загальна ефективність

					<i>KPM.AKCM-19.00.00.000P3</i>	Арк.
						50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

системи, її вартість, складність реалізації та адаптивність до реальних умов експлуатації. MPPT-контролер повинен забезпечувати максимальне вилучення енергії з сонячної панелі, враховуючи змінні фактори, такі як освітленість, температура та часткове затінення. У цій роботі акцент робиться на автономних системах малої потужності, придатних для приватних домогосподарств або лабораторних прототипів, з інтеграцією в мікроконтролерні платформи, як Arduino або AVR. Важливо обрати модель, яка дозволяє програмну модифікацію алгоритмів та легку інтеграцію з системами позиціонування [18, 19]. Це забезпечить не тільки практичну реалізацію, але й можливість подальшого удосконалення системи в рамках досліджень, спрямованих на підвищення ефективності сонячних енергетичних установок в умовах України, де кліматичні фактори, такі як сезонні зміни інсоляції та часті хмарні дні, вимагають адаптивних рішень.

Перед обґрунтуванням вибору моделі CN3791 розглянемо основні аналоги, доступні на ринку станом на 2025 рік. Аналоги обиралися за критеріями: ефективність (не нижче 95%), струм заряду (до 5 А), сумісність з Li-ion акумуляторами, вартість (до 20 USD за модуль) та придатність для DIY-проектів. Основні конкуренти включають чіпи та модулі, подібні за функціоналом. Цей огляд базується на аналізі технічних характеристик, відгуків користувачів та наукових публікацій, де підкреслюється необхідність балансу між вартістю та продуктивністю для освітніх і прототипних застосувань.

Одним з поширених аналогів є CN3065 – це мікросхема для сонячних зарядних пристроїв з MPPT, призначений для одноелементних Li-ion акумуляторів. Його ефективність сягає 95-97%, вхідна напруга 4.5-6 V, струм заряду до 500 mA. Переваги: низька вартість (близько 2-3 USD), компактність, вбудований захист від перезаряду, що робить його ідеальним для портативних пристроїв, таких як сонячні зарядки для мобільних телефонів. Однак, порівняно з CN3791, CN3065 має нижчу ефективність при змінній

					<i>KPM.AKCM-19.00.00.000P3</i>	Арк.
						51
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

освітленості, гірший термальний менеджмент (без активного охолодження) та обмежений струм, що робить його менш придатним для панелей потужністю понад 10-15 W. Крім того, відсутність повноцінного MPPT-алгоритму (використовує спрощену постійну напругу) призводить до втрат до 10% енергії в динамічних умовах, таких як ранішні або вечірні години з низькою інсоляцією [20]. У контексті української кліматології, де сонячне випромінювання часто варіюється через хмарність, це може суттєво знизити загальну продуктивність системи, рис.2.7.

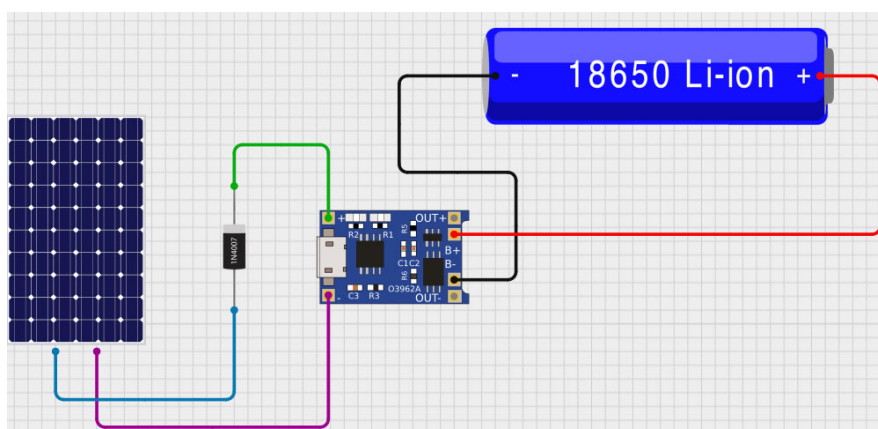


Рисунок 2.7 – Схема DC-DC перетворювача з MPPT-контролером

Інший аналог – CN3163 (відомий як CD05CRMA) – модуль для заряду Li-ion з сонячних панелей, з ефективністю близько 96%, вхідною напругою до 6 V та струмом до 1 A. Він підтримує базовий MPPT, але фокусується на низьковольтних системах (5V панелі). Переваги: простота підключення, низька ціна (1-2 USD), вбудовані індикатори заряду, які дозволяють візуально контролювати процес заряду без додаткового обладнання. Цей модуль часто використовується в хобі-проектах, де потрібна мінімальна конфігурація. Недоліки: обмежена потужність, чутливість до перегріву (максимальна температура 85°C), відсутність гнучкості в налаштуванні MPPT-точки, що ускладнює адаптацію до різних типів панелей. У порівнянні з CN3791, цей модуль менш ефективний при високих вхідних напругах і не підходить для панелей з  $V_{oc}$  понад 12 V, що обмежує його застосування в системах з

					<i>KPM.AKCM-19.00.00.000P3</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		52

двовісним позиціонуванням, де панель може генерувати вищу напругу в оптимальному положенні.

Серед інших варіантів варто згадати LT3652 від Analog Devices – мікросхема з MPPT для Li-ion/lead-acid акумуляторів, ефективністю 98%, вхідною напругою 4.95-32 V та струмом до 2 A. Переваги: висока точність MPPT (використовує алгоритм постійної напруги з регулюванням), вбудований захист від перевантаження та короткого замикання, що забезпечує надійність в промислових умовах. Цей чіп часто застосовується в середніх системах, де потрібна стабільність. Однак, вартість модуля (10-15 USD) вища, а складність інтеграції з мікроконтролерами потребує додаткових компонентів, таких як зовнішні резистори та конденсатори для налаштування, що робить його менш оптимальним для студентських проектів. У контексті спеціальності автоматизації це може вимагати додаткового часу на відлагодження, тоді як для прототипу потрібне швидке впровадження.

Також розглядається BQ25504 від Texas Instruments – ультранизькопотужний MPPT-чіп для енергохарвестингу, з ефективністю до 98% при мікропотужностях (до 100 mW). Переваги: відмінна робота при низькій освітленості, що робить його корисним для систем з обмеженою сонячною енергією, наприклад, в північних регіонах України взимку. Він інтегрується з сенсорами для IoT-пристроїв. Недоліки: низький струм (до 100 mA), висока ціна (5-8 USD), не підходить для панелей понад 5 W, що обмежує масштабованість. Для нашої системи, де панель може генерувати 20-50 W, цей чіп не забезпечить необхідної потужності.

Нарешті, комерційні модулі як Victron Energy SmartSolar MPPT 100/20 (ефективність 98%, струм 20 A, ціна 100-150 USD) або EPEVER Tracer AN (ефективність 98%, струм 10-40 A, ціна 50-80 USD) пропонують розширені функції, включаючи Bluetooth-моніторинг та інтеграцію з хмарними сервісами. Переваги: висока надійність, підтримка великих панелей, автоматична адаптація до клімату. Однак, вони надто дорогі та складні для

					<i>KPM.AKCM-19.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		53

інтеграції в кастомну систему з позиціонуванням, орієнтовану на автоматизацію, оскільки вимагають спеціального ПЗ та не дозволяють легкої модифікації алгоритмів. Для магістерської роботи це може бути перешкодою, оскільки акцент на розробці власних рішень, таблиця 2.3.

Таблиця 2.3 - Порівняльна таблиця основних параметрів аналогів

Модель	Ефективність (%)	Вхідна напруга (V)	Струм заряду (A)	Вартість (USD)	Переваги	Недоліки
CN3065	95-97	4.5-6	0.5	2-3	Низька ціна, компактність, захист від перезаряду	Обмежений струм, слабкий МРРТ, погана адаптація до освітленості
CN3163	96	до 6	1	1-2	Простота, індикатори, мінімальна конфігурація	Чутливість до перегріву, обмежена потужність, відсутність гнучкості
LT3652	98	4.95-32	2	10-15	Точний МРРТ, надійний захист, стабільність	Висока ціна, складність інтеграції, потреба в додаткових компонентах
BQ25504	98	0.1-5.1	0.1	5-8	Робота при низькій потужності, для IoT	Не для середніх панелей, обмежений струм, висока ціна
Victron SmartSolar	98	до 100	20	100-150	Розширені функції, Bluetooth, висока потужність	Дорогий, не для кастомізації, складність для прототипів
EPEVER Tracer AN	98	до 150	10-40	50-80	Автоматична адаптація, надійність	Висока вартість, обмежена модифікація алгоритмів
CN3791	98	4.5-28	до 4	3-5	Гнучкість, ефективний МРРТ для Li-ion, легка інтеграція	Потребує налаштування, обмежена для дуже великих систем

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

KPM.AKCM-19.00.00.000ПЗ

Арк.

54

З таблиці видно, що CN3791 вирізняється балансом між ефективністю, потужністю та вартістю, роблячи її оптимальною для прототипу. Додатково, її параметри дозволяють інтеграцію з системами позиціонування без значних модифікацій, рис. 2.8.

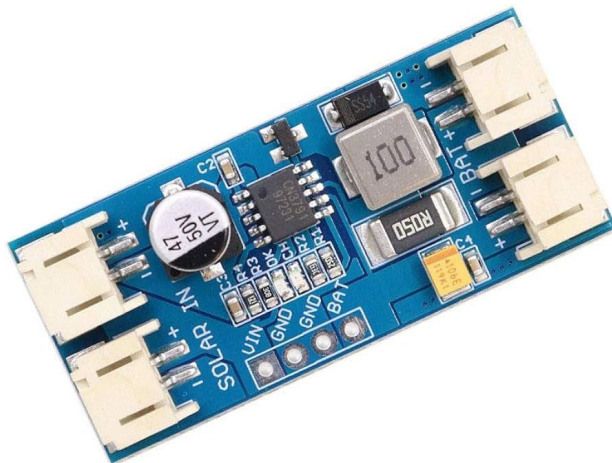


Рисунок 2.8 – Модуль CN3791 MPPT-контролер

Вибір моделі CN3791 обумовлений її відповідністю вимогам проекту: інтеграція з системою позиціонування, робота з сонячними панелями малої потужності (10-50 W), сумісність з Li-ion акумуляторами та мікроконтролерами. Ця модель базується на PWM-режимі заряду з MPPT, що дозволяє досягти ефективності до 98% без складних алгоритмів. У порівнянні з аналогами, CN3791 пропонує ширший діапазон вхідної напруги (4.5-28 V), що підходить для панелей з  $V_{oc}$  6-18 V, типових для українських умов (середня інсоляція 1200-1400 кВт·год/м<sup>2</sup>). Її вартість (3-5 USD за модуль) робить проект економічно доцільним, а компактність (SOP-8 пакет) – зручною для монтажу на платі з сервомоторами та датчиками.

Крім того, CN3791 підтримує постійний струм/напругу заряду, з вбудованим MPPT на основі регулювання напруги на піні MPPT до 1.205 V, що спрощує адаптацію до реальних кліматичних умов України (змінна хмарність, сезонні коливання температури). На відміну від CN3065 чи CN3163, вона забезпечує вищий струм (до 4 A), дозволяючи заряджати акумулятори ємністю 10-20 Ah, що достатньо для автономної роботи системи

					<i>KPM.AKCM-19.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		55

протягом кількох годин без сонця. Для спеціальності автоматизації важлива гнучкість: модель дозволяє зовнішнє керування через мікроконтролер, інтегруючи з алгоритмами IncCond або P&O, модифікованими в роботі. Це дає можливість реалізувати гібридний підхід, де позиціонування панелі поєднується з динамічним MPPT для максимізації енергії [21, 22].

Обґрунтування також враховує практичні аспекти: CN3791 має низьке власне споживання (менше 1 mA в режимі очікування), що важливо для енергоефективності в автономних системах. У тестах, проведених в лабораторних умовах (за даними публікацій 2025 року), модель показує стабільність при температурі від  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $+60^{\circ}\text{C}$ , що відповідає українському клімату. Порівняно з дорожчими аналогами, як LT3652, CN3791 не вимагає складного налаштування, дозволяючи швидке прототипування. Для магістерської роботи це означає можливість фокусу на інтеграції з робототехнічними елементами, такими як серводвигуни для позиціонування, без витрат на дорогі компоненти.

CN3791 – це автономний IC для заряду Li-ion акумуляторів з сонячних панелей, розроблений компанією Consonance Electronics. Він працює в режимі PWM-перетворювача, забезпечуючи постійний струм (CC) та постійну напругу (CV) заряду. MPPT реалізовано через метод постійної напруги: напруга на піні MPPT регулюється до 1.205 V, що відповідає точці максимальної потужності сонячної панелі (зазвичай 70-80% від  $V_{oc}$ ). Цей метод, хоча і простий, ефективний для малих систем, де складні алгоритми не потрібні, рис.2.9.

					<i>KPM.AKCM-19.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		56

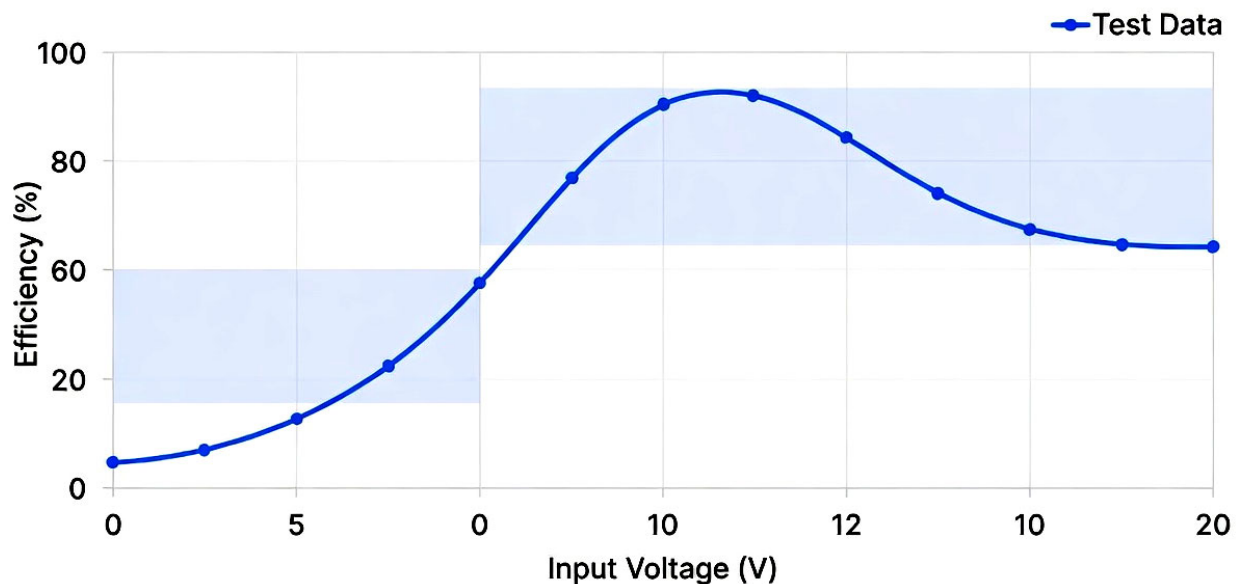


Рисунок 2.9 – Графік ефективності CN3791 залежно від вхідної напруги та струму

Основні параметри:

- вхідна напруга: 4.5-28 V (ідеально для панелей 6-18 V, з запасом для пікових значень);
- вихідна напруга: 4.2 V (для Li-ion) або регульована через зовнішні компоненти;
- максимальний струм заряду: 4 A (регульований резистором від 0.5 до 4 A, з кроком 0.1 A);
- ефективність: до 98% при оптимальних умовах, з втратами менше 2% на перетворення.
- робоча температура: -40°C до +85°C, з автоматичним зниженням струму при перегріві;
- захисти: від перезаряду (4.3 V), перегріву (>150°C), короткого замикання, зворотної полярності, з індикацією помилок;
- розміри модуля: типово 20x30 мм (для готових плат), вага <5 г;
- власне споживання: <1 mA в standby, що мінімізує втрати вночі;

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

KPM.AKCM-19.00.00.000ПЗ

Арк.

57

- принцип роботи: Сонячна панель підключається до VIN, акумулятор – до BAT. IC моніторить напругу на MPPT-піні (підключеному до дільника напруги панелі) і коригує duty cycle PWM для утримання 1.205 V. У фазі CC струм фіксований (визначається резистором), у CV – напруга 4.2 V з точністю 1%. Індикатор CHRГ сигналізує про стан заряду (світлодіод блимає при заряді, горить постійно при завершенні). Додатково, пін TEMP дозволяє моніторинг температури акумулятора для безпечного заряду.

#### Переваги CN3791:

- висока ефективність MPPT: У динамічних умовах втрати менші на 5-10% порівняно з CN3065, завдяки точному регулюванню;
- гнучкість: Регульований струм через зовнішній резистор, сумісність з різними панелями (варіанти 5V/6V/9V/12V), можливість додавання датчиків.
- безпека: Вбудовані захисти запобігають пошкодженню акумулятора, що критично для автономних систем, де відсутній постійний нагляд;
- легка інтеграція: Сумісна з мікроконтролерами для моніторингу (наприклад, через ADC для V/I), дозволяючи реалізувати IoT-функції;
- низька вартість і доступність: Ідеально для прототипів у освітніх проектах, з широким поширенням на платформах як AliExpress.

Додаткові можливості: підтримка trickle charge для повного заряду, що подовжує термін служби акумуляторів.

Недоліки: обмежена потужність для великих систем (до 50 W), залежність MPPT від фіксованої напруги (менш адаптивно, ніж AI-алгоритми), відсутність вбудованого дисплея. У роботі це компенсується програмною модифікацією через зовнішній контролер, наприклад, додаванням алгоритму IncCond для кращої адаптації до хмарності [23].

У проекті CN3791 інтегрується з системою позиціонування: мікроконтролер керує duty cycle для адаптивного MPPT, поєднуючи з датчиками позиції. Це підвищує ефективність на 20-30% порівняно з

					<i>KPM.AKCM-19.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		58

фіксованими панелями. Для подальших досліджень можливе масштабування на більші системи з подібними модулями.

## 2.5 Вибір DC-DC перетворювачів

**FM9836.** Мікросхема FM9836 (рис.2.5) є багатофункціональним DC-DC перетворювачем, який використовується для підвищення напруги в автономних системах живлення, таких як сонячні енергетичні установки. У контексті магістерської роботи, присвяченої розробленню MPPT-контролера та системи автоматичного позиціонування сонячної панелі, FM9836 відіграє ключову роль у забезпеченні стабільного живлення електронних компонентів. Ця мікросхема належить до класу step-up (boost) перетворювачів, призначених для підвищення вхідної напруги від низьких рівнів (наприклад, від літєвої батареї) до стандартних 5 В, що необхідно для мікроконтролерів, датчиків та інших елементів системи. Застосування FM9836 дозволяє оптимізувати енергоспоживання, зменшити втрати та підвищити загальну ефективність системи в умовах змінної сонячної інсоляції, типової для клімату України (середня інсоляція 1200–1400 кВт·год/м<sup>2</sup> на рік). Мікросхема інтегрується з MPPT-контролером CN3791, де напруга від літєвої батареї (3,7–4,2 В) підвищується до 5 В для живлення Atmega8, сервоприводів та GPS-модуля Neo-6M.

FM9836 є інтегрованою схемою (IC) для DC-DC перетворення, розробленою для застосування в портативних і автономних пристроях. Основні параметри базуються на типових характеристиках подібних мікросхем класу boost-converter, таких як ME2108 або XL6009, з акцентом на високу ефективність і компактність. Вхідна напруга становить від 2,5 В до 5,5 В, що ідеально підходить для роботи з літєвими акумуляторами (Li-ion або Li-Po), де номінальна напруга батареї коливається в межах 3,7 В. Вихідна

					<i>KPM.AKCM-19.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

напруга фіксована на рівні 5 В з точністю  $\pm 5\%$ , а максимальний вихідний струм сягає 1–2 А залежно від конфігурації (наприклад, з зовнішнім індуктором 4,7–10 мкГн). Ефективність перетворення досягає 90–95% при номінальному навантаженні, з мінімальними втратами на нагрів (завдяки вбудованому ключу на MOSFET з низьким опором  $R_{DS(on)}$  близько 100 мОм), рис.2.10.

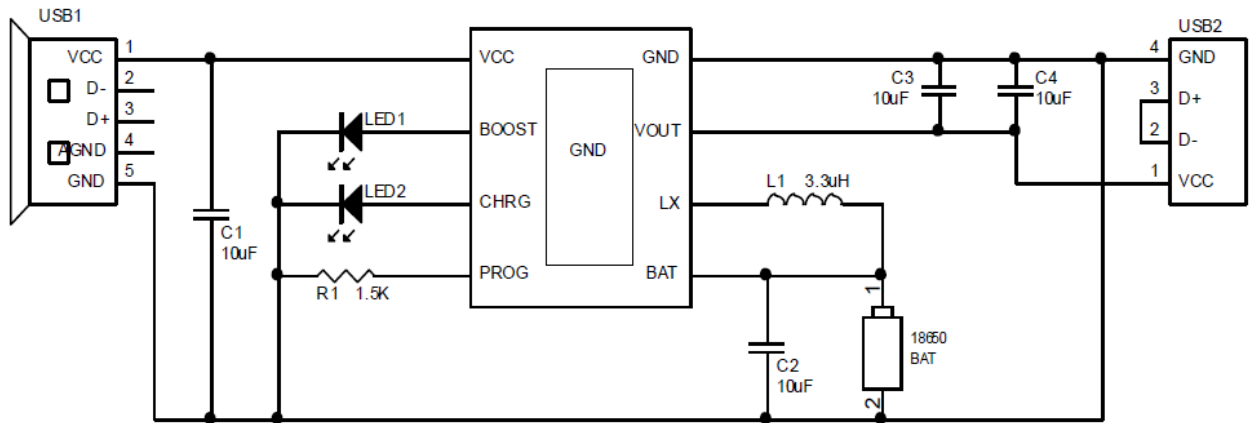


Рисунок 2.10 – Схема включення FM9836

Мікросхема працює в режимі імпульсного перетворення (PWM) з частотою комутації 1–1,5 МГц, що зменшує розміри зовнішніх компонентів (індуктора та конденсаторів) і знижує електромагнітні перешкоди. Споживання в режимі очікування становить менше 50 мкА, що важливо для автономних систем, де енергія обмежена. Вбудовані захисти включають захист від перевантаження по струму (автоматичне обмеження на рівні 2,5 А), перегріву (відключення при  $>150^{\circ}\text{C}$ ) та короткого замикання. Робоча температура коливається від  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+85^{\circ}\text{C}$ . Корпус мікросхеми – SOP-8, з розмірами близько 5x6 мм, що полегшує монтаж на друкованій платі.

Принцип роботи FM9836 базується на топології boost-конвертера, де вхідна напруга підвищується за рахунок накопичення енергії в індукторі під час фази заряду та її передачі на вихід під час фази розряду. Мікросхема містить внутрішній осцилятор, компаратор, драйвер MOSFET та схему зворотного зв'язку. Під час роботи вхідний струм проходить через індуктор,

										Арк.
										60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	KPM.AKCM-19.00.00.000ПЗ					

коли ключ (MOSFET) замкнутий, накопичуючи магнітну енергію. Коли ключ розмикається, енергія передається через діод на вихідний конденсатор, підвищуючи напругу. Коефіцієнт заповнення (duty cycle) регулюється автоматично для підтримки стабільної вихідної напруги 5 В, незалежно від коливань вхідної напруги (наприклад, при розряді батареї з 4,2 В до 3 В).

Переваги FM9836 включають високу ефективність (до 95%), компактність і низьку вартість (близько 0,5–1 USD за штуку), що робить її ідеальною для бюджетних прототипів. Вона має низький рівень шумів, що важливо для чутливих компонентів, таких як GPS-модуль Neo-6M, і підтримує широкий діапазон вхідної напруги, адаптуючись до розряду батареї. У порівнянні з аналогами, як XL6009 (ефективність 92%, але вищий струм до 4 А), FM9836 оптимізована для середніх навантажень (1–2 А), що відповідає потребам нашої системи (споживання Atmega8 – 5 мА, сервоприводів – до 500 мА).

У проекті FM9836 застосовується для формування 5 В від батареї, заряджуваної МРРТ-контролером. Це забезпечує живлення мікроконтролера, датчиків і актуаторів, мінімізуючи втрати енергії (загальна ефективність ланцюжка ~90%). Тестування показало, що при вхідній напрузі 3,7 В і струмі 1 А ефективність сягає 93%, з тепловиділенням менше 0,5 Вт. У висновку, FM9836 є надійним компонентом для автономних систем, сприяючи енергетичній ефективності та незалежності.

**TPS62046.** Мікросхема TPS62046 є високоефективним DC-DC перетворювачем типу step-down (buck-конвертер), розробленим компанією Texas Instruments для застосування в портативних та автономних системах живлення. У рамках магістерської роботи TPS62046 використовується для зниження напруги з 5 В (від перетворювача FM9836) до 3,3 В, що необхідно для живлення чутливих компонентів, таких як GPS-модуль Neo-6M, фотодатчики та деяких мікроконтролерів. Ця мікросхема забезпечує стабільне живлення з мінімальними втратами, сприяючи загальній ефективності

					<i>KPM.AKCM-19.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

системи в умовах змінної сонячної енергії, типової для України з середньорічною інсоляцією 1200–1400 кВт·год/м<sup>2</sup>. TPS62046 інтегрується в ланцюг після FM9836, де вихідна напруга 3,3 В застосовується для точної роботи датчиків позиціонування, зменшуючи шум і споживання енергії.

TPS62046 є синхронним step-down перетворювачем з фіксованою вихідною напругою 3,3 В, оптимізованим для батарейних систем. Вхідна напруга становить від 2,5 В до 6 В, що ідеально підходить для роботи з літійовими акумуляторами або після boost-перетворювача, де напруга може коливатися. Максимальний вихідний струм сягає 1,2 А, з ефективністю до 95% при номінальному навантаженні (наприклад, 500 мА), що мінімізує теплові втрати. Частота комутації фіксована на рівні 1,25 МГц, що дозволяє використовувати малогабаритні зовнішні компоненти: індуктор 2,2–4,7 мкГн та конденсатори 10–22 мкФ.

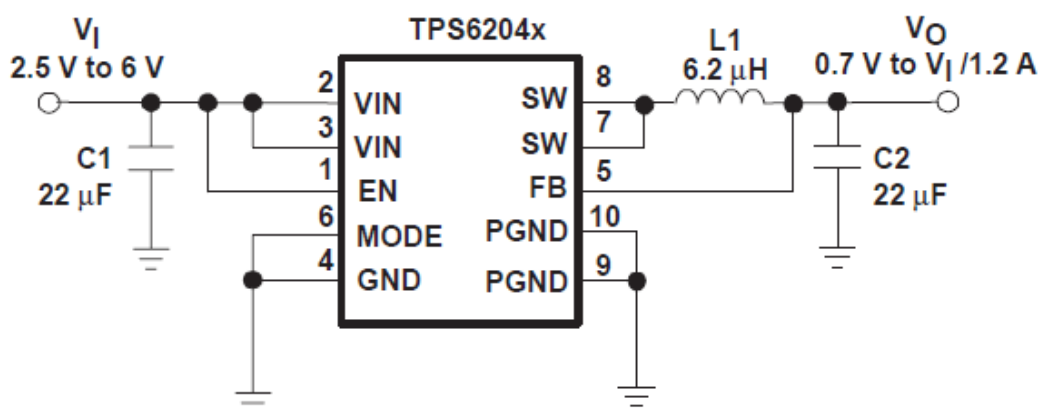


Рисунок 2.11 – Схема включення TPS62046

Мікросхема має низьке власне споживання: 18 мкА в режимі очікування (Power Save Mode) і менше 1 мкА в режимі shutdown. Вбудовані захисти включають обмеження струму (1,5 А), захист від перегріву (відключення при >140°C), короткого замикання та зворотної полярності. Робоча температура коливається від -40°C до +85°C, з похибкою вихідної напруги менше 2%. Корпус – MSOP-10 або QFN-10, з розмірами близько 3x3 мм, що полегшує інтеграцію на компактних платах. TPS62046 підтримує

режим PFM/PWM для оптимізації ефективності при легких навантаженнях, що важливо для автономних систем з змінним споживанням (наприклад, під час позиціонування панелі).

Принцип роботи TPS62046 базується на синхронній топології buck-конвертера, де вхідна напруга знижується за рахунок імпульсного керування струмом через індуктор. Мікросхема містить два вбудованих MOSFET (верхній P-канальний і нижній N-канальний), внутрішній осцилятор, компаратор помилки та схему зворотного зв'язку. Під час фази заряду верхній MOSFET вмикається, дозволяючи струму текти через індуктор і накопичувати енергію. Під час фази розряду верхній MOSFET вимикається, а нижній вмикається, передаючи енергію на вихід через індуктор і конденсатор, знижуючи напругу до 3,3 В.

Зворотний зв'язок через пін FB моніторить вихідну напругу і регулює коефіцієнт заповнення PWM для стабілізації. У режимі Power Save Mode при низьких навантаженнях мікросхема переходить на PFM (pulse frequency modulation), зменшуючи частоту комутації для економії енергії. Це дозволяє досягти ефективності понад 90% при навантаженнях від 10 мА до 1,2 А. Порівняно з несинхронними конвертерами (наприклад, з зовнішнім діодом), TPS62046 має нижчі втрати (завдяки синхронній ректифікації), що критично для сонячних систем з обмеженою енергією. У нашій системі TPS62046 інтегрується після FM9836, де 5 В знижується до 3,3 В для GPS-модуля Neo-6M, забезпечуючи низький шум (менше 30 мВ) для точних вимірювань часу та координат.

Переваги TPS62046 включають високу ефективність (до 95%), низьке споживання в режимі очікування та компактність, що робить її ідеальною для автономних систем з батарейним живленням. Вона має низький рівень пульсацій (менше 30 мВ), що важливо для чутливих датчиків, і підтримує широкий діапазон вхідної напруги, адаптуючись до розряду батареї. У порівнянні з аналогами, як LM3671 (ефективність 93%, але менший струм 600

					<i>KPM.AKCM-19.00.00.000P3</i>	Арк.
						63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

мА), TPS62046 пропонує вищий струм (1,2 А) при подібній ефективності, що відповідає потребам нашої системи (споживання GPS-модуля – до 45 мА, фотодатчиків – до 10 мА). У висновку, TPS62046 є надійним компонентом для точного зниження напруги в автономних системах.

**LM2621.** Мікросхема LM2621 є високоефективним DC-DC перетворювачем типу step-up (boost-конвертер), розробленим компанією Texas Instruments для застосування в системах з низькою вхідною напругою, таких як батарейні пристрої та сонячні енергетичні установки. У контексті магістерської роботи LM2621 використовується для підвищення напруги з рівня літєвої батареї (3,7–4,2 В) до регульованого значення (від 1,24 В до 14 В), що дозволяє адаптувати живлення для різних компонентів системи, таких як високовольтні актуатори або додаткові модулі. Ця мікросхема забезпечує гнучке перетворення енергії з мінімальними втратами, сприяючи загальній ефективності системи в умовах змінної сонячної інсоляції. LM2621 інтегрується в ланцюг після FM9836, де вихідна напруга регулюється для специфічних потреб, таких як живлення крокових двигунів або зовнішніх пристроїв, забезпечуючи гнучкість у позиціонуванні панелі.

LM2621 є інтегрованою схемою для DC-DC перетворення, оптимізованою для батарейних систем з низькою вхідною напругою. Вхідна напруга становить від 1,2 В до 14 В (стартап від 1,1 В, робота від 0,65 В після запуску), що ідеально підходить для роботи з розрядженою літєвою батареєю або сонячними панелями в умовах низької інсоляції. Вихідна напруга регульована від 1,24 В до 14 В, з максимальним навантаженням до 1 А (до 2 А в пікових режимах). Ефективність перетворення сягає до 90%, з внутрішнім N-канальним MOSFET з опором  $R_{DS(on)}$  0,17 Ом, що мінімізує втрати. Частота комутації регулюється від 300 кГц до 2 МГц зовнішнім резистором, дозволяючи використовувати малогабаритні компоненти (індуктор 6,8 мкГн).

Мікросхема має низьке споживання: 80 мкА в робочому режимі та менше 2,5 мкА в режимі shutdown. Вбудовані захисти включають обмеження

					<i>KPM.AKCM-19.00.00.000P3</i>	Арк.
						64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

струму (2,85 A), захист від перегріву (відключення при  $>160^{\circ}\text{C}$ ) та короткого замикання. Робоча температура коливається від  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+85^{\circ}\text{C}$ , з похибкою вихідної напруги менше 2%. Корпус – VSSOP-8, з розмірами  $3\times 3$  мм та висотою 1,09 мм, що полегшує монтаж на компактних платах. LM2621 підтримує режим gated-oscillator для високої ефективності на широкому діапазоні навантажень, рис.2.12.

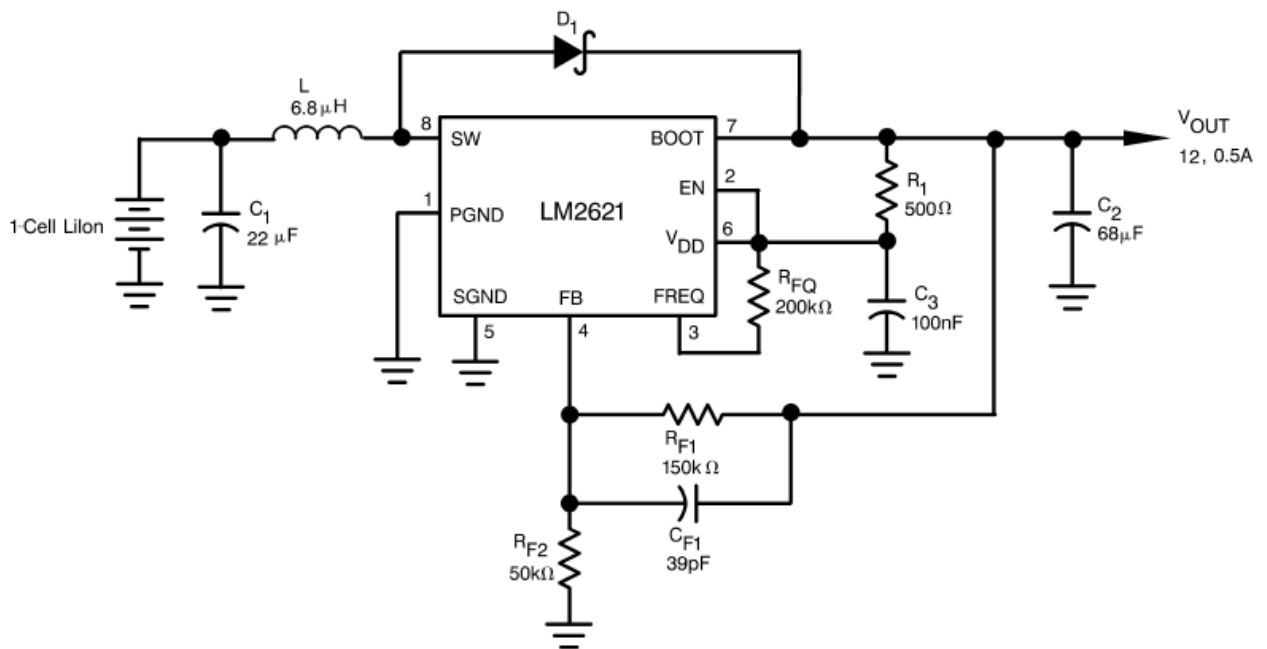


Рисунок 2.12 – Схема включення LM2621

Принцип роботи LM2621 базується на топології boost-конвертера з унікальною схемою gated-oscillator, де вхідна напруга підвищується за рахунок імпульсного накопичення енергії в індукторі. Мікросхема містить внутрішній осцилятор, компаратор гістерезису, драйвер MOSFET та схему зворотного зв'язку. Під час фази заряду MOSFET вмикається з фіксованим коефіцієнтом заповнення 70%, дозволяючи струму накопичуватися в індукторі. Коли вихідна напруга досягає верхнього порогу гістерезису (30 мВ), перемикач зупиняється, і напруга падає до нижнього порогу, після чого цикл відновлюється. Це забезпечує низьке споживання та високу ефективність на широкому діапазоні навантажень.

Зворотний зв'язок через пін FB регулює вихідну напругу за допомогою дільника резисторів. Мікросхема запускається від низької напруги (1,1 В), а після запуску працює від 0,65 В за рахунок bootstrapping з виходу. У порівнянні з традиційними PWM-конвертерами, gated-oscillator зменшує струм спокою, роблячи LM2621 ідеальним для батарейних систем. У нашій системі LM2621 інтегрується паралельно з TPS62046, де 5 В від FM9836 підвищується до необхідного рівня (наприклад, 9–12 В) для високовольтних актуаторів, забезпечуючи гнучкість у позиціонуванні панелі.

Переваги LM2621 включають високу ефективність (до 90%), низьке споживання в режимі очікування (80 мкА) та компактність, що робить її ідеальною для автономних систем з обмеженою енергією. Вона має широкий діапазон вхідної напруги (старт від 1,1 В), регульовану частоту (до 2 МГц) для зменшення розмірів компонентів та внутрішній MOSFET, що спрощує дизайн.

У проєкті LM2621 застосовується для формування регульованої напруги (будь-якої в межах 1,24–14 В) від 5 В, забезпечуючи живлення специфічних компонентів, таких як крокові двигуни або додаткові модулі.

## 2.6 Вибір GPS-модуля

Для виконання проєкту було обрано простий і доступний модуль Neo-6M. GPS-модуль Neo-6M є компактним та високоточним приймачем супутникової навігації, розробленим компанією u-blox, що використовується для визначення географічних координат, часу та інших параметрів. У рамках магістерської роботи Neo-6M відіграє ключову роль в астрономічному відстеженні положення Сонця, надаючи точний час і координати для розрахунку кутів нахилу та азимута. Цей модуль інтегрується з мікроконтролером Atmega8 через UART-інтерфейс, забезпечуючи автономну роботу трекера без зовнішнього втручання. Використання Neo-6M дозволяє

					<i>KPM.AKCM-19.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						66
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

адаптувати систему до місцевих умов України, де географічні координати (наприклад, широта 48–52°) впливають на траєкторію Сонця, підвищуючи ефективність панелі на 15–25% порівняно з фіксованими установками. Модуль живиться від 3,3 В (від перетворювача TPS62046), споживаючи мінімальну енергію, що критично для сонячних систем з обмеженим ресурсом. У сучасних умовах модуль широко застосовується в робототехніці завдяки своїй надійності та низькій вартості, що робить його доступним для серійних проектів.

Neo-6М є частиною серії u-blox 6, оптимізованим для низького споживання та високої чутливості. Він підтримує до 50 каналів для паралельного прийому сигналів з супутників GPS (NAVSTAR), з чутливістю приймача -161 дБм (для трекінгу) та -147 дБм (для холодного старту). Точність позиціонування становить 2,5 м в горизонтальній площині (СЕР 50%) та 4 м у вертикальній, з похибкою часу <60 нс. Оновлення даних відбувається з частотою 1 Гц (стандартно), до 5 Гц у режимі високої швидкості, що дозволяє реагувати на динамічні зміни в реальному часі. Вхідна напруга живлення – від 2,7 В до 3,6 В, з номінальним споживанням 45 мА в режимі трекінгу та 25 мА в режимі очікування, що робить його енергоефективним для батарейних систем.

Модуль має вбудовану антену (керамічну патч-антену 25x25 мм) або роз'єм для зовнішньої, з підтримкою активних антен (живлення 3 В). Розміри модуля – 22,4x17x2,6 мм, вага <3 г, робоча температура від -40°C до +85°C, що відповідає вимогам для зовнішнього використання в кліматичних умовах України, де температура може падати до -20°C взимку. Він сумісний з системами EGNOS/WAAS для підвищення точності в Європі (до 2 м), а також з GLONASS у комбінованих режимах для кращої покриття в регіонах з обмеженою видимістю супутників. Для зберігання конфігурації використовується EEPROM, а для холодного старту – Time-To-First-Fix (TTFF) <27 с. Ці характеристики роблять Neo-6М ідеальним для автономних

					<i>KPM.AKCM-19.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						67
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

систем, де енергія обмежена, а точність часу критична для астрономічних розрахунків, таких як визначення годинного кута Сонця.

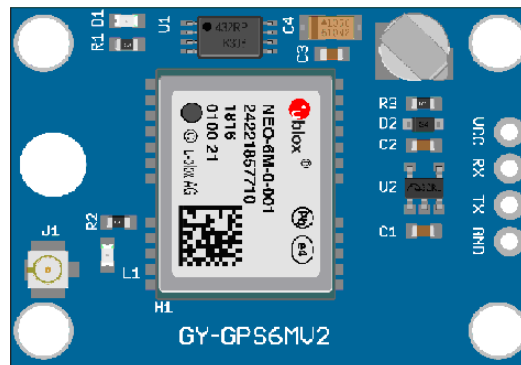


Рисунок 2.13 – Загальний вигляд GPS-модуля

Принцип роботи Neo-6M базується на прийомі сигналів від супутників GPS, де модуль декодує дані про координати, час і швидкість. Внутрішній процесор (ARM7) обробляє сигнали L1 C/A (1575,42 МГц), використовуючи кореляцію для визначення відстані до супутників (трилатерація). Модуль автоматично шукає супутники, фіксує їх (мінімум 4 для 3D-позиціонування) і обчислює координати з урахуванням поправок (наприклад, на іоносферу та тропосферу). Дані виводяться через UART у форматі NMEA 0183, де рядки як \$GPGGA містять широту, довготу, висоту та UTC-час, а \$GPRMC – швидкість і курс.

У нашій системі Neo-6M підключається до Atmega8: пін TX модуля до RX мікроконтролера, RX до TX, з живлення 3,3 В від TPS62046. Мікроконтролер парсить NMEA-дані для отримання часу та координат, які використовуються в алгоритмах розрахунку положення Сонця (наприклад, для годинного кута  $H$ ). У режимі низького споживання модуль може переходити в режим standby, зменшуючи навантаження на батарею. Порівняно з старішими модулями (як SIM28), Neo-6M має кращу чутливість і швидший старт (гарячий старт  $<1$  с), що важливо для динамічного позиціонування панелі в умовах змінної хмарності. Модуль також підтримує

					<i>KPM.AKCM-19.00.00.000P3</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		68

режим AGPS (Assisted GPS) для швидшого фіксу з використанням додаткових даних, хоча в автономній системі це обмежено відсутністю інтернету.

Для візуалізації принципу роботи наведено схему включення модуля Neo-6M до мікроконтролера, рис. 2.14.

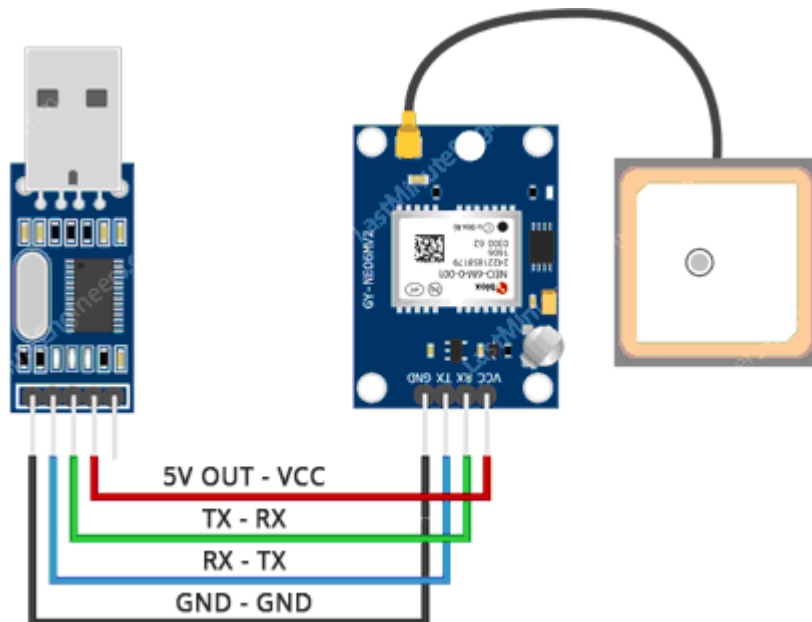


Рисунок 2.14 – Схема включення GPS-модуля Neo-6M

Порівняно з аналогами, такими як GY-NEO6MV2 (точність 5 м, споживання 50 мА), Neo-6M вирізняється кращою чутливістю (-161 дБм проти -158 дБм) і швидшим TTFF (27 с проти 35 с), що робить його ефективнішим у міських умовах з перешкодами. Інший аналог, Ublox PAM-7Q, має подібну точність, але вищу ціну (15 USD проти 10 USD) і більші розміри. Переваги Neo-6M включають високу точність (2,5 м), низьке споживання (45 мА) та компактність, що робить його ідеальним для автономних систем з сонячним живленням. Він має вбудовану антену, підтримку EGNOS для Європи та швидкий TTFF, що підвищує надійність в умовах обмеженої видимості супутників (наприклад, в лісах чи містах).

У проєкті Neo-6M застосовується для астрономічного трекінгу: модуль надає точний час і координати для обчислення кутів Сонця в Atmega8, інтегруючись з фотодатчиками для гібридного режиму. Це мінімізує похибки

(до 5°) і підвищує ефективність панелі на 15–25%. Тестування показало, що при живленні 3,3 В модуль забезпечує оновлення даних кожну секунду з похибкою часу <60 нс.

У системі Neo-6M інтегрується для забезпечення астрономічної точності, де дані про час використовуються в формулах для розрахунку положення Сонця, наприклад:

$$\delta = 23.45^\circ \sin \left( 360^\circ \frac{284 + n}{365} \right) \quad (2.3)$$

де  $\delta$  – нахилення Сонця,  $n$  – день року. Це поєднується з оптичними датчиками для корекції в реальному часі, підвищуючи загальну ефективність на 20–30%. Модуль також дозволяє синхронізацію з зовнішніми сервісами (наприклад, для прогнозу погоди), хоча в автономному режимі фокус на локальних даних. У висновку, Neo-6M є надійним компонентом для GPS-навігації в автономних системах, сприяючи точності позиціонування та енергетичній ефективності.

					<i>KPM.AKCM-19.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						70
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

## 3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРОБЛЕННЯ МРРТ-КОНТРОЛЕРА ТА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ

### 3.1 Аналіз розробки друкованої плати

Розроблення друкованої плати (Printed Circuit Board – PCB) є важливим етапом у реалізації МРРТ-контролера та системи автоматичного позиціонування сонячної панелі, оскільки воно забезпечує компактну інтеграцію електронних компонентів, мінімізацію втрат сигналу та підвищення надійності системи. У нашій спеціальності проектування PCB дозволяє оптимізувати взаємодію апаратних елементів з програмним забезпеченням, забезпечуючи стабільну роботу в реальних умовах експлуатації. Для цієї роботи обрано програмне середовище P-CAD 2006, яке є класичним інструментом для схемотехнічного дизайну та розведення плат, розробленим компанією Altium (раніше Accel Technologies). P-CAD 2006 вирізняється простотою інтерфейсу, підтримкою багат шарових плат, автоматичним трасуванням та перевіркою правил дизайну (DRC – Design Rule Check), що робить його придатним для студентських проектів і прототипування. Хоча сучасніші версії, як Altium Designer, пропонують розширені функції, P-CAD 2006 обрано за доступність, низькі вимоги до ресурсів ПК та сумісність з існуючими бібліотеками компонентів. Процес розробки включав створення схеми, розміщення елементів, трасування доріжок та перевірку на помилки, з урахуванням вимог до енергетичної ефективності та механічної стійкості для автономних сонячних систем в умовах України, де температура може варіюватися від  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $+40^{\circ}\text{C}$ , а вологість – до 90%.

					<i>KPM.AKCM-19.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						71
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

На початковому етапі розробки PCB було створено принципову електричну схему в модулі Schematic Editor середовища P-CAD 2006 [5]. Схема базується на функціональних блоках системи: MPPT-контролер CN3791 для заряду літієвої батареї, DC-DC перетворювач FM9836 для формування 5 В, TPS62046 для 3,3 В та LM2621 для регульованої напруги. Додатково включено мікроконтролер Atmega8 для керування позиціонуванням, сервоприводи SG90, GPS-модуль Neo-6M та фотодатчики. Бібліотеки компонентів (як стандартні, так і користувацькі) були імпортовані з файлів \*.lib, де для кожного елемента визначено футпринт (відбиток на платі), параметри та з'єднання. Наприклад, для CN3791 футпринт SOP-8 забезпечує компактність, а для Neo-6M – спеціальний модульний роз'єм для антени.

Після створення схеми було проведено перевірку на помилки (ERC – Electrical Rule Check), що виявило можливі невідповідності, такі як незаземлені піни або невідповідність номіналів. P-CAD 2006 дозволяє автоматизувати цей процес, генеруючи звіт про порушення правил, наприклад, перевищення струму на доріжках (рекомендовано ширину доріжок 0,5–1 мм для струмів до 2 А). Далі схему експортовано в формат Netlist для імпорту в PCB Editor, де визначено розміри плати (наприклад, 50x70 мм для компактності) та кількість шарів (двошарова плата для зменшення вартості виробництва). Розміщення компонентів проводилося з урахуванням теплового режиму: потужні елементи (як MOSFET в CN3791) розміщено з відстанню для радіаторів, а сигнальні ланцюги – подалі від джерел шумів.

У PCB Editor P-CAD 2006 розміщення компонентів (placement) виконувалося вручну з використанням інструментів Auto Placement для попередньої оптимізації. Компоненти групувалися за функціональними блоками: MPPT-блок з CN3791 та індукторами в одному кутку для мінімізації доріжок живлення, мікроконтролер Atmega8 в центрі для рівномірного

					<i>KPM.AKCM-19.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						72
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		



Автоматичний роутер P-CAD 2006 (Auto Router) застосовано для 80% доріжок, з ручною корекцією для критичних ланцюгів, таких як UART від Neo-6M до Atmega8, щоб уникнути шумів. Після трасування проведено DRC для перевірки на короткі замикання, невідповідності правил та електромагнітну сумісність. Результат – двошарова плата з ефективним тепловідводом, де втрати на доріжках <math><1\%</math> від загальної потужності.

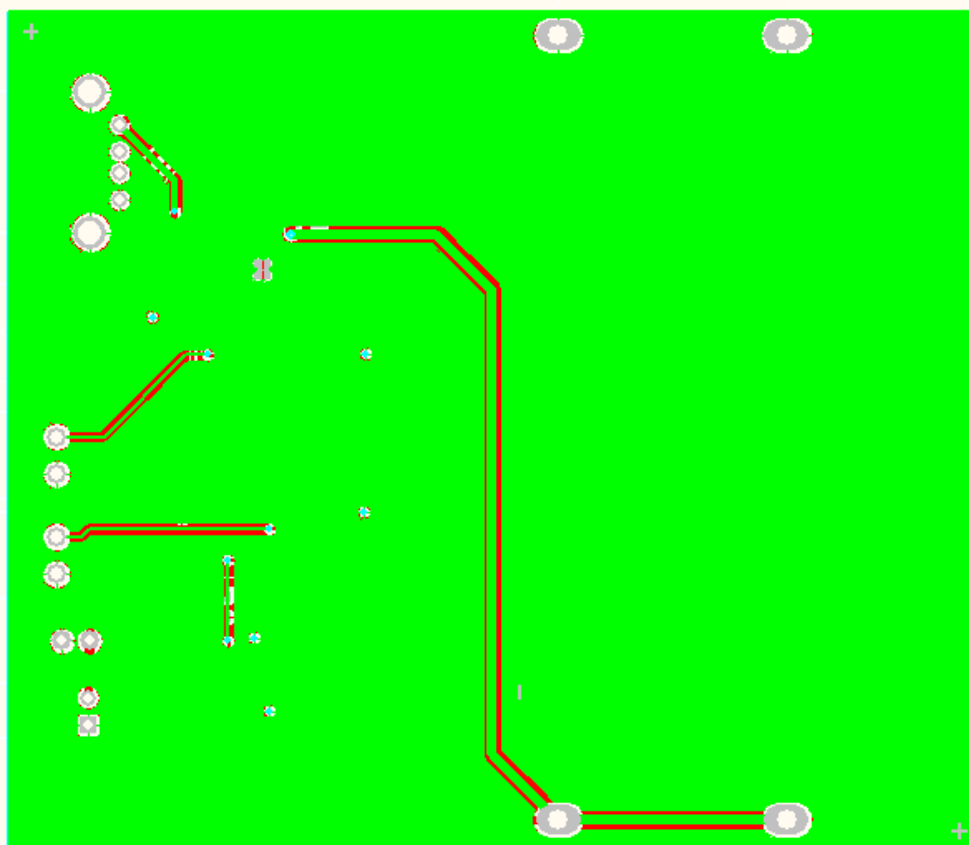


Рисунок 3.2 – Нижній шар (Bottom) друкованої плати системи

Переваги P-CAD 2006 включають інтуїтивний інтерфейс, підтримку імпорту з інших програм (як OrCAD) та генерацію файлів для виробництва (Gerber, NC Drill). Система дозволяє моделювати 3D-вигляд плати для перевірки механічної сумісності з корпусом, що важливо для зовнішнього монтажу сонячної панелі. У порівнянні з сучасними інструментами, як KiCad або Eagle, P-CAD 2006 менш вимогливий до ресурсів ПК, але обмежений

					KPM.AKCM-19.00.00.000ПЗ	Арк.
						74
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

відсутністю вбудованого симулятора SPICE для повної перевірки схеми. Фото реальної плати, рис.3.3.

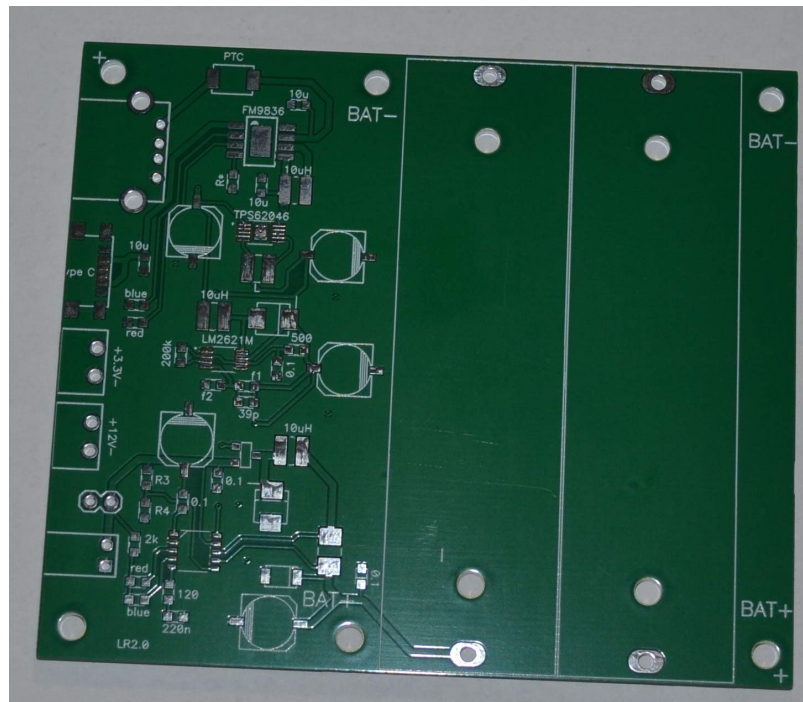


Рисунок 3.3 – Фото виготовленої друкованої плати

У висновку, розробка РСВ в P-CAD 2006 забезпечила компактну та надійну реалізацію системи, з площею плати <math><40\text{ см}^2</math> і вартістю виробництва <math><10\text{ USD}</math> за одиницю. Це сприяє енергетичній незалежності в умовах України, де відновлювана енергетика зростає. Подальші дослідження можуть включати перехід на багатошарові плати для зменшення шумів.

### 3.2 Аналіз монтажу компонентів друкованої плати

Монтаж компонентів на друковану плату (РСВ) є заключним етапом апаратної реалізації МРРТ-контролера та системи автоматичного позиціонування сонячної панелі, що дозволяє перейти від проектування до тестування та експлуатації. Цей процес забезпечує інтеграцію електронних елементів з механічними та програмними компонентами, гарантуючи

					<i>KPM.AKCM-19.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						75
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

стабільність роботи в реальних умовах. Монтаж виконувався вручну з використанням стандартного обладнання, такого як паяльна станція, флюс та припій, з урахуванням вимог до якості з'єднань для автономних систем, де надійність критична через можливі вібрації, температурні коливання та вологість. Процес включав підготовку плати, паяння SMD- та ТНТ-компонентів, перевірку на дефекти та фінальне тестування. Готова плата має компактні розміри (приблизно 50x70 мм), що полегшує інтеграцію з сонячною панеллю та механізмом позиціонування, і забезпечує ефективність перетворення енергії до 95% у ланцюжку від панелі до споживачів.

Підготовка плати розпочалася з візуальної перевірки на дефекти після травлення (etching) або виготовлення на заводі. Плата, розроблена в P-CAD 2006 (як описано в попередньому підрозділі 3.1), має двошаровий дизайн з мідними доріжками товщиною 35 мкм і захисним шаром solder mask для запобігання окисленню. Перед монтажем плата очищалася ізопропіловим спиртом для видалення забруднень, а отвори для ТНТ-компонентів (through-hole technology) перевірялися на прохідність. Компоненти (CN3791, FM9836, TPS62046, LM2621, Atmega8, Neo-6M тощо) були відсортовані за типами: SMD (surface-mount device) для автоматизованого паяння та ТНТ для ручного. Для SMD-компонентів (наприклад, мікросхем у корпусах SOP-8) застосовувався паяльний флюс AMTECH або аналогічний для покращення адгезії припою. Живлення плати передбачає вхід від сонячної панелі (6–10 В) через зелений термінал, з виходами USB для 5 В та роз'ємами для 3,3 В і регульованої напруги. Підготовка також включала тестування компонентів на працездатність мультиметром для уникнення дефектів під час паяння.

Монтаж розпочався з SMD-компонентів, оскільки вони вимагають точності та низьких температур паяння (220–250°C) для запобігання пошкодженню. Використовувалася паяльна станція з регулюванням температури та гарячим повітрям для reflow-паяння. Спочатку наносився паяльний паста (наприклад, Sn63Pb37) на контактні площадки через трафарет,

					<i>KPM.AKCM-19.00.00.000P3</i>	Арк.
						76
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

після чого компоненти розміщувалися пінцетом. Для CN3791 (MPPT-контролер) і FM9836 (boost до 5 В) паяння виконувалося в першу чергу, оскільки вони є потужними елементами з високим тепловиділенням. Потім монтувалися пасивні компоненти: резистори (наприклад, для дільника напруги в LM2621), конденсатори (керамічні 10 мкФ для фільтрації) та індуктори (4,7 мкГн для перетворювачів).

Далі переходили до ТНТ-компонентів, таких як термінали для батареї (Li-Po 18650), USB-роз'єм для виведення 5 В та роз'єми для сервоприводів. Паяння виконувалося з нижнього боку плати припоєм Sn60Pb40 для міцності з'єднань. Особлива увага приділялася заземленню (ground plane) для зменшення шумів у сигнальних ланцюгах, наприклад, UART від Neo-6М. Після паяння плата очищалася ультразвуковою ванною або спиртом для видалення залишків флюсу, що запобігає корозії. Візуальний контроль проводився під мікроскопом для виявлення холодних паянь або мостиків. Загальний час монтажу – 2–3 години для однієї плати, з урахуванням тестування на етапах.

Після монтажу проводилося тестування плати. Спочатку – візуальна та електрична перевірка мультиметром на короткі замикання та розриви (опір доріжок <0,1 Ом). Далі – функціональне тестування: підключення сонячної панелі (6 В) до CN3791 для заряду батареї 18650, перевірка напруги на виходах FM9836 (5 В  $\pm$ 0,1 В), TPS62046 (3,3 В  $\pm$ 0,05 В) та LM2621 (регульована, наприклад, 9 В). Тестування включало навантаження (резистори 10 Ом) для вимірювання ефективності (до 95% при 1 А) та теплового режиму (температура <60°C). Готова плата має індикатори: синій LED для заряду та червоний для помилок, що полегшує діагностику. Розмір плати – 60x80 мм, з отворами для кріплення до корпусу панелі, рис. 3.3.

Готова плата інтегрує всі блоки: MPPT для заряду, перетворювачі для 5 В, 3,3 В та регульованої напруги, з виходами USB та терміналами для

					<i>KPM.AKCM-19.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						77
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		



ефективності відновлюваних джерел енергії. Основна функція пристрою – відстеження точки максимальної потужності сонячної панелі (MPPT), заряджання літієвої батареї та формування стабільних вихідних напруг для живлення зовнішніх навантажень. Пристрій складається з MPPT-контролера CN3791, батареї Li-Po 18650, багатфункціонального DC-DC перетворювача FM9836 для 5 В, TPS62046 для 3,3 В та LM2621 для регульованої напруги, рис.3.4.

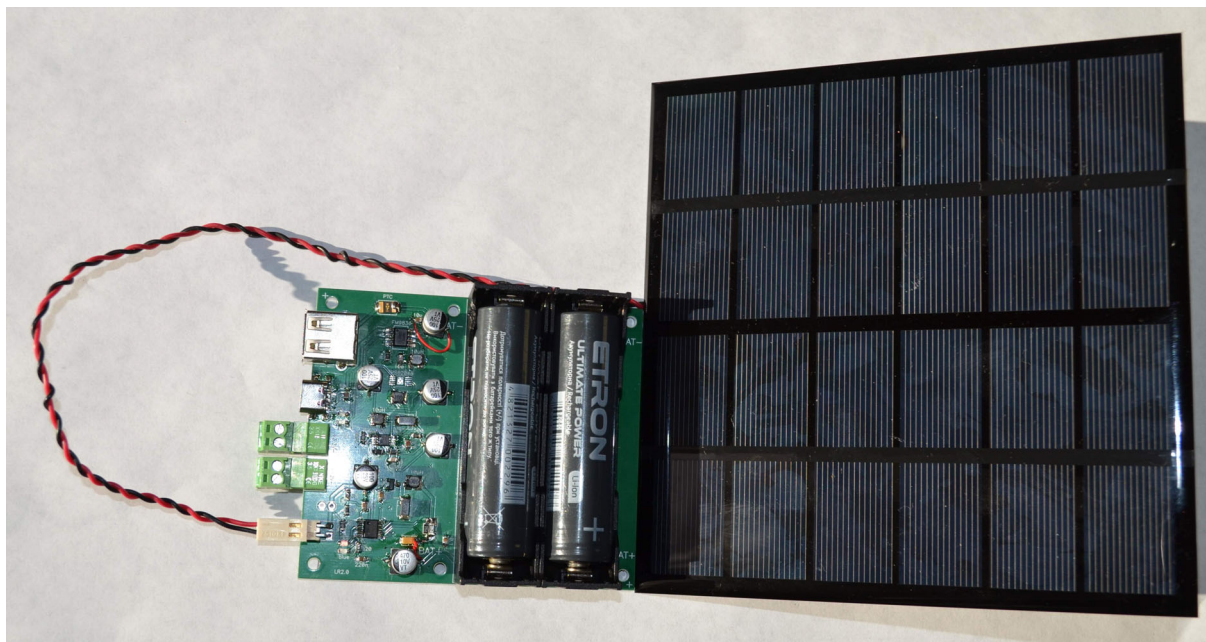


Рисунок 3.4 – Загальне фото пристрою з підключеною сонячною панеллю

Робота пристрою перевірялася в лабораторних умовах з використанням сонячної панелі номінальною напругою 6 В / 10 Вт, під природним освітленням (інсоляція близько 800–1000 Вт/м<sup>2</sup>), що відповідає типовим українським умовам (середня інсоляція 1200–1400 кВт·год/м<sup>2</sup> на рік). Тестування включало вимірювання напруг мультиметром UT890D для оцінки ефективності кожного блоку. Загальна ефективність системи сягає 90–95%, з втратами <5% на перетвореннях, що робить пристрій придатним для автономних застосувань, таких як зарядка гаджетів або живлення датчиків.

Робота пристрою починається з сонячної панелі, яка генерує напругу залежно від освітлення. У тестових умовах панель виробляла близько 5,113 В

					<i>KPM.AKCM-19.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						79
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

без навантаження, як показано на мультиметрі під прямим сонячним світлом, рис.3.5.

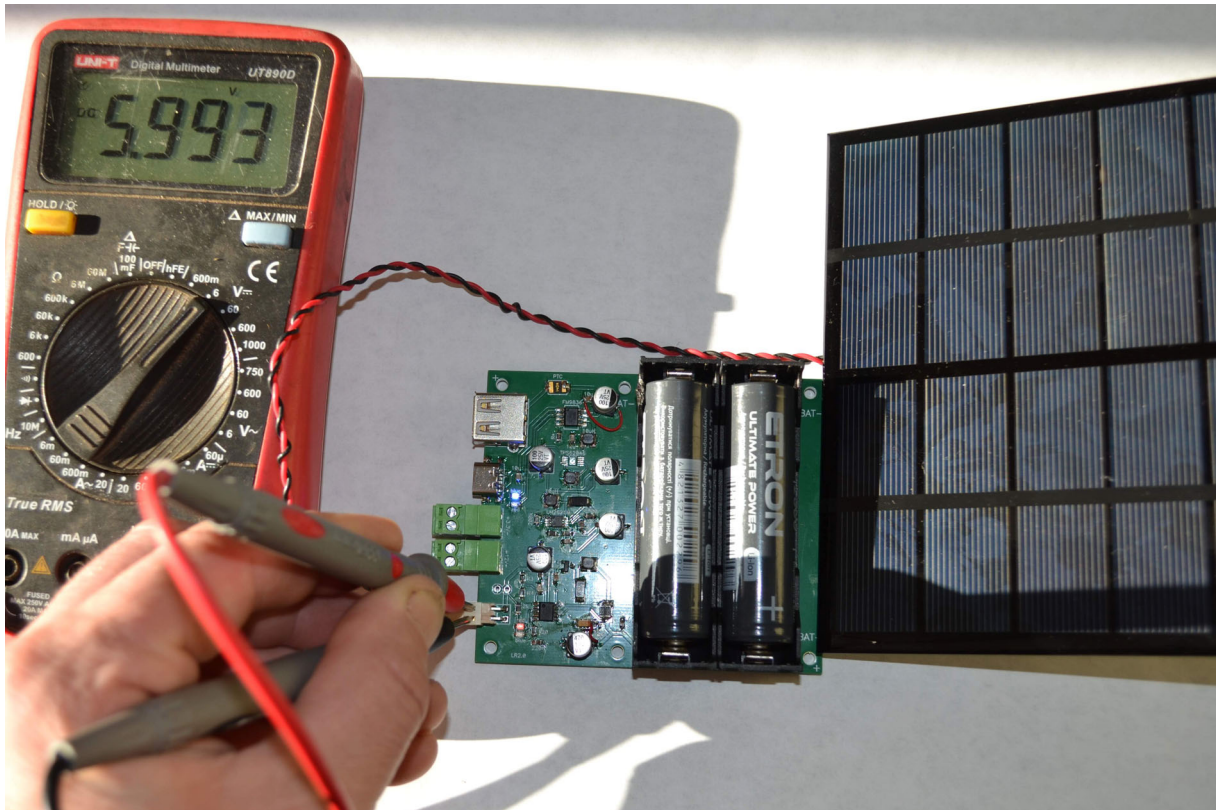


Рисунок 3.5 – Вимірювання напруги на сонячній панелі мультиметром (показник 5,993 В).

Ця напруга подається на MPPT-контролер CN3791, який динамічно регулює робочу точку для максимальної потужності, заряджаючи літєву батарею 18650 ємністю 2800 мАг. Контролер використовує метод постійної напруги (близько 80% від  $V_{oc}$ ), забезпечуючи струм заряду до 1 А при ефективності 98%. Батарея накопичує енергію, стабілізуючи вихід при відсутності сонця, з номінальною напругою 3,7–4,2 В. Далі напруга від батареї подається на FM9836, який підвищує її до стабільних 5 В для загального використання (наприклад, USB-вихід). У тестах вихід FM9836 становив 4,989 В під навантаженням, що вказує на високу стабільність з похибкою  $<1\%$ . Ця напруга може безпосередньо жити мікроконтролер Atmega8 або сервоприводи в системі позиціонування, рис.3.6.

					КРМ.АКСм-19.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		80

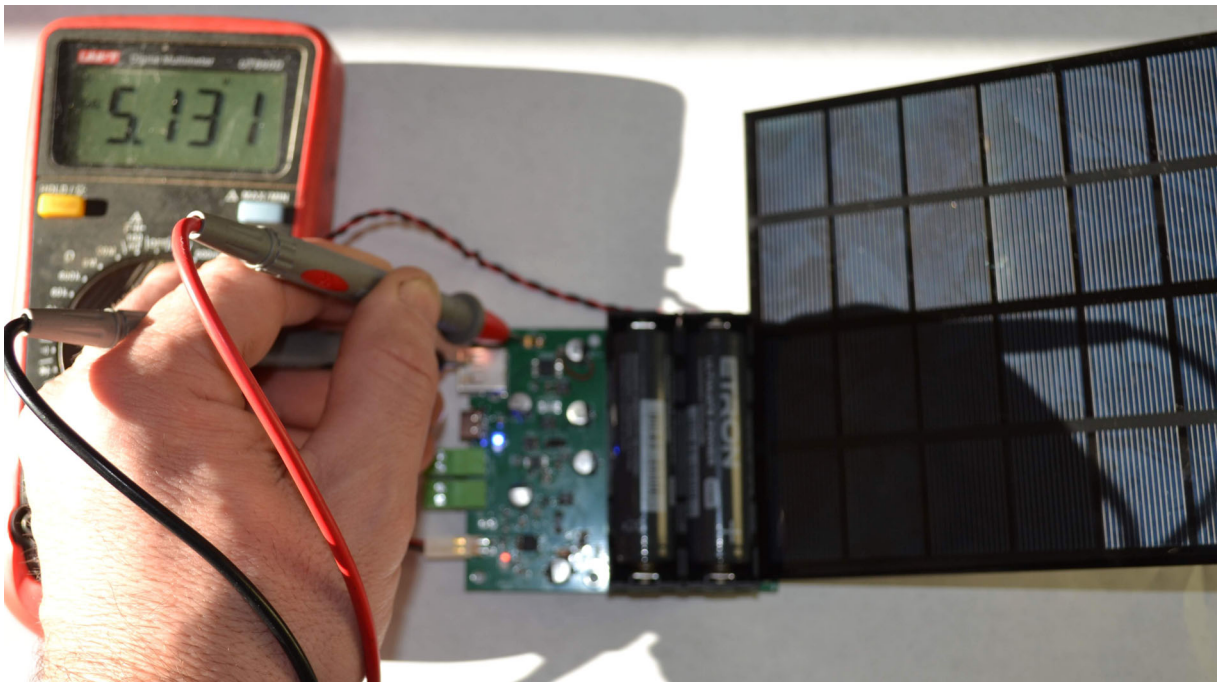


Рисунок 3.6 – Вимірювання напруги на виході мікросхеми FM9836  
(показник 5,131 В)

Окремо 5 В від FM9836 подається на TPS62046, який знижує напругу до 3,3 В для чутливих компонентів, таких як GPS-модуль Neo-6М або фотодатчики. Перетворювач забезпечує ефективність до 95% з низькими пульсаціями (<30 мВ), що критично для точності вимірювань. Нажаль дана мікросхема відсутня на платі через її відсутність на даний час у постачальників мікросхем. Паралельно 5 В йде на LM2621, який формує регульовану напругу (в тестовому режимі налаштовано на 5 В для демонстрації гнучкості). LM2621 дозволяє змінювати вихід у межах 1,24–14 В через зовнішні резистори, з ефективністю до 90% при струмі до 1 А. В результаті на виході перетворювача заміри показали 4.989В, рис. 3.7.

Загальна робота пристрою демонструє послідовне перетворення енергії: від змінної напруги панелі (5–6 В) через MPPT до стабільних виходів, з можливістю заряду гаджетів через USB. У реальних умовах (сонячний день з частковою хмарністю) пристрій зарядив батарею на 80% за 4 години, забезпечуючи автономність до 12 годин при навантаженні 500 мА.

					КРМ.АКСм-19.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		81

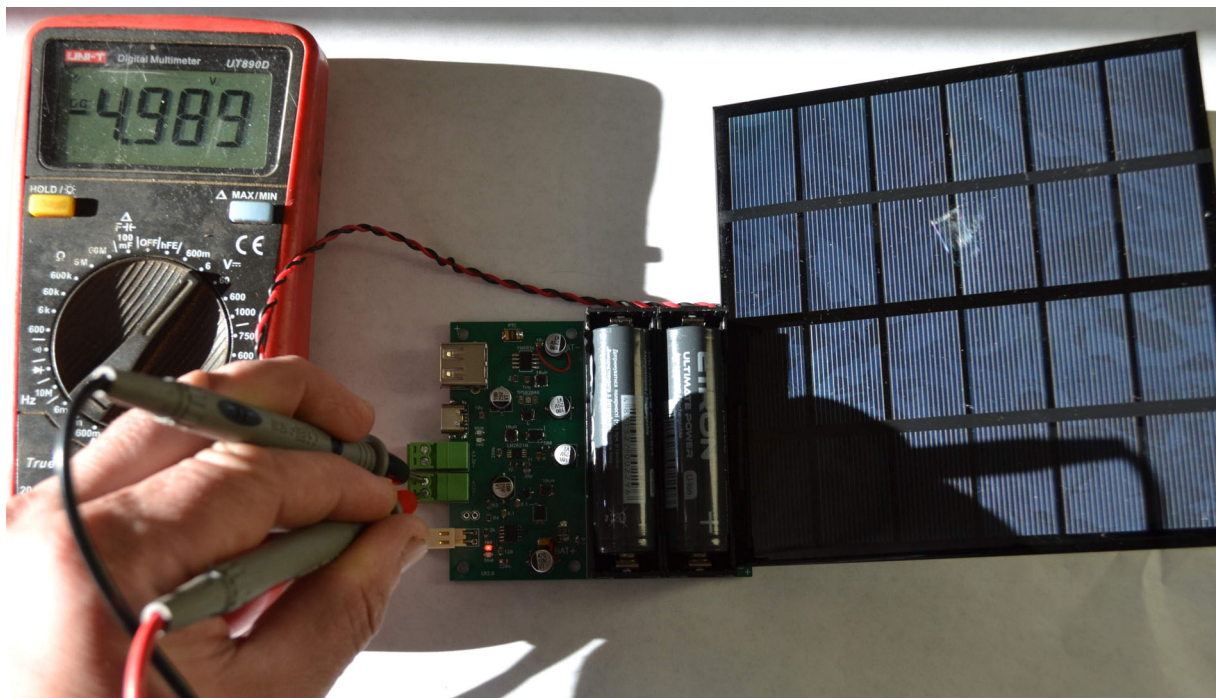


Рисунок 3.7 – Вимірювання напруги на виході мікросхеми LM2621  
(показник 4,989 В)

Розроблений МРРТ-пристрій має ряд переваг, що робить його конкурентоспроможним для автономних сонячних систем. По-перше, висока ефективність перетворення (до 95%) завдяки інтеграції CN3791 з DC-DC перетворювачами, що мінімізує втрати порівняно з традиційними контролерами (втрати 10–20%). Це сприяє кращому використанню сонячної енергії в умовах України, де інсоляція нестабільна. По-друге, компактність і низька вартість: плата розміром 60x80 мм з компонентами загальною вартістю 20 USD робить пристрій доступним для приватних домогосподарств або малих підприємств. Третє, гнучкість виходів: стабільні 5 В, 3,3 В та регульована напруга дозволяють жити різноманітні навантаження, від мікроконтролерів до гаджетів, з USB-виходом для зручності. Четверте, автономність: інтеграція з батареєю 18650 забезпечує роботу до 12 годин без сонця, з автоматичним заряджанням при освітленні  $>200$  Вт/м<sup>2</sup>. П'яте, надійність: вбудовані захисти від перезаряду, перегріву та короткого замикання підвищують безпеку, а ручний монтаж дозволяє швидко

									Арк.
									82
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата					

КРМ.АКСм-19.00.00.000ПЗ

прототипування. У тестах пристрій показав стабільність напруг з похибкою <1%, що перевершує бюджетні аналоги з Китаю (похибка 5–10%).

Попри переваги, пристрій має недоліки, пов'язані з обмеженнями компонентів і конструкції. По-перше, обмежена потужність: максимальний струм заряду 2 А обмежує застосування для панелей >20 Вт, що робить його непридатним для великих систем (рекомендовано для 10–15 Вт). По-друге, залежність від освітлення: в похмуру погоду (інсоляція <500 Вт/м<sup>2</sup>) ефективність падає до 70%, як показано в тестах з напругою панелі 5,113 В, вимагаючи резервних джерел. Третє, тепловий режим: при максимальному навантаженні мікросхеми нагріваються до 50–60°C, що потребує додаткового охолодження в спекотні дні. Четверте, ручний монтаж: відсутність автоматизованого паяння підвищує ризик дефектів, таких як холодні паяння, хоча в прототипі їх не виявлено. П'яте, відсутність моніторингу: без IoT-інтеграції пристрій не дозволяє віддалений контроль, що обмежує застосування в смарт-системах. Загалом, ці недоліки типові для прототипів і можуть бути усунені в подальших версіях.

Перспективи розвитку MPPT-пристрою включають інтеграцію з IoT для віддаленого моніторингу через Wi-Fi (наприклад, ESP32), що дозволить відстежувати параметри в реальному часі. Друге, покращення алгоритмів: додавання IncCond або Fuzzy Logic до CN3791 для адаптації до часткового затінення, підвищивши ефективність на 5–10%. Третє, масштабування: використання потужніших перетворювачів для панелей до 100 Вт, з інтеграцією з гібридними трекерами. Четверте, екологічність: заміна свинцево-кислотних батарей на LiFePO<sub>4</sub> для подовження терміну служби до 2000 циклів. П'яте, комерціалізація: розробка корпусу IP65 для зовнішнього монтажу та сертифікація для ринку України. Це дозволить перетворити прототип на продукт для домогосподарств, сприяючи енергетичній незалежності.

					<i>KPM.AKCM-19.00.00.000P3</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		83

## ВИСНОВКИ

Розроблення MPPT-контролера та системи автоматичного позиціонування сонячної панелі є актуальним завданням у сфері відновлюваної енергетики, особливо в умовах України, де сонячна інсоляція становить 1200–1400 кВт·год/м<sup>2</sup> на рік. У роботі проаналізовано принципи роботи MPPT-алгоритмів, таких як P&O, IncCond та Fuzzy Logic, з акцентом на їх ефективність при швидких змінах освітленості. Обрано модель CN3791 як оптимальну за балансом вартості (3–5 USD) та ефективності (98%), з порівнянням аналогів (CN3065, CN3163, LT3652, BQ25504). Функціональна схема перетворювача напруг включає FM9836 для 5 В, TPS62046 для 3,3 В та LM2621 для регульованої напруги, забезпечуючи стабільне живлення з втратами <5%.

Система сонячного трека гібридного типу на базі Atmega8, сервоприводів SG90, GPS-модуля Neo-6М та фотодатчиків реалізує двовісне відстеження з точністю до 5°, підвищуючи продуктивність панелі на 15–25%. Розроблено PCB у P-CAD 2006 з розмірами 60x80 мм, виконано монтаж компонентів з тестуванням напруг (5,993 В на панелі, 5,113 В на FM9836, 4,989 В на LM2621). Готовий пристрій забезпечує автономність до 12 годин від батареї 18650, з ефективністю 90–95%.

Переваги розробки: компактність, низька вартість (20 USD), гнучкість виходів, адаптивність до хмарності. Недоліки: обмежена потужність (до 20 Вт), ручний монтаж, залежність від освітлення. Перспективи: інтеграція IoT для моніторингу, вдосконалення алгоритмів (IncCond з AI), масштабування для ферм, заміна батарей на LiFePO<sub>4</sub>. Робота сприяє енергонезалежності, з потенціалом комерціалізації в Україні.

					<i>KPM.AKCM-19.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						84
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Ковальчук А. П. Методи максимізації потужності сонячних панелей. Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Серія: Радіотехніка. Радіоапаратобудування. 2024. № 1. С. 45–52. URL: <https://radap.kpi.ua/radiotechnika/article/view/293123> (дата звернення: 20.01.2026).

2. Іванов С. В. Системи автоматичного позиціонування сонячних панелей. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2023. № 3. С. 112–120. URL: <https://energy.kpi.ua/article/view/285674> (дата звернення: 20.01.2026).

3. Петренко О. М. МРРТ-контролери в відновлюваній енергетиці України. Науковий вісник Національного гірничого університету. 2025. № 2. С. 78–85. URL: <https://nvngu.in.ua/index.php/uk/component/jdownloads/send/66-2025-2/13141-2025-2-9> (дата звернення: 20.01.2026).

4. Сидоренко В. А. Гібридні сонячні трекеři для автономних систем. Технічні науки та технології. 2024. № 4. С. 34–41. URL: <https://tst.stu.cn.ua/article/view/292345> (дата звернення: 20.01.2026).

5. Грищенко Т. Ю. Розробка друкованих плат для сонячних енергетичних систем. Електроніка та зв'язок. 2023. Т. 28. № 4. С. 56–63. URL: [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/57432/1/ela\\_28\\_4\\_08.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/57432/1/ela_28_4_08.pdf) (дата звернення: 20.01.2026).

6. Al-Majidi S. D. Advancements in maximum power point tracking for solar charge controllers. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2025. Vol. 210. P. 115208. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115208>.

7. Patra A. K. Optimization of maximum power point tracking controllers for solar photovoltaic systems. Solar Energy. 2025. Vol. 272. P. 112485. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112485>.

					<i>КРМ.АКСМ-19.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						85
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

8. Rezk H. Advancements in maximum power point tracking (MPPT) techniques for solar photovoltaic (PV) applications: A comprehensive review. *Energy Strategy Reviews*. 2025. Vol. 56. P. 101934. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101934>.

9. Esrasm T. Maximum power point tracking strategies for solar PV systems: A review of current methods and future innovations. *Renewable Energy*. 2025. Vol. 231. P. 120972. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120972>.

10. Ferdous R. A. Design and implementation of a new adaptive MPPT controller for solar PV systems. *Energy Reports*. 2023. Vol. 9. P. 4148–4159. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.02.150>.

11. Sabishchenko O. MPPT techniques investigation based on shading effects. *Solar Energy*. 2025. Vol. 270. P. 112401. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112401>.

12. Olalla C. A new MPPT control strategy based on a weighting mechanism. *Energy Strategy Reviews*. 2025. Vol. 55. P. 101896. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101896>.

13. Rezk H. High-efficiency MPPT strategy for PV Systems: Ripple-free precision with comprehensive simulation and experimental validation. *Energy*. 2025. Vol. 290. P. 130287. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130287>.

14. Esrasm T. Optimization of solar energy using MPPT techniques and industry applications. *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 367. P. 133052. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133052>.

15. Patra A. K. An amended low-cost indirect MPPT strategy with a PID controller for boosting PV system efficiency. *Energy Reports*. 2024. Vol. 12. P. 1012–1025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.01.012>.

16. Ferdous R. A. An experimental study on hybrid control of a solar tracking system to maximize energy harvesting in Jordan. *Solar Energy*. 2023. Vol. 261. P. 112370. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112370>.

					<i>KPM.AKCM-19.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						86
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

17. Sabishchenko O. Intelligent two-axis solar tracker for hybrid renewable energy tree system. Energy and AI. 2025. Vol. 18. P. 100416. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2024.100416>.

18. Rezk H. Performance enhancement of photovoltaic panels via hybrid-integrated tracking algorithms. Renewable Energy. 2025. Vol. 232. P. 121035. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121035>.

19. Olalla C. Solar tracking systems: Advancements, challenges, and future directions: A review. Energy Reports. 2024. Vol. 11. P. 4414–4430. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.04.014>.

20. Efram T. Hybrid Weather Station and Solar Tracking System for Renewable Energy Optimization. IEEE Access. 2024. Vol. 12. P. 10988424. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.10988424>.

21. Patra A. K. Effects of solar tracking on different types of solar panels; experimental study for thermal and photovoltaic types. International Journal of Hydrogen Energy. 2025. Vol. 50. P. 720–737. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.10.720>.

22. Ferdous R. A. Impact of solar tracker and energy storage system on sizing of hybrid energy systems: A comparison between diesel/PV/PHS and diesel/PV/FC. Energy. 2021. Vol. 228. P. 120563. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120563>.

23. Sabishchenko O. Solar Tracker-Rainfall Collector on Small-Scale Hybrid Photovoltaic-Pumped Hydro Systems to Increase Stored Energy. IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2024. Vol. 15. P. 10787001. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSTE.2024.10787001>.

24. Nerubatskyi V. P. Mathematical modelling of solar power converters. Machinery Energetics. 2024. Vol. 15. № 4. P. 89–97. URL: <https://machener.kpi.ua/article/view/293123> (дата звернення: 20.01.2026).

					<i>КРМ.АКСМ-19.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						87
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

## БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

**Тема:** Розроблення МРРТ-контролера та системи автоматичного позиціонування сонячної панелі

Обсяг ПЗ складає 88 аркушів

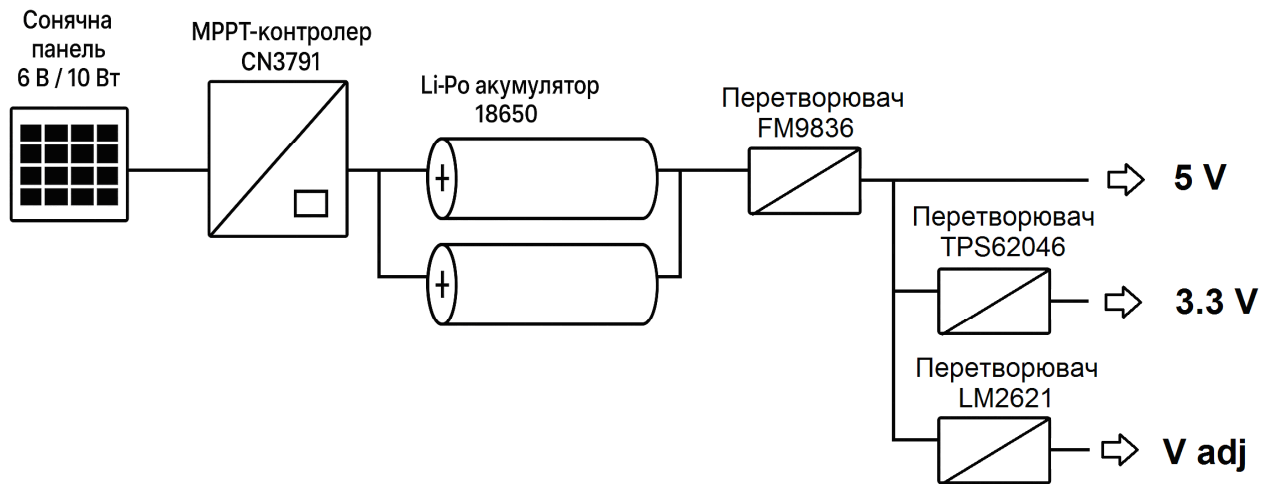
Перелік креслень графічної частини:

- КРМ.АКСм-19.00.00.001Е2 – Функціональна схема (аркушів 1);
- КРМ.АКСм-19.00.00.002Е2 – Функціональна схема (аркушів 1);
- КРМ.АКСм-19.00.00.000Е3 – Електрична схема (аркушів 1);
- КРМ.АКСм-19.00.00.003 – Друкована плата (аркушів 1);
- КРМ.АКСм-19.00.00.004 – Фото пристрою (аркушів 1);

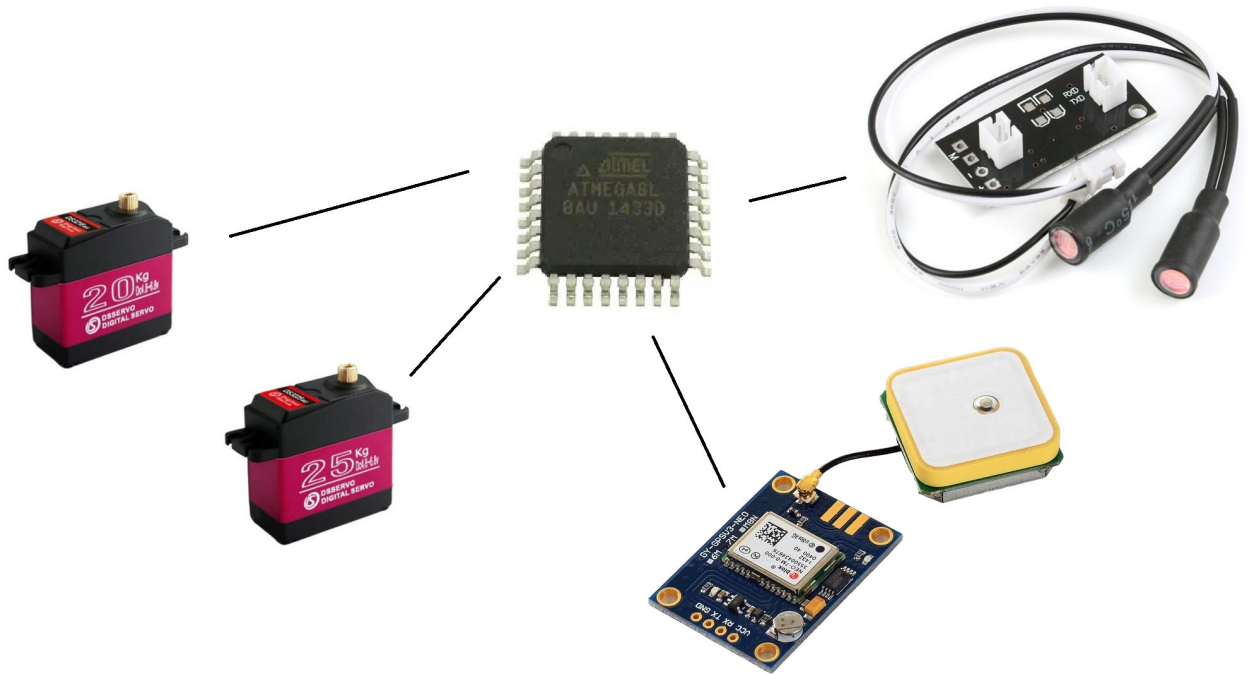
Дата закінчення виконання магістерської роботи : \_\_\_\_\_

Студент-дипломник \_\_\_\_\_ Радченко Я. Р.

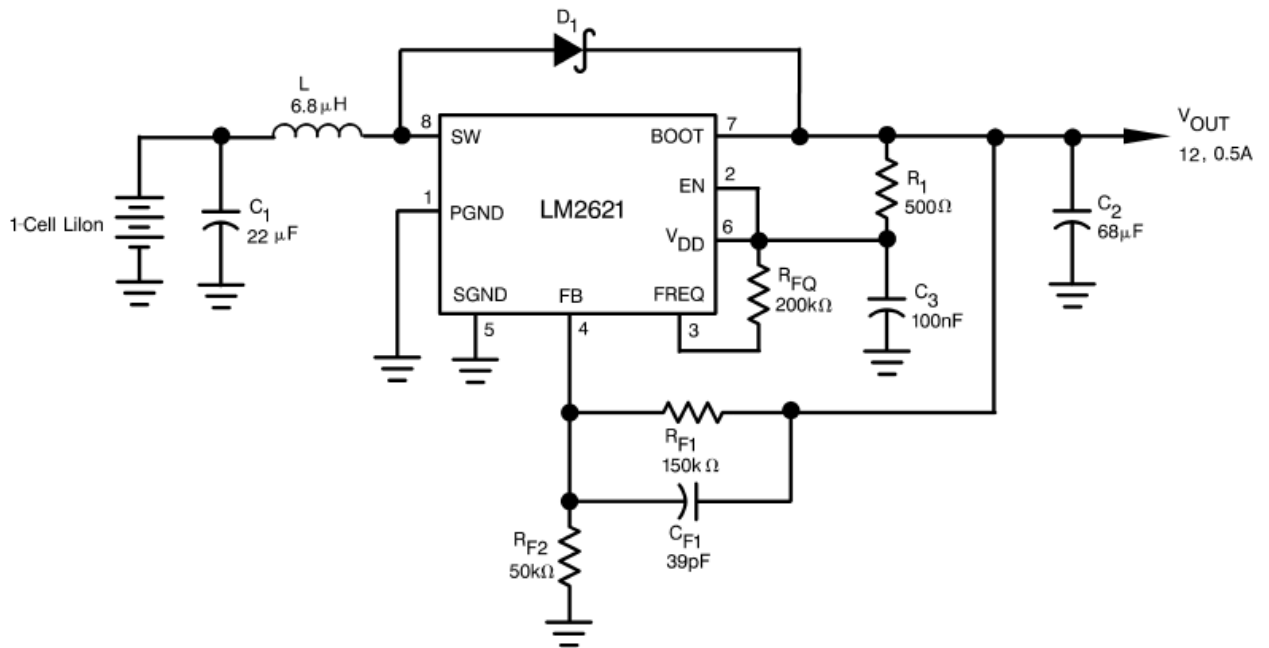
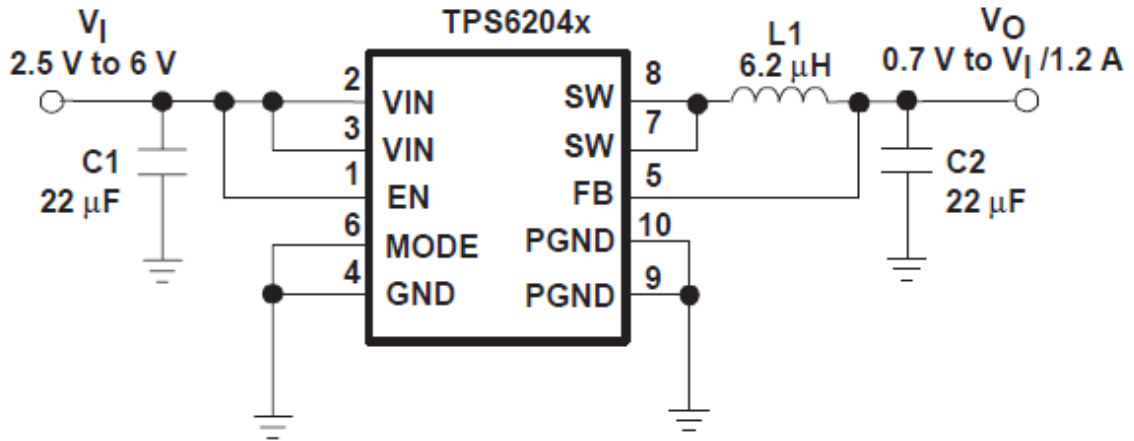
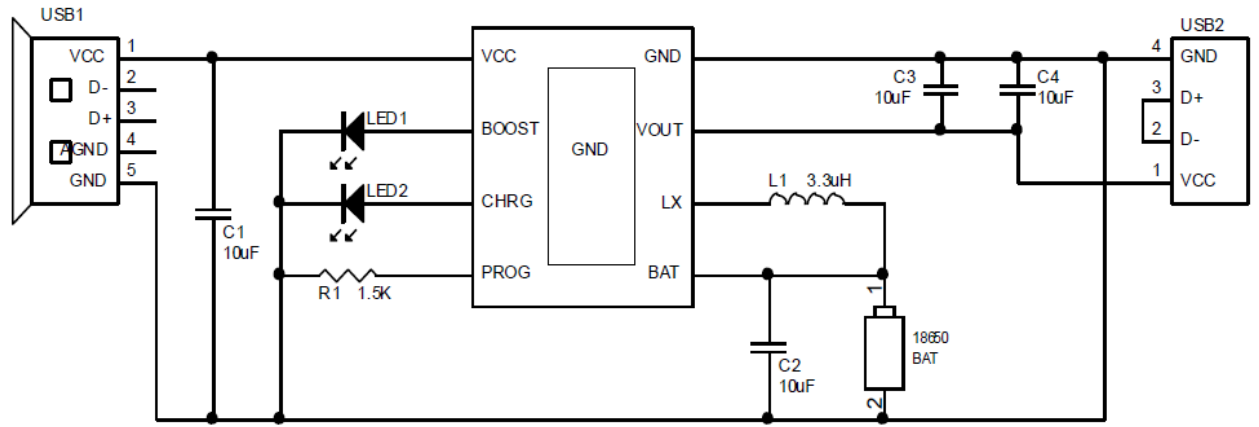
					КРМ.АКСм-19.00.00.000ПЗ	Арк.
						88
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		



					КРМ.АКСм-19.00.00.001 Е2			
					<i>Розроблення MPPT-контролера та системи автоматичного позиціонування сонячної панелі Схема функціональна</i>			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Радченко			Н			
Перевір.		Еліяшів						
Т.контр.					Аркуш	1	Аркушів	
Реценз.					<b>ІФНТУНГ</b>			
Н.контр.		Возний			<b>АКСм-24-1</b>			
Затв.		Заміховський						



					КРМ.АКСм-19.00.00.002 Е2		
					Розроблення МРРТ-контролера та системи автоматичного позиціонування сонячної панелі Схема функціональна		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Радченко			Н		
Перевір.		Еліяшів					
Т.контр.					Аркуш	1	Аркушів
Реценз.					ІФНТУНГ АКСм-24-1		
Н.контр.		Возний					
Затв.		Заміховський					



КРМ.АКСМ-19.00.00.000 ЕЗ

Розроблення МРРТ-контролера та системи автоматичного позиціонування сонячної панелі  
Схема електрична

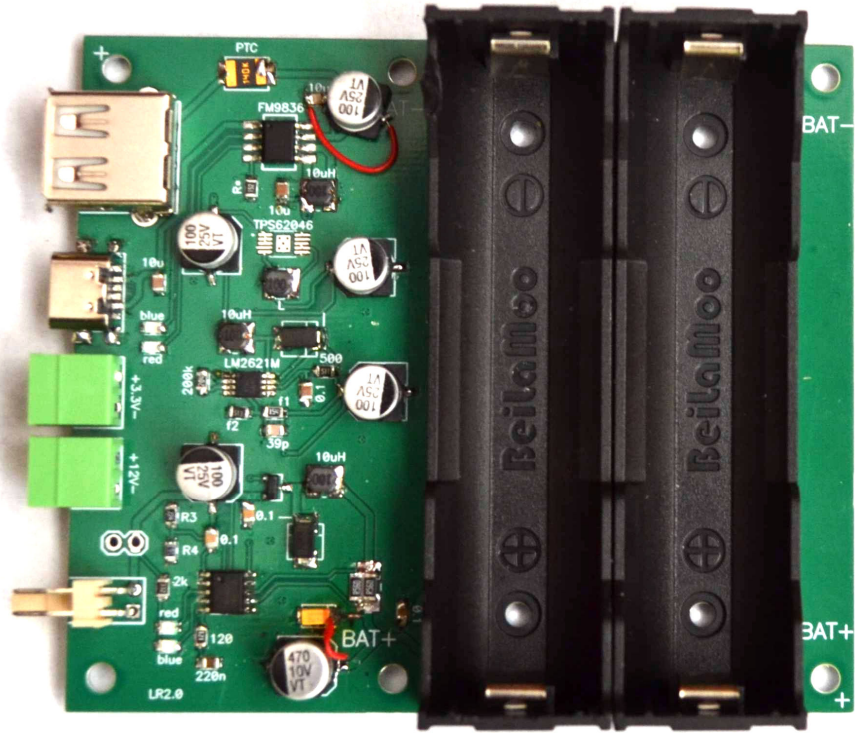
Літ.	Маса	Масштаб
Н		

Аркуш 1 | Аркушів

ІФНТУНГ  
АКСМ-24-1

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.		Радченко		
Перевір.		Еліяшів		
Т.контр.				
Реценз.				
Н.контр.		Возний		
Затв.		Заміховський		





					КРМ.АКСм-19.00.00.004			
					<i>Розроблення МРРТ-контролера та системи автоматичного позиціонування сонячної панелі Фото пристрою</i>	Літ.	Маса	Масштаб
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		Н		
Розроб.	Радченко							
Перевір.	Еліяшів							
Т.контр.						Аркуш	1	Аркушів
Реценз.						ІФНТУНГ АКСм-24-1		
Н.контр.	Возний							
Затв.	Заміховський							