

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра електротехніки та електроенергетики

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ РІВНЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ
ФОТОВОЛЬТАНИЧНИХ СИСТЕМ ПРИ ДУГОВИХ ЗАМИКАННЯХ

В МЕРЕЖІ

(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2 маг. курсу, групи ДЕА-Е23мг-1
спеціальності : 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

_____ / Артур ШПІТАЛЬНИЙ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____ / Павло ВАСЮЧЕНКО
(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент _____ / Олег ПОДОЛЯК
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____ / Артем ЧЕРНЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Нормоконтроль _____ / Юлія ОЛІЙНИК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК _____ / Ігор КИРИСОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2024 рік

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА**

Навчально – науковий інститут Українська інженерно-педагогічна академія
Кафедра електротехніки та електроенергетики
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма Енергетична безпека

**ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри**

(підпис)

к.т.н., доцент Артем ЧЕРНЮК
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

« ____ » _____ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу дипломну роботу
другого (магістерського) рівня вищої освіти**

здобувачу вищої освіти Артур ШПІТАЛЬНИЙ

1. Тема «ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ РІВНЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ
ФОТОВОЛЬТАНИЧНИХ СИСТЕМ ПРИ ДУГОВИХ ЗАМИКАННЯХ В
МЕРЕЖІ»

затверджена наказом по академії № 4801-5/3345 від «12» 10 2024 р.

2. Термін здачі закінченої роботи «10» 12 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи/проєкту: Рівень напруги, умови експлуатації,
характеристика струмоведучих частин, типи кабельних ліній, метод апарат
дослідження, завдання, параметри обладнання

4. Зміст розрахунково–пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить
розробити) Вступ. Перелік умовних позначень. Забезпечення енергетичної
безпеки, як фактор підвищення якості електропостачання. Визначення сфери й
предмета енергетичної безпеки. Системний підхід. Визначення та класифікація
загроз енергетичної безпеки. Вплив дугових замикань на рівень енергетичної
безпеки об'єкта. Характеристики дугового замикання та метод виявлення
фотоелектричної системи. Висновки. Список посилань

5. Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал):

Слайди презентації

6. Консультант:

Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		Завдання видав	Завдання прийняв	

7. Дата видачі завдання « 12 » _____ 10 _____ 20 ____ р.

Керівник

(підпис)

Павло ВАСЮЧЕНКО

(ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Артур ШПІТАЛЬНИЙ

(ім'я, прізвище)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК виконання кваліфікаційної дипломної роботи

№ з/ п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1	Визначення актуальності теми дослідження	02.10.24 – 05.10.24	
2	Проведення аналізу наукової літератури	06.10.24 – 15.10.24	
3	Виконання першого розділу дипломної роботи	16.10.24 – 29.10.24	
4	Виконання другого та третього розділу дипломної роботи	30.10.24 – 26.11.24	
5	Оформлення пояснювальної записки	27.11.24 – 07.12.24	

Студент (ка)

(підпис)

Артур ШПІТАЛЬНИЙ

(ім'я, прізвище)

Нормоконтроль

(підпис)

Юлія ОЛІЙНИК

(ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота виконана на 63 стор., містить 4 таблиці, 15 рисунків, що характеризують результати дослідження, використано 62 літературних посилань.

Об'єкт дослідження – рівень енергетичної безпеки.

Предмет дослідження – фотовольтаїчні системи.

Мета роботи – ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ РІВНЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ ФОТОВОЛЬТАНИЧНИХ СИСТЕМ ПРИ ДУГОВИХ ЗАМИКАННЯХ В МЕРЕЖІ

У результаті дослідження був розроблений інструмент моделювання систем електропостачання децентралізованих споживачів.

Ступінь впровадження: проектні інститути.

Економічна ефективність значимість роботи: дана робота має високу значимість теоретичного й практичного рівня.

Дуга постійного струму є основною причиною пожежі у фотоелектричних (PV) системах. Це пов'язано з тим, що дуга постійного струму не має точки переходу через нуль і схильна до стабільного горіння. Якщо його не виявити вчасно, це може серйозно загрожувати фотоелектричній системі.

У цьому дослідженні аналізується вплив послідовної дуги та алгоритму відстеження точки максимальної потужності (MPPT) на вихідні характеристики PV на основі модуля еквівалентної схеми PV. Характеристики зміни напруги PV і струму отримують, коли виникає послідовна дуга.

Результати показують, що вхідна напруга перетворювача залишається незмінною завдяки алгоритму MPPT до та після виникнення послідовної дуги. Крім того, вихідний струм несправної фотоелектричної ланцюга різко зменшиться, коли виникає послідовне дугове замикання. На цій основі запропоновано метод виявлення послідовної дуги, заснований на зміні струму, що пригнічує горіння послідовної дуги шляхом збільшення цільової напруги алгоритму MPPT.

Результати експерименту показують, що запропонований метод дозволяє ефективно виявляти та гасити послідовну дугу в фотоелектричній системі протягом 0,6 с. У порівнянні з іншими методами запропонований метод можна інтегрувати в фотоелектричну систему без додаткового обладнання.

Ключові слова:

РІВЕНЬ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ, ФОТОВОЛЬТАНИЧНІ СИСТЕМИ, ВІДНОВЛЮВАНІ РОЗПОДІЛЕНІ ЕНЕРГЕТИЧНІ РЕСУРСИ, РОЗПОДІЛЬЧА МЕРЕЖА, ОПТИМАЛЬНИЙ ПЕРЕТІК РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ, ЗАКОНИ МІСЦЕВОГО КОНТРОЛЮ, МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ СПОЖИВАЧІВ, ПОНОВЛЮВАНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ, АЛГОРИТМ ОПТИМІЗАЦІЇ ВИБОРУ УСТАТКУВАННЯ, ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ, ДУГОВІ ЗАМИКАННЯ НА ЗЕМЛЮ

ABSTRACT

The master's work is published on 63 pages, there are 4 tables, 15 figures that characterize the results of the research, 62 literary essays are published.

The object of investigation is the level of energy security.

Subject of investigation: photovoltaic systems.

Meta robots – ADVANCED RESEARCH IN THE RANGE OF ENERGY SAFETY OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS IN THE EVENT OF ARC FLOW IN THE MEREZHI

As a result of the investigation of the breakdowns, a tool for modeling the electricity supply systems of decentralized residents.

Stage of advancement: design institutes.

Economical effectiveness and significance of the robot: this robot has a high significance on a theoretical and practical level.

Static arcing is the leading cause of fire in photovoltaic (PV) systems. This is due to the fact that the arc of a steady stream does not reach the zero crossing point and is as short as a stable peak. If this is not detected immediately, it could seriously jeopardize the photovoltaic system.

In this study, the inflow of the successive arc and the maximum pressure point (MPPT) algorithm are analyzed on the PV output characteristics based on the PV equivalent circuit module. The characteristics of the PV voltage change and the jet are adjusted when a successive arc occurs.

The results show that the input voltage of the transformer is deprived of constant input to the MPPT algorithm until the successive arc is triggered. In addition, the output stream of a faulty photoelectric lance will change sharply if a subsequent arc fault occurs. On this basis, a method is proposed for identifying the successive arc, the basis for changing the stream, which suppresses the fire of the successive arc by increasing the target voltage to the MPPT algorithm.

The experimental results show that the propionate method allows one to effectively detect and extinguish a successive arc in a photovoltaic system with a duration of 0.6 s. Similar to other coupling methods, the method can be integrated into a photovoltaic system without additional equipment.

Key words:

RANGE OF ENERGY SECURITY, PHOTOVOLTAIC SYSTEMS, DEVELOPMENT OF ENERGY RESOURCES RESOURCES, RESOURCE MERAGE, OPTIMAL PERTHETIC OF REACTIVE TENSION, LAWS OF MISCELLANEOUS CONTROL, MODELING OF ELECTRICAL SYSTEMS, ELECTRICAL DECENTRALIZED RESIDENTS, RENEWED JEREL ENERGY, ALGORITHM FOR OPTIMIZATION FOR SELECTION OF SETTING, ELECTRICAL, ARC TO GROUND

ЗМІСТ

	с.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	7
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1 ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ, ЯК ФАКТОР ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	11
1.1 Визначення сфери й предмета енергетичної безпеки. Системний підхід	11
1.2 Визначення та класифікація загроз енергетичної безпеки	16
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1	29
РОЗДІЛ 2. ВПЛИВ ДУГОВИХ ЗАМИКАНЬ НА РІВЕНЬ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ ОБ'ЄКТА	30
2.1. Характеристики дугового замикання та метод виявлення фотоелектричної системи	30
2.2. Вплив послідовної дуги на фотоелектричну систему	35
2.3. Характеристики серії DC Arc VI	36
2.4. Вплив алгоритму MPPT за умови послідовної дуги	37
2.5. Вихідні характеристики фотоелектричного модуля за умови послідовної дуги	40
2.6. Метод виявлення послідовної дуги для фотоелектричної системи	43
2.7. Тестова перевірка запропонованих рішень	44
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2	55
ВИСНОВКИ Й РЕКОМЕНДАЦІЇ	56
СПИСОК ПОСИЛАНЬ	57

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- PV – фотоелектрична система
- ЕМ – електрична мережа
- ММ – математичні моделі
- МКЕ – метод кінцевих елементів
- МКР – метод кінцевих різниць
- MPPT – точка максимальної потужності
- ПП – первинна підстанція
- ПС – вторинна підстанція
- РМ – розподільчі мережі
- РПН – регулювання напруги під напругою
- СНАУ – система нелінійних алгебраїчних рівнянь
- СЛАУ – система лінійних алгебраїчних рівнянь
- FEMM – Finite Element Method Magnetics
- ПДЕ – поновлювальні джерела енергії
- СЕП – система електропостачання
- ФЕУ – фотовольтанична електрична станція

ВСТУП

Швидкі системні й докорінні зміни, що відбуваються у світовій енергетиці, свідчать про активну фазу розгортання «енергетичного переходу». Цей перехід є глобальною трансформацією, спрямованою на створення енергосистем, які можуть оперативно адаптуватися до змінних умов ринку та різноманітних викликів, таких як зростання попиту на електроенергію, потреба в зниженні викидів парникових газів та інтеграція відновлюваних джерел енергії. В рамках цього переходу широке впровадження отримують гнучкі системи, розподілена генерація, «розумна» інфраструктура та висококонкурентні ринки. Вони стають основою сучасного енергетичного ландшафту, де різноманітні джерела енергії, такі як сонячні панелі, вітрові турбіни, а також технології накопичення енергії, повинні працювати синхронно для забезпечення стабільності мережі.

Перехід до нової моделі енергетики вимагає значних змін у підходах до управління енергетичними ресурсами, модернізації існуючої інфраструктури, розвитку технологій контролю та моніторингу, а також підвищеної готовності до потенційних загроз енергетичній безпеці. Це зумовлює потребу у швидкому та адекватному реагуванні на існуючі й нові ризики, серед яких – природні катастрофи, кібератаки на критичну інфраструктуру, технічні несправності тощо. Забезпечення енергетичної безпеки стає стратегічно важливим завданням, особливо в умовах зростання залежності від цифрових технологій і збільшення частки відновлюваних джерел, які схильні до природних коливань. Тому для держави критично важливо забезпечити здатність безперебійно виконувати свої функції та надавати життєво важливі послуги громадянам за будь-яких умов.

Основним пріоритетом у сфері енергетичної безпеки є створення цілісної системи захисту, яка передбачає запобігання, ідентифікацію, аналіз і реагування на загрози. Досягнення цієї мети включає формування реєстру наявних ризиків і загроз, їх систематичний аналіз для виявлення вразливостей

та встановлення цілей і завдань для суб'єктів енергетичної безпеки. Особлива увага приділяється розробці механізмів пріоритетного реагування, які дозволяють мінімізувати ризики і швидко усувати можливі загрози.

Для дослідження енергетичної безпеки у цій праці застосовано системний підхід, що дає можливість розглядати об'єкт дослідження не лише з точки зору його елементів, зв'язків та структури, але й аналізувати процесуальні складники — функції, процеси, матеріальні та інформаційні потоки. Це дозволяє оцінити енергетичну безпеку як динамічний стан, що відображає спроможність системи не лише витримувати поточні загрози, але й адаптуватися до нових викликів. У першому розділі публікації розглянуто основні теоретичні аспекти енергетичної безпеки та обґрунтовано використання системного підходу для комплексного аналізу цього поняття.

Завдяки такому підходу є можливість оцінити безпеку як стан захищеності й спроможності системи адаптуватися до нових викликів, нейтралізуючи наявні загрози та запобігаючи появі нових. Енергетична безпека при цьому розглядається як динамічний і багатовимірний параметр, що залежить від технологічного рівня системи, можливостей її управління та ресурсів, необхідних для швидкого реагування на зміни в зовнішньому середовищі.

В рамках цього дослідження розглядається також вплив нових технологічних рішень на безпеку енергосистем. Одним із прикладів є аналіз впливу послідовної дуги та алгоритму відстеження точки максимальної потужності (MPPT) на вихідні характеристики фотовольтаїчних (PV) систем. На основі модуля еквівалентної схеми PV досліджено вплив дуги постійного струму, яка є однією з основних причин пожеж у фотоелектричних системах. Особливість дуги постійного струму полягає в тому, що вона не має точки переходу через нуль і схильна до стабільного горіння, що створює серйозну загрозу безпеці. Якщо дугу не виявити та не загасити вчасно, це може призвести до аварійних ситуацій та значних збитків. У ході дослідження

проаналізовано зміни характеристик напруги та струму PV-модуля, що виникають під час послідовної дуги.

Результати показали, що вхідна напруга перетворювача залишається стабільною завдяки алгоритму MPPT як до, так і після виникнення дуги. Проте вихідний струм несправного PV-ланцюга суттєво зменшується, що вказує на проблему. На основі цих спостережень було розроблено метод виявлення послідовної дуги, заснований на моніторингу зміни струму. Запропонований підхід передбачає пригнічення горіння дуги за рахунок зміни цільової напруги алгоритму MPPT, що дозволяє запобігти подальшому розвитку аварійної ситуації.

Експериментальні результати підтверджують ефективність цього методу: запропонований підхід дозволяє виявити та загасити дугу у фотоелектричній системі протягом 0,6 секунди. У порівнянні з іншими методами перевага запропонованого методу полягає в можливості інтеграції у фотоелектричну систему без необхідності додаткового обладнання, що робить його економічно вигідним і зручним для впровадження на практиці.

У зв'язку з цим метою цієї магістерської роботи є дослідження зміни рівня енергетичної безпеки фотовольтаїчних систем при дугових замиканнях в мережі. Це дослідження охоплює вивчення методів забезпечення енергетичної безпеки з акцентом на фотовольтаїчні системи, які набувають все більшої популярності в умовах розвитку відновлюваних джерел енергії.

Об'єкт дослідження – рівень енергетичної безпеки, а **предмет дослідження** – фотовольтаїчні системи.

РОЗДІЛ 1. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ, ЯК ФАКТОР ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

1.1. Визначення сфери й предмета енергетичної безпеки. Системний підхід

Енергетика є ключовим рушієм економічного розвитку та стабільності будь-якої держави. Вона забезпечує базові потреби суспільства, створює умови для економічного зростання, сприяє підвищенню якості життя та підтримує національну безпеку. Тому гарантування енергетичної безпеки є пріоритетним завданням національних урядів, яке вимагає комплексного підходу та координації зусиль усіх державних органів. Енергетична безпека не лише забезпечує надійне енергопостачання, але й сприяє зниженню залежності від імпорту енергоресурсів, оптимізації використання внутрішніх ресурсів та стимулює розвиток нових, стійких джерел енергії.

Однак підходи до визначення сфери енергетичної безпеки, формування інституційної системи та обрання механізмів її гарантування значно варіюються в різних країнах. Це розмаїття пояснюється особливостями національних пріоритетів, ресурсної бази, рівнем технологічного розвитку, а також специфікою соціально-економічних умов. Наприклад, країни з великими запасами викопних енергоресурсів орієнтуються на забезпечення стабільності в їх видобутку й експорту, а держави з обмеженими ресурсами зосереджуються на диверсифікації імпорту та розвитку відновлюваних джерел енергії. Крім того, національні стратегії з енергетичної безпеки враховують такі аспекти, як економічні, екологічні та технологічні виклики, що з'являються в умовах сучасного енергетичного переходу.

Розмаїття підходів до енергетичної безпеки також пов'язане з необхідністю одночасного врахування низки життєво важливих потреб суспільства та реалізацією кількох державних функцій. Серед них забезпечення надійного енергопостачання, мінімізація вразливості до зовнішніх і внутрішніх

ризиків, створення умов для розвитку нових технологій, захист довкілля та підтримка стійкості енергосистеми до потенційних загроз, таких як природні катаклізми, геополітичні кризи чи кібератаки.

Огляд концептуальних підходів до формалізації поняття «енергетична безпека» дозволяє визначити декілька основних сфер регулювання, які найчастіше згадуються дослідниками та державними документами:

1. Економічна складова: забезпечення доступності енергоресурсів за економічно виправданими цінами, що є критично важливим для підтримки конкурентоспроможності національної економіки.

2. Технічна складова: розвиток інфраструктури, включаючи надійність та стабільність функціонування електромереж, трубопроводів, об'єктів генерації та зберігання енергії.

3. Екологічна складова: зниження негативного впливу на довкілля, сприяння впровадженню відновлюваних джерел енергії та відповідальне управління природними ресурсами.

4. Соціальна складова: забезпечення доступу до енергії для всіх верств населення, запобігання енергетичній бідності та захист прав споживачів.

5. Національна безпека: зниження залежності від імпорту енергоресурсів, забезпечення стійкості енергетичної системи до зовнішніх та внутрішніх загроз, таких як політична нестабільність, природні катастрофи та кібератаки.

Таблиця 1.1 відображає основні напрями регулювання енергетичної безпеки, виділені більшістю авторів у їхніх дослідженнях. У ній зазначено ключові сфери, що охоплюються енергетичною безпекою, та найбільш поширені методи їх забезпечення в різних країнах. Це дозволяє комплексно оцінити підходи до енергетичної безпеки та розробити універсальні рекомендації щодо її підвищення в умовах глобальних змін та енергетичних викликів.

Таблиця 1.1. – Сфери регулювання енергетичної безпеки України

Цільова функція	Зміст	Сфера регулювання
Наявність енергозабезпечення (energy availability, accessibility)	Надана державою можливість для всіх споживачів отримувати необхідну кількість енергетичних ресурсів потрібної якості; відображає ресурсно-технологічний вимір, тобто фізичну наявність енергозабезпечення, енергетичних ресурсів і технологій	Ресурсна достатність, технологічна забезпеченість
Доступність енергозабезпечення (energy affordability)	Надана державою можливість для всіх споживачів отримувати необхідну кількість енергетичних ресурсів потрібної якості за прийнятною ціною; поєднує ресурсно-технологічний вимір з економічним складником	Економічна доступність
Прийнятність енергозабезпечення (energy acceptability)	Надана державою можливість для всіх споживачів отримувати необхідну кількість енергетичних ресурсів потрібної якості за прийнятною ціною, коли мета, способи та принципи використання енергії відповідають світоглядним установкам суспільства; поєднує ресурсно-технологічний та економічний виміри з ціннісним складником (відображено насамперед у засадничих нормативно-	Екологічна та соціальна прийнятність

	правових актах)	
Захищеність національних інтересів (в енергетиці)	Спроможність держави забезпечити надійне, доступне та прийнятне енергозабезпечення, що не завдає шкоди національним інтересам і збереженню національних цінностей; поєднує ресурсно-технологічний, економічний та ціннісний виміри з безпековим складником; знаходить вияв у політиці енергетичної безпеки (energy security policy)	Енергетична та національна безпека

Енергетична безпека як стан — це комплексний показник, який відображає захищеність національних інтересів у сфері енергозабезпечення. Вона охоплює здатність держави забезпечити постійний доступ до недорогих, надійних, стійких і сучасних джерел енергії. Важливо, щоб цей доступ реалізовувався технічно надійним і безпечним способом, відповідав економічним інтересам країни та був екологічно прийнятним. Енергетична безпека розглядається як стан захищеності як у звичайних умовах, так і в умовах особливого або надзвичайного стану, коли енергосистема має функціонувати стабільно та безперебійно, попри можливі зовнішні та внутрішні загрози, такі як природні катастрофи, геополітичні кризи, кібератаки або технологічні аварії.

Таким чином, енергетична безпека поєднує різні аспекти — від технічної та економічної надійності енергетичних систем до екологічних стандартів і соціальної відповідальності. Це дозволяє державі не лише забезпечувати безперебійне енергопостачання для своїх громадян, але й зберігати стійкість перед можливими викликами, створюючи міцний фундамент для економічного зростання та суспільного добробуту.

Враховуючи те, що відбуваються швидкі зміни в політичних системах, формах правління, рівнях соціального-економічного й науково-технологічного розвитку, моделях економіки та енергетичних ринків, а сфера енергетичної безпеки охоплює не лише ресурсні й технологічні, а й економічні, політичні, соціальні складники, доцільно відмовитися від технічного підходу до її визначення. На відміну від технічного, системний підхід [2] дає змогу описати енергетичну безпеку як об'єкт управління через виокремлення таких блоків:

- система як ціле, що визначає її ціннісні характеристики, роль у більшій системі (інтегрованість у неї, рівень суб'єктності);
- елементи та зв'язки системи, що характеризують інституційну та організаційну визначеність, а також забезпеченість ресурсами (правовими, фінансовими, матеріальними, інформаційними, людськими та ін.);
- функції й ролі в системі, що регламентує завдання її елементів, їхню відповідність установленим вимогам і спроможність надавати цільові послуги;
- процеси системи (виробничі, управлінські, сервісні, трансформаційні), що визначають її керованість, узгодженість дій, їхню результативність та ефективність;
- матеріал системи, що встановлює якісні характеристики системи, її елементів, зв'язків, процесів.

Системний підхід до енергетичної безпеки дозволяє глибше зрозуміти її як спроможність системи реагувати на виклики і як стан захищеності від потенційних загроз. Цей підхід дає змогу узгодити різні аспекти управління енергетичною безпекою, поєднуючи можливості системи з її здатністю підтримувати стабільність. Зокрема, спроможність системи охоплює параметри, що описують її функції, ролі, процеси, які можуть бути змінені або оптимізовані суб'єктом управління. Така динамічна складова енергетичної безпеки відображає адаптивність системи та її здатність до швидкого реагування на зміни у внутрішньому й зовнішньому середовищі.

Стан захищеності, своєю чергою, відображає відносини системи із зовнішнім середовищем та характеризується параметрами, що описують її стабільність та захищеність від загроз. Це більш статична складова, яка показує сприйняття енергетичної безпеки як об'єкта управління, що потребує стабільного підтримання в контексті взаємозв'язків із зовнішнім середовищем. Такий підхід дозволяє побачити сферу енергетичної безпеки не лише як окремий об'єкт управління (цілісну систему), але і як частину ширшої системи — наприклад, національної стійкості або національної безпеки. Відтак, енергетична безпека може бути розглянута як інтегрований елемент національної стратегії безпеки, що забезпечує стабільність усієї державної системи.

Суб'єкти енергетичної безпеки включають органи державної влади, органи місцевого самоврядування, а також підприємства паливно-енергетичного комплексу і суміжних галузей економіки. Ці суб'єкти реалізують комплекс заходів з управління ризиками, спрямованих на захист енергетичної системи. Вони відповідають за розробку стратегій, планів дій та нормативних актів, що сприяють зниженню залежності від імпортованих енергоресурсів, підвищенню ефективності енергетичних систем і впровадженню новітніх технологій для забезпечення стабільного та безпечного енергопостачання.

1.2. Визначення та класифікація загроз енергетичної безпеки

У Законі України «Про національну безпеку України» [3] загрозами національній безпеці України визначено «явища, тенденції і чинники, що унеможливають чи ускладнюють або можуть унеможливити чи ускладнити реалізацію національних інтересів та збереження національних цінностей України».

Але таке визначення не дозволяє вирізнити поняття «загроза» з-поміж подібних за змістом, як-от «виклик» і «ризик», які іноді вживають як

взаємозамінні.

В роботі доцільно використовувати терміни в поданих нижче значеннях.

Виклик (challenge) – сукупність обставин, що формують особливі вимоги до умов функціонування об'єкта управління. Наприклад, викликом для України є здійснення енергетичного переходу (energy transition), орієнтованого на масштабне використання розподілених потужностей, інтелектуалізацію інфраструктури, формування децентралізованих висококонкурентних енергетичних ринків.

Реагування суб'єктів управління на виклик або бездіяльність стосовно нього може спричинити як позитивні, так і негативні наслідки, наприклад призвести до появи та/чи загострення загроз енергетичній безпеці.

З огляду на це виклики енергетичній безпеці – це сукупність обставин і чинників, що формують особливі вимоги до умов функціонування й розвитку енергетичного сектору і потенційно здатні призвести до появи загроз енергетичній безпеці.

Загроза (threat, risk source) – явище, сукупність подій, що відбуваються стихійно чи внаслідок цілеспрямованих дій (зокрема, зловмисних), або необґрунтована бездіяльність суб'єкта управління, які здатні спричинити негативні наслідки. Наприклад, весняна повінь, пожежа на трансформаторній підстанції або кібератака на систему управління магістральним газопроводом.

Якщо загроза в разі її реалізації здатна негативно вплинути відразу на кілька держав та/чи галузей економіки впродовж 5...10 років (long-term), її вважають надсистемною (глобальною) (табл. 1.2).

Загрозу, яка в разі її реалізації здатна негативно впливати на об'єкт управління до одного року, вважають короткочасною (short-term), до п'яти років – тривалою (medium-term).

Якщо загроза виникла в неконтрольованій суб'єктом управління сфері, її вважають зовнішньою щодо системи (об'єкта управління). Наприклад, це може бути блокада іншими країнами постачання товарів стратегічного імпорту (ядерного палива, нафти й нафтопродуктів).

Таблиця 1.2. – Перелік та визначення надсистемних (глобальних) загроз

Назва	Визначення
Геофізична катастрофа	Пошкодження екосистем, землетруси, зсуви ґрунту, геомагнітні бурі тощо, що потенційно можуть спричинити знищення майна та/чи фінансові втрати
Екстремальне погодні явище	Повені, пожежі, зливи, заметілі, налипання мокрого снігу, обледеніння, аномально високі чи низькі температури, шторми тощо, які можуть спричинити значні негативні наслідки
Техногенна аварія	Порушення функціонування промислових об'єктів, яке спричиняє пожежі, вибухи, радіоактивне забруднення, викиди чи розливи шкідливих речовин тощо, створює небезпеку для житт
Несприятливі зміни клімату	Зміни в багаторічному режимі нижнього шару атмосфери в певній місцевості, що призводять до зниження добробуту населення, ускладнення чи унеможливлення господарської діяльності, втрати біологічного розмаїття та/чи загибелі екосистем
Терористичний акт	Застосування зброї, вчинення вибуху, підпалу чи інших дій, що створюють небезпеку для життя чи здоров'я людини, функціонування критичної інфраструктури чи систем управління життєдіяльністю суспільства
Кібератака	Навмисні дії в кіберпросторі, що здійснюються за допомогою засобів електронних комунікацій і спрямовані на порушення конфіденційності, цілісності, доступності електронних інформаційних ресурсів, отримання несанкціонованого

	доступу до них, порушення безпеки й нормального функціонування комунікаційних та/чи технологічних систем
Епідемія	Масове та швидке поширення вірусів, паразитів, грибків або бактерій, які спричиняють неконтрольоване зараження інфекційними захворюваннями, що призводить до епідемії або пандемії із втратою життя, здоров'я населення та економічних втрат
Епізоотія	Масове та швидке поширення заразної хвороби тварин за короткий проміжок часу, що значно перевищує звичайний рівень захворюваності на цю хворобу на відповідній території, створює небезпеку для життя й здоров'я людини, довкілля, призводить до економічних втрат
Політизація стратегічних ресурсів	Зумисне концентрування та/чи обмеження, що реалізуються державами, свободи руху товарів, знань, послуг, технологій, котрі є критично важливими для людського розвитку, з метою отримання геополітичної переваги
Ресурсна криза	Виникнення нестачі харчових, енергетичних, мінеральних, водних, інших природних ресурсів через надмірну їх експлуатацію, нераціональне використання та/чи безгосподарне управління ними
Боргова криза	Накопичення державного та/чи корпоративного боргу до рівня, який унеможливорює його обслуговування, що призводить до масових банкрутств, дефолтів, неплатоспроможності, криз ліквідності або криз суверенного боргу
Тінізація економіки	Поширення неформальної та/чи

	незаконної діяльності: нелегальне виробництво, незаконна торгівля, ухилення від сплати податків і зборів, відмивання коштів, організована злочинність тощо
Вимушена міграція	Широкомасштабний виїзд за кордон працездатного населення, спричинений відсутністю можливостей до підвищення власного добробуту, дискримінацією, переслідуваннями, наявністю внутрішніх конфліктів тощо

У системному підході загрози можуть бути внутрішніми або зовнішніми для об'єкта управління, залежно від джерела їх виникнення. Якщо загроза виникла внаслідок дій або недбалості суб'єкта управління, вона вважається внутрішньою стосовно системи. Наприклад, недотримання правил обслуговування захисної дамби створює загрозу для її здатності забезпечувати безпеку низин від затоплення, тобто така загроза походить із середини системи і є наслідком некоректної роботи елементів системи.

У межах системного підходу кожен об'єкт нижчого рівня (підсистема) та його елементи (зв'язки, функції, процеси) можуть, унаслідок непередбаченого функціонування, становити загрозу для об'єктів вищого рівня. У такому випадку ці загрози, позначені пунктирними стрілками на рис. 1.1, сприймаються об'єктом вищого рівня як внутрішні. Водночас об'єкт вищого рівня може піддаватися впливу зовнішніх для нього загроз, джерелом яких є система ще вищого рівня. Такі загрози, відображені на схемі суцільними стрілками, виникають поза межами об'єкта і можуть мати зовнішній характер, наприклад, природні катастрофи чи зміни в законодавстві.

Це розмежування дозволяє краще розуміти джерела загроз і будувати стратегії для мінімізації їхнього впливу, розробляючи спеціальні підходи для управління як внутрішніми, так і зовнішніми загрозами, а також оптимізувати процеси в межах кожного рівня системи.

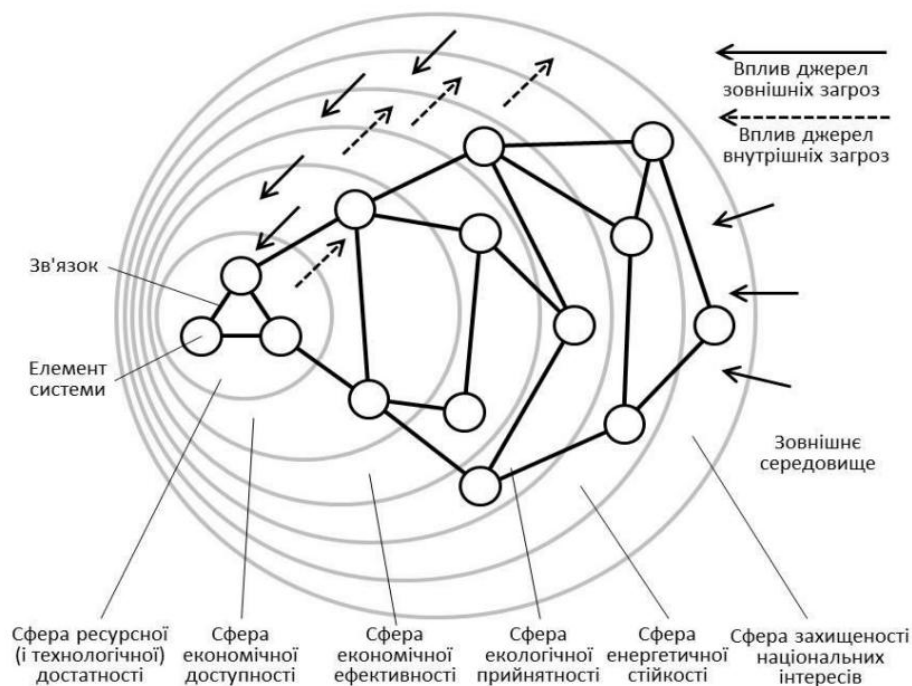


Рисунок 1.1. – Джерела загроз для різних об'єктів згідно із системним підходом

У застосуванні до предмета енергетичної безпеки такими підсистемами, що послідовно розширюються (це «сфери» на рис. 1.1), є ресурсна (і технологічна) достатність, економічна доступність, економічна (та енергетична) ефективність, екологічна (і соціальна) прийнятність, енергетична стійкість, захищеність національних інтересів (в енергетиці). Їх послідовне поєднання утворює сфери регулювання, наведені в табл. 1.1.

Загрози енергетичній безпеці – короточасні або тривалі, реальні або потенційні обставини, явища, чинники або події, що можуть порушити безпеку та стійкість функціонування енергетичного сектору країни, обмежити або порушити енергозабезпечення споживачів, призвести до аварій та інших негативних наслідків. Реалізація загрози потенційно може стати причиною кризової ситуації.

Кризова ситуація в енергетиці – порушення штатного режиму функціонування енергетичного сектору або критичної інфраструктури енергетичної галузі, що може спричинити припинення енергозабезпечення споживачів, подолання якого й відновлення штатного режиму потребують

ужиття спеціальних (надзвичайних) заходів.

Загроза впливає на об'єкт управління (систему) через його уразливість.

Уразливість (vulnerability) – чутливість об'єкта управління до впливів, уразливе місце в його захисті від загроз, відсутність «запобіжників» проти них. Наприклад, для об'єкта «захисна дамба водосховища» загроза «недотримання норм обслуговування», що може спричинити порушення сталості захисної дамби (деградації опірних спроможностей), реалізується через уразливість «відсутність системи контролю за дотримання норм обслуговування захисної дамби». Уразливістю також є «незахищений інтерфейс системи управління трубопроводом» для загрози «кібератака на систему управління».

У рамках системного підходу уразливість до зовнішніх впливів (на «вході») будь-якого об'єкта, який генерує продукт чи виконує функцію, призводить до погіршення якості (на «виході») чи припинення їх надання (рис. 1.2).

Для оцінки рівня енергетичної безпеки можна зафіксувати та порівняти фактичні значення основних індикаторів із пороговими значеннями, які використовуються в моделюванні стану енергетичної безпеки України. Такий підхід дозволяє виявити негативні зміни та оцінити ступінь ризику для енергетичної системи.

Наприклад, для сфери економічної доступності енергоресурсів використовуються такі індикатори:

- Вартість спожитих енергоресурсів як відсоток від ВВП. Цей показник відображає, наскільки витрати на енергію є тягарем для економіки та її здатності забезпечувати конкурентоспроможність.

- Енергоємність ВВП (кількість тонн нафтового еквіваленту на 1000 доларів США). Цей індикатор характеризує ефективність використання енергоресурсів і показує, наскільки продуктивною є економіка в енергетичному плані.

- Річне енергоспоживання на одну особу (у тоннах нафтового еквіваленту). Це показує рівень споживання енергії населенням і дозволяє

оцінити вплив національного енергоспоживання на екологічну стійкість.

- Частка сукупного доходу домогосподарства, що витрачається на оплату житлово-комунальних послуг. Це відсоткове значення відображає економічний тягар енерговитрат для домогосподарств, що є критичним для визначення доступності енергетичних ресурсів.

- Якість послуг, що стосується постачання первинних ресурсів, палива та енергії. Цей індикатор дозволяє оцінити, наскільки надійним є енергопостачання для домогосподарств та підприємств.

Застосування такого комплексного підходу до аналізу індикаторів енергетичної безпеки допомагає виявити області, де енергетична безпека країни може бути під загрозою. Це дозволяє розробляти заходи для підвищення стабільності та надійності енергосистеми та покращення умов доступу населення та бізнесу до енергоресурсів.

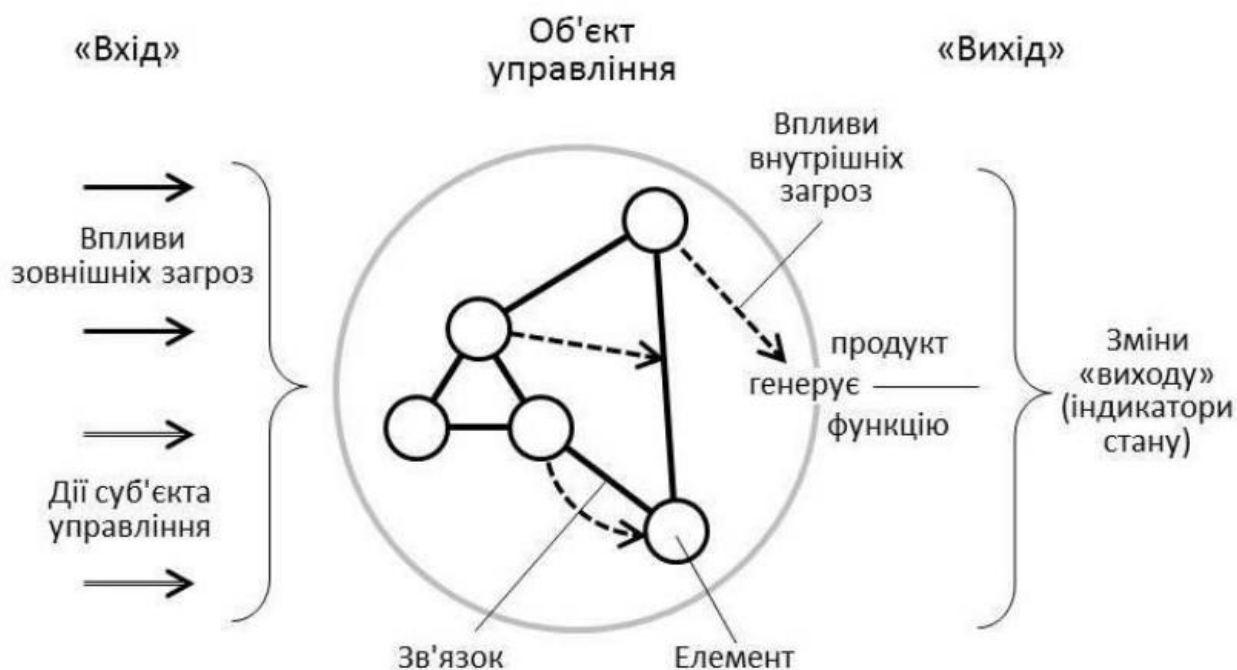


Рисунок 1.2. – Уразливість об'єкта до зовнішніх впливів згідно із системним підходом

Якщо об'єкт є вразливим до впливів, реалізація загрози зазвичай призводить до негативних наслідків.

Наслідок (consequence, impact) – результат впливу загрози на цілі

функціонування об'єкта управління, переважно вимірюється через оцінку величини втрат від такого впливу, зокрема заподіяння фізичної шкоди; майнових чи грошових збитків; погіршення рівня енергоефективності ВВП; зростання вартості витрат на оплату житлово-комунальних послуг тощо.

Наприклад, для об'єкта «захисна дамба водосховища» наслідком впливу загрози «недотримання норм обслуговування» є «порушення сталості захисної дамби (деградація опірної спроможності)», яке може бути виражено або через оцінку втрат, спричинених руйнуванням дамби, або у відсотках зменшення опірності порівняно з проєктним рівнем. Подібно до цього, для «системи управління трубопроводом» наслідком впливу загрози «кібератака на систему управління» є збитки, спричинені зупинкою функціонування трубопроводу.

Утім, загроза реалізується не завжди, об'єкти управління вразливі не до всіх загроз і не всі загрози призводять до негативних наслідків (зокрема, через застосування заходів із запобігання реалізації загроз). Відповідну ймовірність наслідків впливу загрози установлюють, оцінюючи ризики.

Ризик (risk) – вплив невизначеностей на цілі об'єкта управління, або загальна можливість (імовірність) того, що загроза реалізується, порушить функціонування уразливого об'єкта управління і спричинить негативні наслідки [5].

Ризик (R) часто подають у вигляді ймовірності настання негативних наслідків:

$$R L = C, \quad (1.1)$$

де L – загальна ймовірність реалізації загрози; C – сукупний негативний наслідок реалізації загрози (consequence), результат уразливого впливу на об'єкт управління.

Ризик зростає, якщо підвищується ймовірність реалізації загрози та посилюються спричинені нею наслідки. Тобто за величиною ризику можна визначати рівень загрози, щоб встановити значущість її впливу на цілі об'єкта управління, а також ранжувати загрози за цією значущістю.

Отже, ризик у сфері енергетичної безпеки – можливість переростання

викликів енергетичній безпеці у загрози, реалізації загроз енергетичній безпеці та настання інших обставин, здатних негативно вплинути на стан енергетичної безпеки.

Мета управління ризиком полягає в тому, щоб його змінити й установити, яка величина ризику є прийнятною для суб'єкта управління.

Щоб змінити ризик, його необхідно оцінити. Першим етапом аналізу ризиків в енергетичній сфері є ідентифікування загроз енергетичній безпеці.

Системний підхід дозволяє виокремити загрози для:

- цілісної системи забезпечення енергетичної безпеки (наприклад, вплив зміни клімату на структуру та режими енергоспоживання; зміна структури споживання і джерел постачання енергетичних ресурсів у Європейському регіоні);
- елементів і зв'язків системи (наприклад, систематичне порушення процедур підготовки та ухвалення владних рішень; затримка зі створенням організаційно-інституційної структури функціонування нової моделі газового ринку);
- функцій і ролей елементів у системі (наприклад, зростання асиметрії інформації; порушення процедур і правил роботи окремих елементів (інституцій) енергетичного ринку);
- процесів у системі (наприклад, тінізація економічних відносин);
- матеріалу системи (наприклад, відсутність узгодженої системи технічних регламентів; втрата кваліфікації персоналом).

Зразком такого виокремлення може бути реєстр, наведений у табл. 1.3.

Таблиця 1.3. – Приклад реєстру загроз енергетичній безпеці України

Блок управління	Загрози	
	внутрішні	зовнішні
	Спроможності об'єктивного оцінювання ситуації, прогнозування, моделювання та стратегічного планування. Втрата координації та взаємозв'язку із завданнями національної безпеки. Втрата системи підготовки та перепідготовки кадрів	Відключення України від систем (мереж) інших держав. Порухення системи управління. Припинення фінансування проєктів міжнародними фінансовими інституціями
Функції та ролі	Популізм у регулюванні енергетики та ринків. Недосконалі моделі та інструменти регулювання. Асиметрія інформації. Неспроможність до кризового реагування. Відсутність системи стратегічного планування й координації розвитку	Блокування запровадження правил функціонування енергетики відповідно до законодавства ЄС

	економіки й енергетики	
Процеси	Державне втручання в ціноутворення. Тінізація відносин в енергетиці. Втрата єдиної технічної політики й системи технічного контролю. Втрата впливу на діяльність інвесторів. Стимування розвитку законодавства для регулювання енергетичних ринків. Непрогнозована динаміка енергоспоживання й нестабільність енерговиробництва. Позапроектні режими роботи ОЕС	Зовнішній вплив на вироблення енергетичної політики. Наявність суб'єктів із центром управління за межами юрисдикції національного уряду
Матеріал системи	Втрата кваліфікації персоналом. Зношеність основних фондів. Орієнтація на персональний інтерес	Відплив кваліфікованого персоналу

З метою додаткової конкретизації загрози енергетичній безпеці вирізняють за:

– середовищем (внутрішні, зовнішні, як, наприклад, у табл. 1.1);

- масштабом чи охопленням (національні, регіональні, місцеві);
- тривалістю прояву (короткочасні, тривалі);
- ступенем впливу (загальноекономічним, галузевим, локальним);
- походженням (природним, антропогенним, технологічним);
- об'єктами впливу (люди, майно, навколишнє природне середовище);
- видом впливу (біологічний, хімічний, ергономічний, механічний, фізичний, психосоціальний);
- сферами безпеки (воєнна, державна, громадська, зовнішньополітична, економічна, енергетична, екологічна, соціальна, інформаційна, кібербезпека);
- принципом, характером, формами вияву (реальні чи потенційні; явні чи приховані; навмисні чи несвідомі).

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

Суб'єкт управління повинен забезпечити здатність ідентифікувати множину потенційних загроз, оцінювати ризики виникнення кризових ситуацій в енергетичній сфері, а також ефективно нейтралізувати або мінімізувати негативні наслідки таких загроз. Крім того, важливо підтримувати систему на шляху до визначених стратегічних цілей шляхом своєчасного відновлення її стабільного функціонування після кризових ситуацій.

Процес деталізації загроз варто здійснювати, орієнтуючись на потреби суб'єкта управління. Для суб'єктів, відповідальних за національну безпеку, більш доцільно зосереджуватися на загрозах для всієї енергетичної системи в цілому. Водночас органи влади, які формують політику у паливно-енергетичному секторі, мають приділяти увагу окремим елементам системи, виявляючи загрози для її складових, таких як зв'язки, функції, процеси.

Так, прикладом деталізації загроз може слугувати процес ідентифікації загроз для постачання енергетичних послуг. У цьому випадку слід окремо розглядати загрози для електропостачання, газопостачання, теплопостачання, постачання нафтопродуктів, а також загрози, пов'язані з інституційним та нормативним забезпеченням, управлінням, технічним регулюванням, інвестиціями, науковою і технологічною підтримкою, підготовкою кадрів.

Такий підхід дозволяє здійснити комплексний аналіз, що враховує специфіку різних компонентів системи та забезпечує детальніше розуміння потенційних вразливостей кожного з них, а також своєчасне реагування на виявлені загрози та ефективне управління ризиками в енергетичній сфері.

РОЗДІЛ 2. ВПЛИВ ДУГОВИХ ЗАМИКАНЬ НА РІВЕНЬ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ ОБ'ЄКТА

2.1. Характеристики дугового замикання та метод виявлення фотоелектричної системи

Через підвищення рівня забруднення довкілля фотоелектричні системи для виробництва електроенергії швидко набули популярності завдяки їхній екологічній чистоті та відновлюваності. Однак із ростом кількості таких установок збільшується і кількість несподіваних збоїв, які можуть становити серйозну небезпеку. Одним із найнебезпечніших є послідовне дугове замикання, яке може виникати через ослаблені або пошкоджені внутрішні електричні кабелі або погіршення ізоляції. У системах постійного струму дугові замикання можуть стати причиною надмірного підвищення температури, оскільки відсутність точки перетину нуля в струмі дуги ускладнює її згасання, що створює ризик стабільного горіння та пожежі.

Для забезпечення безпеки Національний електричний кодекс вимагає застосування пристроїв ідентифікації дуги та захисту для всіх фотоелектричних систем із напругою вище 80 В, оскільки саме на таких системах існує підвищений ризик дугових замикань.

Дугові замикання класифікують на три основні типи: паралельні, послідовні та основні дуги. Такі типи, як заземлена дуга та паралельна дуга, можна легко виявити за допомогою звичайних засобів захисту через суттєві зміни в струмі петлі. Однак послідовне дугове замикання є складнішим для виявлення, оскільки воно не призводить до збільшення напруги шини чи струму петлі в фотоелектричній системі.

У зв'язку з цим дослідження у цій сфері переважно фокусуються на розробці методів ідентифікації саме послідовної дуги. Основними підходами для аналізу сигналів несправності є методи в часовій області, частотній області

та гібридні методи, які комбінують обидва підходи. Кожен з цих методів має власні переваги та застосовується залежно від специфіки дугового замикання, яке необхідно виявити, для підвищення надійності та безпеки фотоелектричних систем.

Метод у часовій області часто використовується для виявлення дугових замикань, зокрема для аналізу змін, які відбуваються в сигналах струму та напруги при виникненні дугових замикань. Цей підхід зосереджується на характеристиках замикання, таких як зміни в інтенсивності струму або напруги у часі. Наприклад, у роботах [47] використовувалася ентропія струму фотоелектричної панелі для розпізнавання послідовного дугового замикання. Інші дослідження, як-от у [48], для ідентифікації послідовних дуг застосовували напругу живлення та лінійний струм, а в [49] — відношення сигнал/шум для визначення дуги серії PV та відокремлення сигнатур перемикачів на основі крос-кореляції.

У роботах [50] та [51] використовувалися методи аналізу коваріаційних матриць та аналіз головних компонент для відділення напруги та струму та розрахунку індексу характеристик несправності, що дозволяє більш точно виявити серійні дуги. У дослідженні [52] математична морфологія була застосована для розпізнавання дугових замикань у фотоелектричних системах. Усі ці методи мають на меті підвищити точність виявлення дуги та зменшити ймовірність помилкових спрацьовувань.

Проте важливо зазначити, що ці методи можуть стикатися з певними проблемами в умовах змін інтенсивності світла або збурень, які виникають у контролерах фотоелектричної системи. Це може призвести до зміни характеристик струму в часовій області та, відповідно, до неправильного спрацювання цих методів.

Наприклад, у роботі [53] для розпізнавання та гасіння послідовних дуг використовувалося падіння напруги та мінімізація робочого циклу перетворювача. Однак цей метод не враховує вплив алгоритму MPPT (максимального зсуву точки потужності), що може призвести до нестабільності

роботи системи. У підсумку, хоча методи в часовій області є досить корисними для виявлення дугових замикань, їх ефективність може бути обмежена різноманітними зовнішніми чинниками, такими як зміни інтенсивності освітлення чи збурення, що потребує подальших удосконалень.

Метод у частотній області для виявлення дугових замикань використовує аналіз сигналу в частотній області, щоб визначити характерні зміни, які відбуваються при виникненні дуги. Одним з найбільш поширених інструментів для цього є швидке перетворення Фур'є (ШПФ), яке дозволяє аналізувати сигнал у різних частотних діапазонах і виявляти аномалії, які можуть свідчити про наявність дугового замикання. Наприклад, в роботі [54] була продемонстрована очевидна розбіжність у частотній області між струмом дуги та нормальним струмом, що дозволяє виявляти дугу.

Однак, якщо смуга пропускання виявленого сигналу містить шуми перемикання або інші несподівані сигнали, це може призвести до помилок у роботі методу виявлення, оскільки шум може перекрити сигнал дуги. Для вирішення цієї проблеми були запропоновані методи, які використовують кілька частотних діапазонів для більш точного розпізнавання дугових замикань. Це дозволяє знижувати вплив шуму та підвищує точність виявлення.

У роботах [56] і [57] використовувався метод аналізу FFT (швидке перетворення Фур'є) для детекції послідовних дуг у фотоелектричних системах, де порівняння відносних величин спектральних характеристик також допомогло розпізнати дугу серії. Проте, на відміну від методів, що аналізують часову область, методи в частотній області не завжди здатні враховувати характеристики сигналу в часі, що може обмежувати їх ефективність.

Інші методи, такі як використання струму паралельних конденсаторів [58, 59] чи магнітних датчиків для вимірювання сигналів рожевого шуму [60], також застосовуються для виявлення дугових замикань, проте ці методи можуть бути дорогими з економічної точки зору, що обмежує їхнє широке застосування. В роботі [61] використовували високочастотний спектральний узор для ідентифікації серійних дуг у фотоелектричних системах, застосовуючи

ідеї зі стисненого зондування, що дозволяє зменшити обсяг даних і підвищити ефективність.

Однак, навіть при використанні ШПФ та інших методів в частотній області, є певні обмеження. Наприклад, ці методи можуть не мати можливості для отримання характеристик, специфічних для часової області, що може призвести до неправильного виявлення сигналу. Крім того, вони дуже чутливі до шуму перемикання, що може вплинути на точність результатів і призвести до помилок в ідентифікації дугового замикання.

Гібридні методи здебільшого виявляють послідовне дугове замикання, використовуючи характеристики сигналу в часовій і частотній областях. У [53] непостійні флуктуації та високочастотні шуми були обрані як характеристики послідовної несправності для діагностики послідовної дуги. Метод діагностики послідовної дуги використовує метод дискретного вейвлет-перетворення (DWT) для отримання характеристики несправності струму в частотно-часовій області [54]. У [55] був запропонований метод діагностики дугового замикання, який об'єднує DWT, аналіз щільності нульового діапазону та аналіз періодичних ознак. У [56] напруга, відфільтрована через фільтр Калмана, використовувалася для розпізнавання дуги серії PV. У [57] суміжні багатосегментні спектральні характеристики подібності сигналу були використані для розпізнавання дуги серії. Для вилучення характеристик дуги використовувався метод варіаційної декомпозиції [58]. У [59] була створена модель дуги на основі VI, спектрів потужності та характеристик падіння струму послідовної дуги, а також запропоновано метод діагностики дуги, заснований на автокореляції та вимірюванні магнітного поля. Однак ці методи вимагають ручного вибору порогів, які визначають точність цих методів виявлення. Нещодавно були вивчені деякі методи виявлення, засновані на машинному навчанні. У [60] був запропонований метод діагностики дуги серії, який об'єднує багатомасштабну нечітку ентропію, адаптивне розкладання локального середнього та машину опорних векторів (SVM). Оптимізоване розкладання варіаційного режиму та SVM були використані для розпізнавання

дуги серії PV [51]. У [52] легка згорточна нейронна мережа була використана для діагностики дуги серії PV. У [53] для ідентифікації дуги серії через низьку енергію була використана мережа виявлення на основі навчання передачі. У [54] був запропонований алгоритм діагностики дуги серії на основі ансамблевого машинного навчання. Однак ці методи потребують багато експериментальних даних для навчання моделі машинного навчання. Ці моделі навчені з використанням даних, отриманих у певній системі, але ці навчені моделі мають низьку точність для ненавчених систем.

У дослідженнях методу послідовного виявлення дуги зазвичай використовується високочастотний шум, що виникає в сигналах напруги та струму. Цей підхід потребує додаткового апаратного забезпечення, такого як спеціалізовані датчики та складні алгоритми обробки сигналу, що збільшує загальну вартість фотоелектричних систем. Ці методи, хоча й ефективні для виявлення дугових замикань, мають певні недоліки, зокрема високу вартість і складність реалізації, що обмежує їх широке застосування в практиці.

З цієї метою в останніх дослідженнях аналізується вплив послідовної дуги та алгоритмів максимального зсуву точки потужності (MPPT) на вихідні характеристики фотоелектричних систем (PV). Це дозволяє запропонувати альтернативні методи виявлення та гасіння послідовних дуг, які не потребують додаткового апаратного забезпечення. Один із таких методів полягає у виявленні послідовної дуги через падіння струму в системі та гасінні дуги шляхом підвищення напруги на шині.

Цей метод має значні переваги, зокрема, він дозволяє успішно виявляти та гасити дугові замикання в низьковольтних фотоелектричних системах без потреби в додаткових компонентах. Крім того, запропонована техніка може бути інтегрована в систему за стандартом UL1699B, що є важливим для сертифікації та безпеки таких систем. Тому цей метод є економічно ефективним і зручним для реалізації у стандартних фотоелектричних установках, що допомагає знижувати витрати та підвищувати їх надійність.

2.2. Вплив послідовної дуги на фотоелектричну систему

Типова структура двоступеневого інвертора в системі виробництва фотоелектричної енергії показана на рисунку 2.1 [56]. Перший ступінь — це перетворювач DC/DC, який забезпечує підвищення напруги та функцію MPPT. Другий ступінь — це перетворювач постійного струму в змінний струм, який забезпечує функцію підключення інвертора до мережі, де I_{loop} і U_{bus} — це контурний струм і напруга на шині. U_{dc} і U_{dc}^* — це напруга шини постійного струму та її цільове значення. i_o та u_o — струм і напруга на стороні мережі.

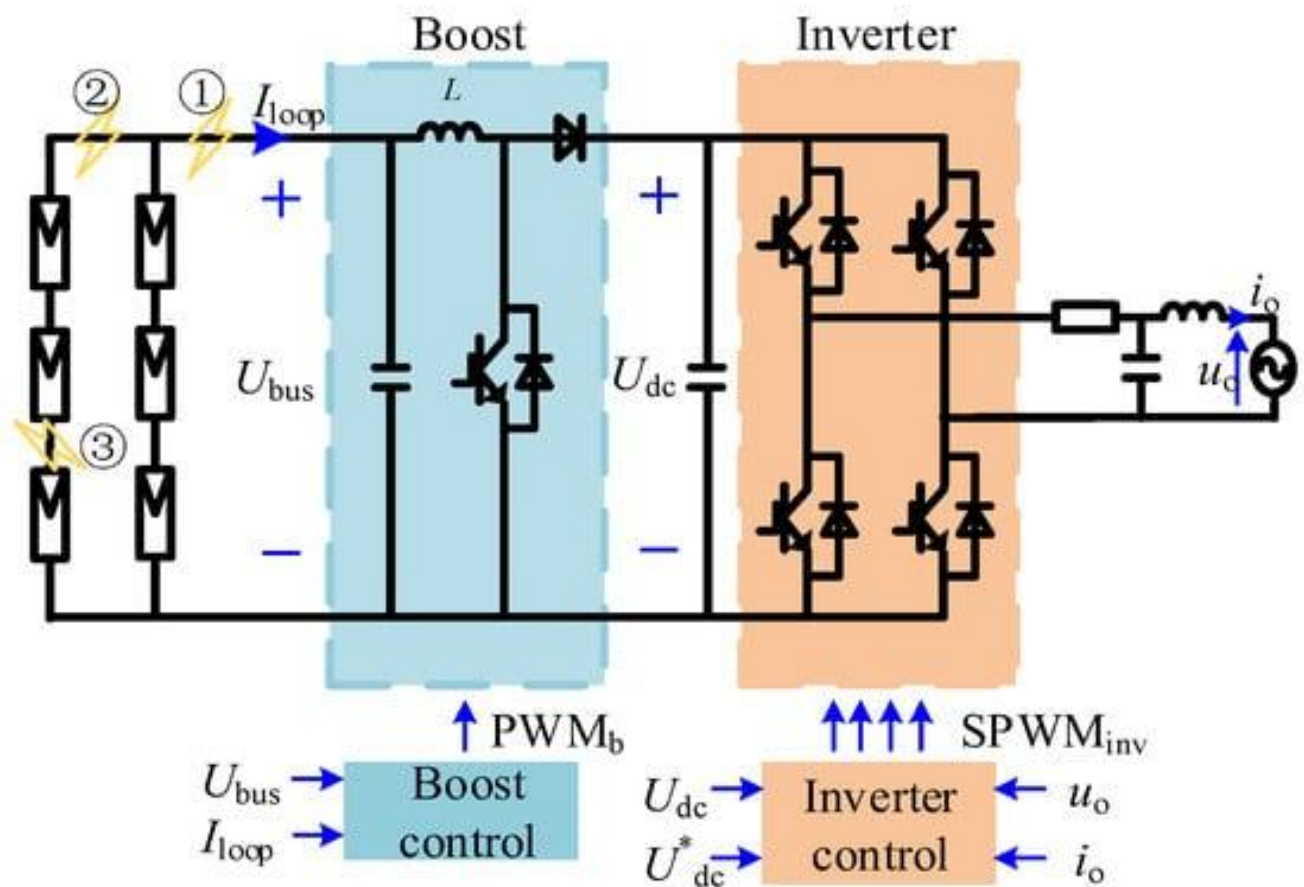


Рисунок 2.1. – Типові структури фотоелектричної системи та різні позиції дуг серії

Послідовна дуга може виникати в різних положеннях, як показано на рисунку 2.1 : на головній фотоелектричній шині (№1), на фотоелектричній ланцюзі (№2) і між фотоелектричним модулем (№3).

Послідовна дуга, яка виникає на фотоелектричній панелі, менше впливає на перетворювач постійного струму в змінний струм та його керування. Тому в цьому дослідженні в основному аналізується вплив послідовної дуги на фотоелектричну матрицю та підвищувальний перетворювач за допомогою методу керування.

2.3. Характеристики серії DC Arc VI

У цьому дослідженні моделюється виникнення послідовного дугового замикання через дуговий генератор на основі стандарту UL1699B, що складається з двох мідних електродів, ізоляторів, поворотного столу та крокового двигуна. Один із мідних стрижнів із плоским кінчиком є нерухомим електродом, а інший із загостреним кінчиком є рухомих електродом, як показано на рисунку 2.2.

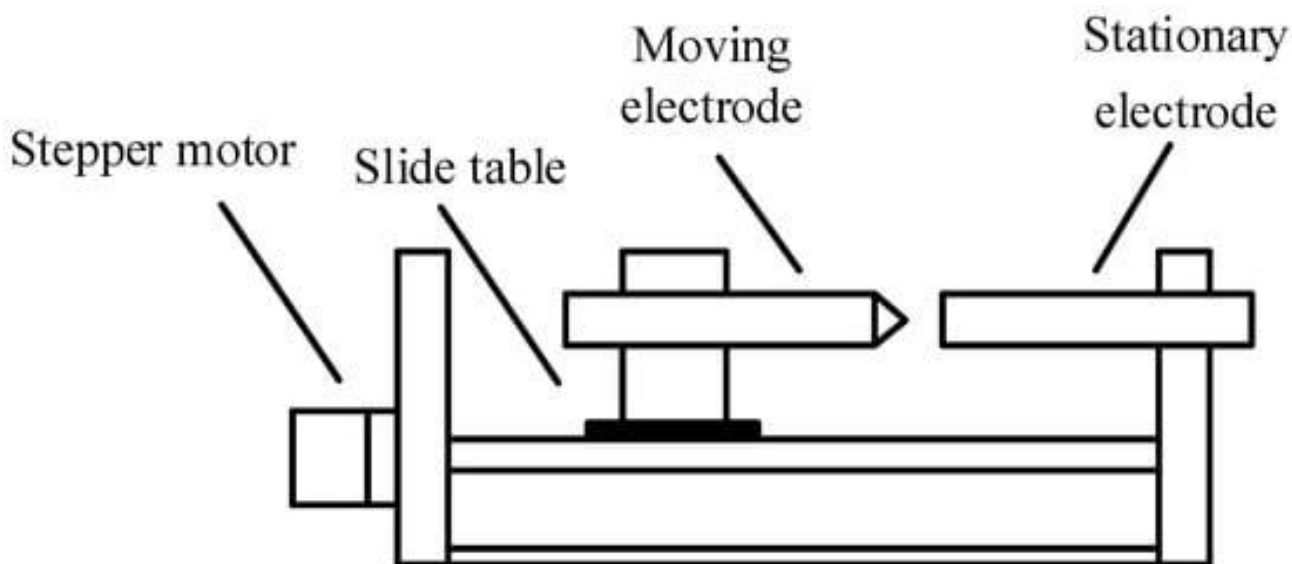


Рисунок 2.2. – Генератор дуги

Дуга постійного струму може бути еквівалентна нелінійному опору; довжина дугового проміжку та струм впливатимуть на напругу дуги [57]. Коли послідовна дуга запалюється, напруга дуги різко зростає до 15 В, як показано

на рисунку 2.3 . Ноттінгемська модель може представляти характеристики напруги та струму дуги постійного струму після стабілізації дуги, як показано в (2.1).

$$U_{\text{arc}} = A + \frac{b}{I_{\text{arc}}^a} \quad (2.1)$$

значення A і b залежать від матеріалу електрода і довжини дугового проміжку, а значення a залежить від матеріалу електрода.

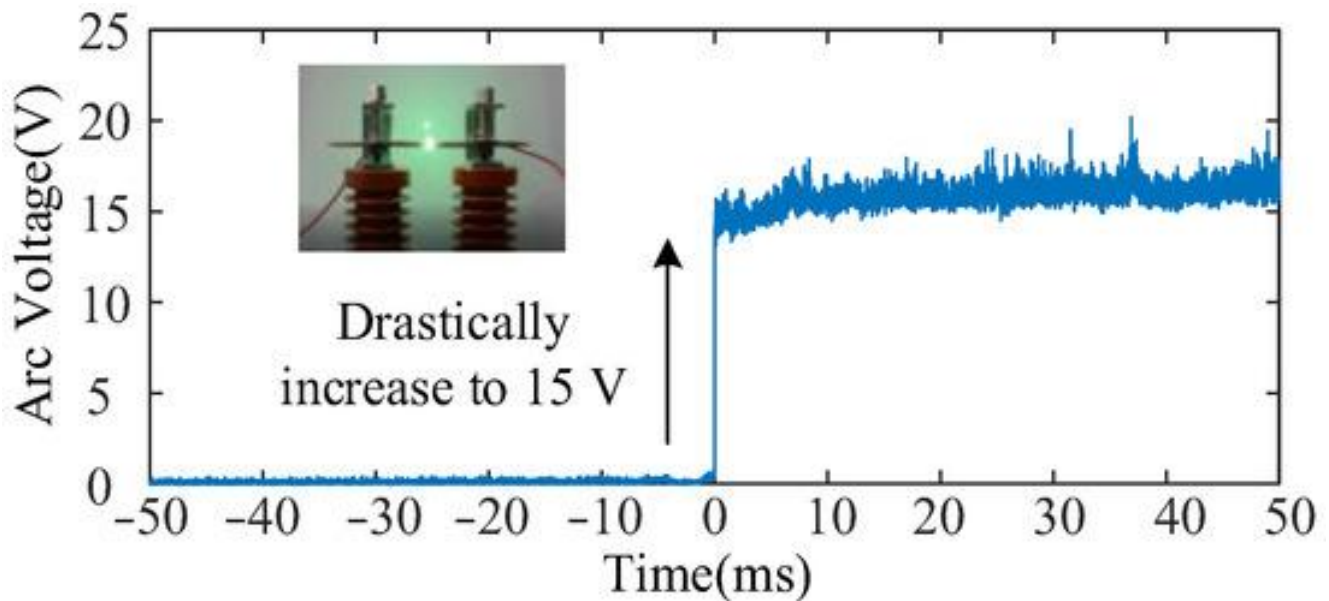


Рисунок 2.3. – Форма хвилі напруги дуги

Відповідно до експерименту, напруга зародження дуги постійного струму становить приблизно 15 В, на яку мінімально впливають струм ланцюга та дуговий проміжок. Струм дуги визначає, чи може дуга серії DC горіти стабільно. Якщо струм дуги зменшується до певного значення, дуга постійного струму згасне.

2.4. Вплив алгоритму МРРТ за умови послідовної дуги

Фотоелектричний модуль складається з керованого джерела струму, опору, паралельного діода та послідовного опору, як показано на рисунку 2.4 [58]. Відповідно до закону Кірхгофа U_{PV} - I_{PV} характеристики фотоелектричного модуля можна виразити таким чином:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{vd0} \left[\exp \left(\frac{U_{pv} + I_{pv} R_s}{N_s U_t} \right) - 1 \right] - \frac{U_{pv} + I_{pv} R_s}{R_{sh}} \quad (2.2)$$

де I_{ph} — фотострум і його значення залежить від факторів зовнішнього середовища, I_{vd0} — зворотний струм насичення діода, N_s — кількість фотоелектричних елементів, R_s — послідовний опір, U_t — теплова напруга діод, R_{sh} — паралельний опір фотоелектричного модуля, а U_{PV} та I_{PV} — вихідна напруга та струм фотоелектричної системи.

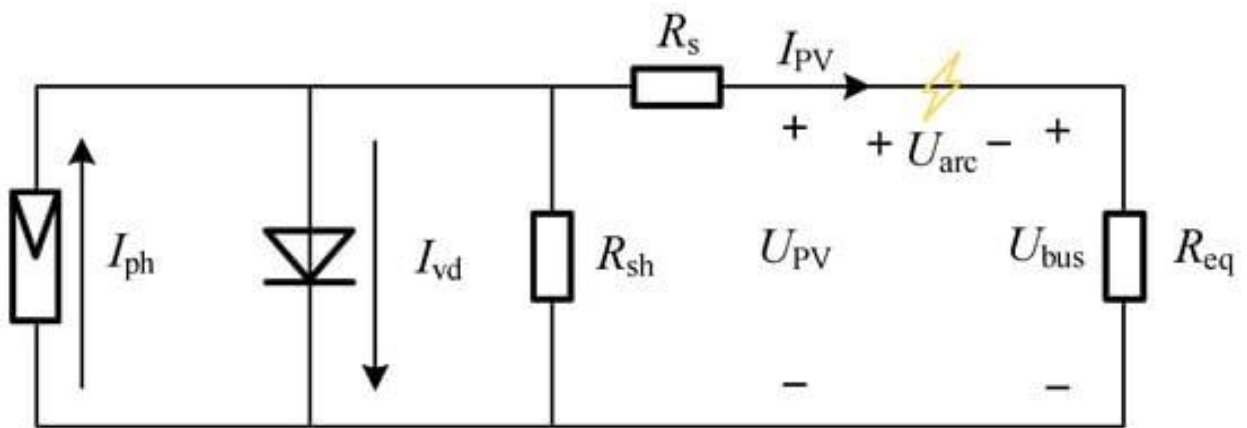


Рисунок 2.4. – Еквівалентна модель фотоелектричних модулів

Теплова напруга діода представляється наступним чином:

$$U_t = \frac{KTA}{q} \quad (2.3)$$

де K — постійна Больцмана, A — добротність діода, T — температура, q — електронний заряд.

У практичній інженерії R_s малий, а R_{sh} великий [39]. Для кращого аналізу рівняння (2.2) можна спростити так:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{vd0} \left[\exp \left(\frac{U_{pv}}{N_s U_t} \right) - 1 \right] \quad (2.4)$$

Відповідно до рівняння (2.4), характеристики вихідної потужності PV можна отримати як:

$$P_{pv} = U_{pv} \left\{ I_{ph} - I_{vd0} \left[\exp \left(\frac{U_{pv}}{N_s U_t} \right) - 1 \right] \right\} \quad (2.5)$$

Відповідно до рівняння (2.5), U_{pv} - I_{pv} характеристики фотоелектричної матриці можна отримати для аналізу ефекту послідовної дуги.

Для фотоелектричного модуля в певному середовищі вихідний струм і напруга фотоелектричної системи визначаються за допомогою його фотоелектричних характеристик U_{pv} - I та опору навантаження фотоелектричного модуля (R_{pv}). Співвідношення між PV вихідним і R_{pv} за нормальних умов виражається таким чином:

$$R_{pv} = \frac{U_{pv}}{I_{pv}} = R_{eq} + R_{line} \quad (2.6)$$

де R_{eq} — еквівалентний опір інвертора, а R_{line} — опір лінії, який відносно малий і ним можна ігнорувати.

Алгоритм MPPT змінює R_{eq} , контролюючи робочий цикл D , таким чином досягаючи відстеження точки максимальної потужності (MPP) [60].

$$R_{pv} = R_{eq} = (1 - D)^2 R_L \quad (2.7)$$

де R_L — фактичний опір навантаження інвертора, а D — робочий цикл MOSFET у підвищувальному перетворювачі.

Метод збурення та спостереження (P&O) є поширеним алгоритмом MPPT у фотоелектричних системах. Він шукає напругу MPP, порівнюючи зміну потужності до та після періоду збурення [41].

$$U_{mppt}(T + 1) = U_{mppt}(T) + \Delta U \quad (2.8)$$

де U_{mppt} — цільова напруга алгоритму MPPT, а ΔU — амплітуда завад, яка є додатною або від'ємною, вказуючи напрям завад. T — період збурення алгоритму MPPT, і в цьому дослідженні він прийнятий за 300 мс.

Потім алгоритм MPPT змінює робочий цикл D MOSFET через PI-контролер, щоб $U_{\text{шина}}$ наблизилася до U_{mppt} , як показано на рисунку 2.5.

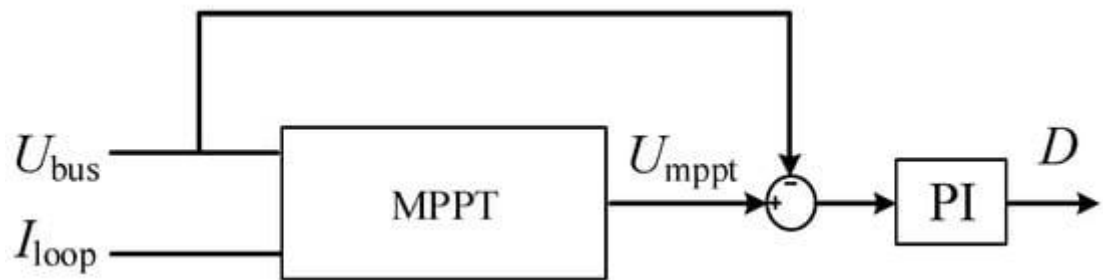


Рисунок 2.5. – Блок-схема алгоритму MPPT

Коли починається процес горіння дуги, $U_{\text{шина}}$ різко зменшується, але U_{mppt} алгоритму MPPT не зміниться через послідовну дугу. PI-контролер порівнює різницю між $U_{\text{шиною}}$ та U_{mppt} за період. Потім ПІ-регулятор змінює шпаруватість D на основі різниці, поки напруга шини не зрівняється з цільовою напругою. Цей процес дуже короткий і залежить від динамічної швидкості ПІ-регулятора. У цьому дослідженні період ПІ-регулятора приймається рівним 10 мс.

Тому в цьому дослідженні припускається, що $U_{\text{шина}}$ залишається майже незмінною при напрузі MPP до та після виникнення послідовної дуги через ПІ-регулятор.

Шина U нижча, ніж U_{PV} через послідовну напругу дуги. Відповідно до закону Кірхгофа, $U_{\text{шина}}$ дорівнює різниці між U_{PV} і $U_{\text{дугою}}$.

$$U_{\text{bus}} = U_{\text{PV}} - U_{\text{arc}} \quad (2.9)$$

2.5. Вихідні характеристики фотоелектричного модуля за умови послідовної дуги

Якщо припустити, що немає змін у факторах навколишнього середовища до та після виникнення дуги послідовності, характеристики $U_{\text{PV}} - I_{\text{PV}}$ рядка PV залишаються незмінними до та після виникнення дуги послідовності. Однак

напруга несправної фотоелектричної ланцюга збільшується на напругу дуги порівняно з шинною U . Характеристики несправної фотоелектричної ланцюга $U_{bus} - I_{PV}$ такі:

$$I_{PV} = I_{ph} - I_{vd0} \left[\exp \left(\frac{U_{PV} - U_{arc}}{N_s U_t} \right) - 1 \right] \quad (2.10)$$

Таким чином, характеристики $U_{шини} - I_{PV}$ несправної фотоелектричної ланцюга відхиляються вліво порівняно з характеристиками $U_{PV} - I_{PV}$. Величина зсуву вліво є величиною послідовної напруги дуги. Крім того, характеристики $U_{шини} - I_{PV}$ звичайної фотоелектричної ланцюга дорівнюють характеристикам $U_{PV} - I_{PV}$. Це дослідження передбачає постійну напругу дуги 15 В для кращого аналізу, як показано на рисунку 2.6.

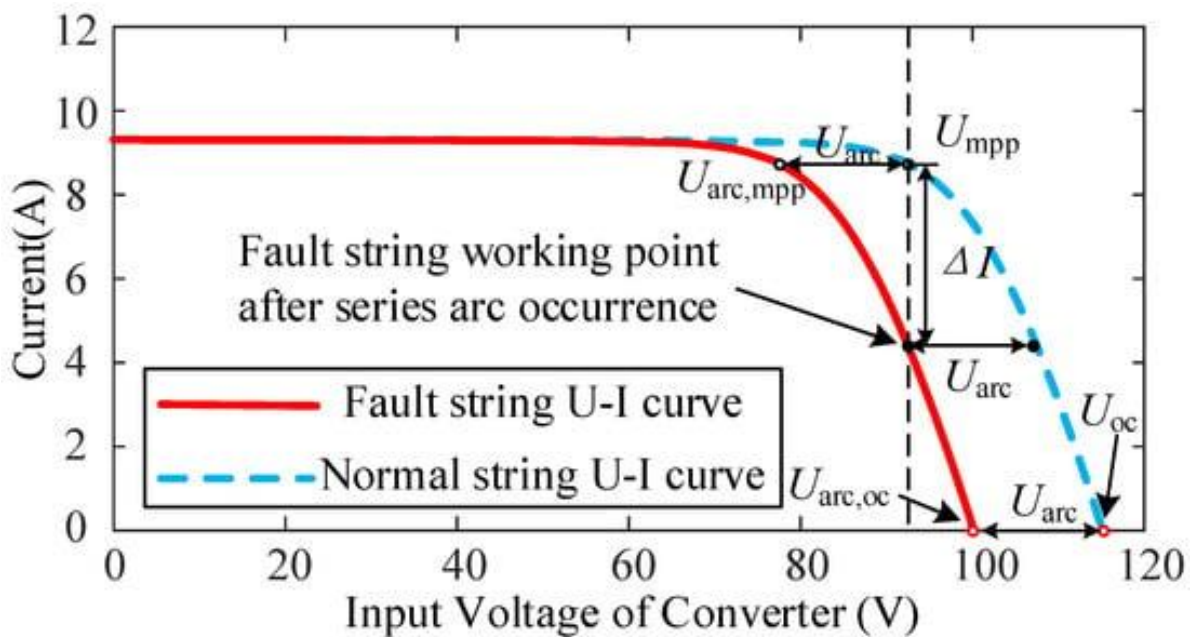


Рисунок 2.6. – Зміни фотоелектричних характеристик шини $U - I$ за умови послідовної дуги

На рисунку U_{mpp} і $U_{oc, arc}$ — напруга PV у MPP і точці розімкнутого ланцюга за нормальних умов. $U_{arc,mpp}$ і $U_{arc,oc}$ — шинна U у точці MPP і точці розриву ланцюга за умов послідовної дуги.

Підвищення напруги PV через послідовну дугу призводить до того, що робоча точка PV переміщується до точки розімкнутого ланцюга. Потім

вихідний струм PV зменшується, і це зменшене значення пов'язане з параметрами фотомодуля.

$$\Delta I = I_{vd0} \left[\exp \left(\frac{U_{pv}}{N_s U_t} \right) - \exp \left(\frac{U_{pv} + U_{arc}}{N_s U_t} \right) \right] \quad (2.11)$$

Параметри фотоелектричного модуля не зміняться через послідовну дугу, але ці параметри важко точно розрахувати в практичній інженерії. Таким чином, це дослідження оцінює падіння струму ΔI на основі кривої вихідної характеристики PV:

$$\Delta I = \frac{k U_{arc} I_{loop}}{(U_{oc} - U_{mpp})} \quad (2.12)$$

Параметр k залежить від кривизни кривої PV характеристики в точці MPP. Відповідно до експерименту та моделювання, діапазон значень k становить 0,5~0,7; це залежить від параметрів PV та ступеня старіння. У міру старіння фотоелектричного модуля послідовний опір R_s поступово зростає, U_{mpp} поступово зменшується, а U_{oc} залишається незмінним. Таким чином, значення падіння струму зменшується в умовах послідовного дугового замикання зі старінням фотоелектричного модуля. У цьому дослідженні k приймається рівним 0,5.

Якщо послідовна дуга виникає на одній із струн, то ця ланка є несправною ланцюгом, струм якої зменшується на ΔI , а інші ланцюги PV є нормальними ланцюжками, струм яких залишається незмінним. Якщо послідовна дуга виникає на головній фотоелектричній шині, усі фотоелектричні ланцюги є несправними, струм яких зменшується на ΔI .

Те, чи може послідовна дугова помилка підтримувати стабільне горіння, тісно пов'язана з напругою послідовної дуги, алгоритмом MPPT і U_{pv} . Якщо напруга послідовної дуги дорівнює різниці між U_{oc} та U_{mpp} , коли виникає послідовна дуга, $U_{шина}$ залишається майже незмінною завдяки алгоритму MPPT, а U_{pv} збільшується до U_{oc} . Тоді вихідний струм PV майже падає до нуля, і послідовна дуга згасне, що призведе до несправного розриву ланцюга.

Подібним чином послідовну дугу можна погасити шляхом збільшення напруги на шині.

Послаблення інтенсивності світла також спричиняє зменшення вихідного струму PV, який за цих умов повільно зменшується. Однак за умови послідовної дуги вихідний струм PV різко впаде через різке збільшення напруги послідовної дуги, коли виникає послідовна дуга. Це можна використовувати як функцію для розрізнення між умовою зміни світла та дугою серії. Іншою особливістю є те, що фотоелектрична система не розмикається через низький струм за нормальних умов.

2.6. Метод виявлення послідовної дуги для фотоелектричної системи

Струм контуру різко впаде через різке збільшення напруги послідовної дуги, коли виникає послідовна дуга. Це дослідження виявляє послідовну дугу через падіння струму за зміною швидкості струму наступним чином (2.13).

$$I_{\max}(t) - I_{\min}(t) \geq I_{\text{set}} \quad (2.13)$$

де I_{set} встановлено для виявлення падіння струму через послідовну дугу. Падіння струму ΔI можна оцінити за допомогою рівняння (2.12). Враховуючи вплив збурення, встановлений поріг виявлення I приймає 0,8-кратне падіння струму $\Delta I \cdot t$ – період виявлення з урахуванням динамічного часу відгуку ПІ-регулятора. Вибирається період 50 мс. $I_{\min}(t)$ і $I_{\max}(t)$ — мінімальне та максимальне значення протягом періоду виявлення.

Як правило, зміна інтенсивності світла протягом 50 мс не викликає різкої зміни вихідного струму фотоелектричної енергії. Однак раптове затінення може призвести до стрімкого падіння вихідного струму фотоелектричної мережі, подібно до послідовного дугового замикання. Щоб відрізнити цю ситуацію та погасити послідовну дугу, це дослідження пригнічує послідовне горіння дуги

шляхом збільшення напруги шини до U_{oc} , що знаходиться під послідовним замиканням дуги.

Фотоелектричний модуль відноситься до нелінійних джерел живлення. Якщо напруга PV зростає до U_{oc} , вихідний струм PV впаде до нуля. За нормальних умов U_{oc} фотоелектричної ланцюга майже дорівнює U_{oc} шини. Під час послідовного дугового замикання напруга холостого ходу шини ($U_{arc,oc}$) зменшується через введення додаткової дугової напруги таким чином:

$$U_{arc,oc} = U_{oc} - U_{arc} \quad (2.14)$$

U_{oc} приблизно в 1,2-1,3 рази перевищує U_{mpp} , а мінімальна напруга послідовної дуги постійного струму становить близько 15 В. Таким чином, $U_{arc,oc}$ можна оцінити за U_{mpp} , тобто напругою PV до виникнення ряд арк. Якщо напруга на шині збільшує $U_{arc,oc}$, точка замикання розімкне ланцюг через згасання дуги при низькому струмі. Тоді струм петлі, де розташована послідовна дуга, впаде до нуля.

Підсумовуючи, запропонований метод використовує падіння струму контуру для виявлення послідовної дуги та гасіння послідовної дуги шляхом підвищення цільової напруги до $U_{arc,oc}$. Це показано на рисунку 2.7, який ілюструє процес діагностики несправності.

2.7. Тестова перевірка запропонованих рішень

Для перевірки та перевірки практичності запропонованого методу побудовано та випробувано підвищувальний перетворювач. У мікроконтролері STM32f103 реалізовано алгоритм MPPT і метод послідовного виявлення дуги. Алгоритм MPPT — це метод P&O із фіксованим розміром кроку.

Експериментальна платформа PV показана на рисунку 2.8. Параметри фотоелектричного модуля наведені в таблиці 2.1. Кабель і провідник

використовуються для задоволення вимог до імпедансу лінії стандарту UL1699B.

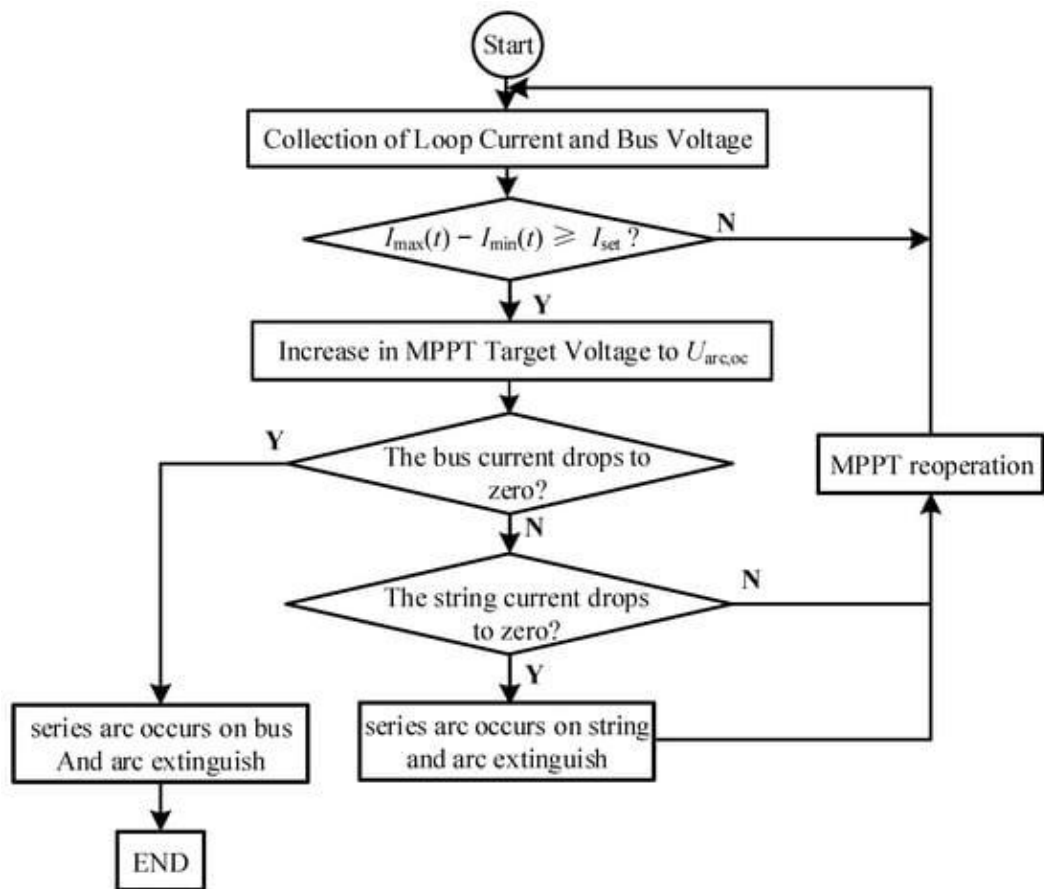


Рисунок 2.7. – Блок-схема запропонованого алгоритму ідентифікації.

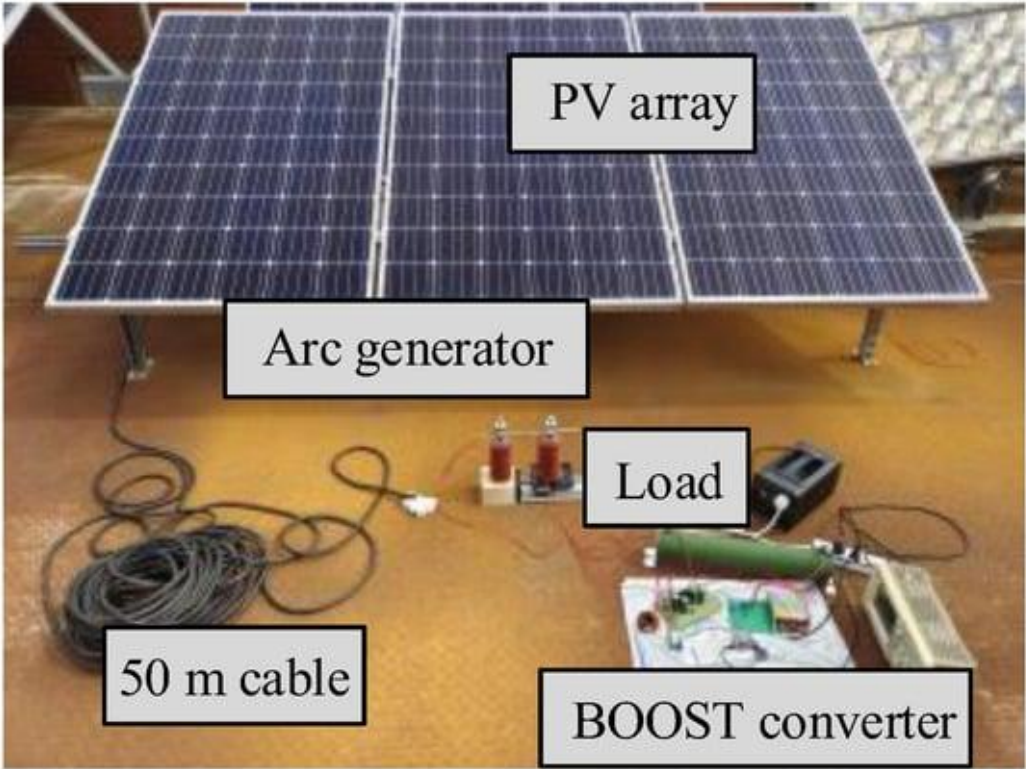


Рисунок 2.8. – Платформа серії дугових випробувань на основі UL1699В

Таблиця 2.1. – Параметри фотоелектричної системи.

	Parameters	Values
PV module	P_{max}	269.98 W
	V_{max}	30.68 V
	I_{max}	8.80 A
	V_{oc}	38.39 V
	I_{sc}	9.29 A
MPPT algorithm	Disturbance period	300 ms
	PI control period	10 ms
	Step size	1 V

Генератор дуги розміщується в різних місцях експериментальної платформи: на головній фотоелектричній шині, фотоелектричній ланцюзі та між фотоелектричними модулями.

Три фотоелектричні модулі утворюють фотоелектричну систему з однією струною, а дуговий генератор розміщено на головній фотоелектричній шині. За

умови послідовної дуги форма сигналу вхідної напруги (напруга шини) і струму (струм петлі) перетворювача показана на рисунку 2.9.

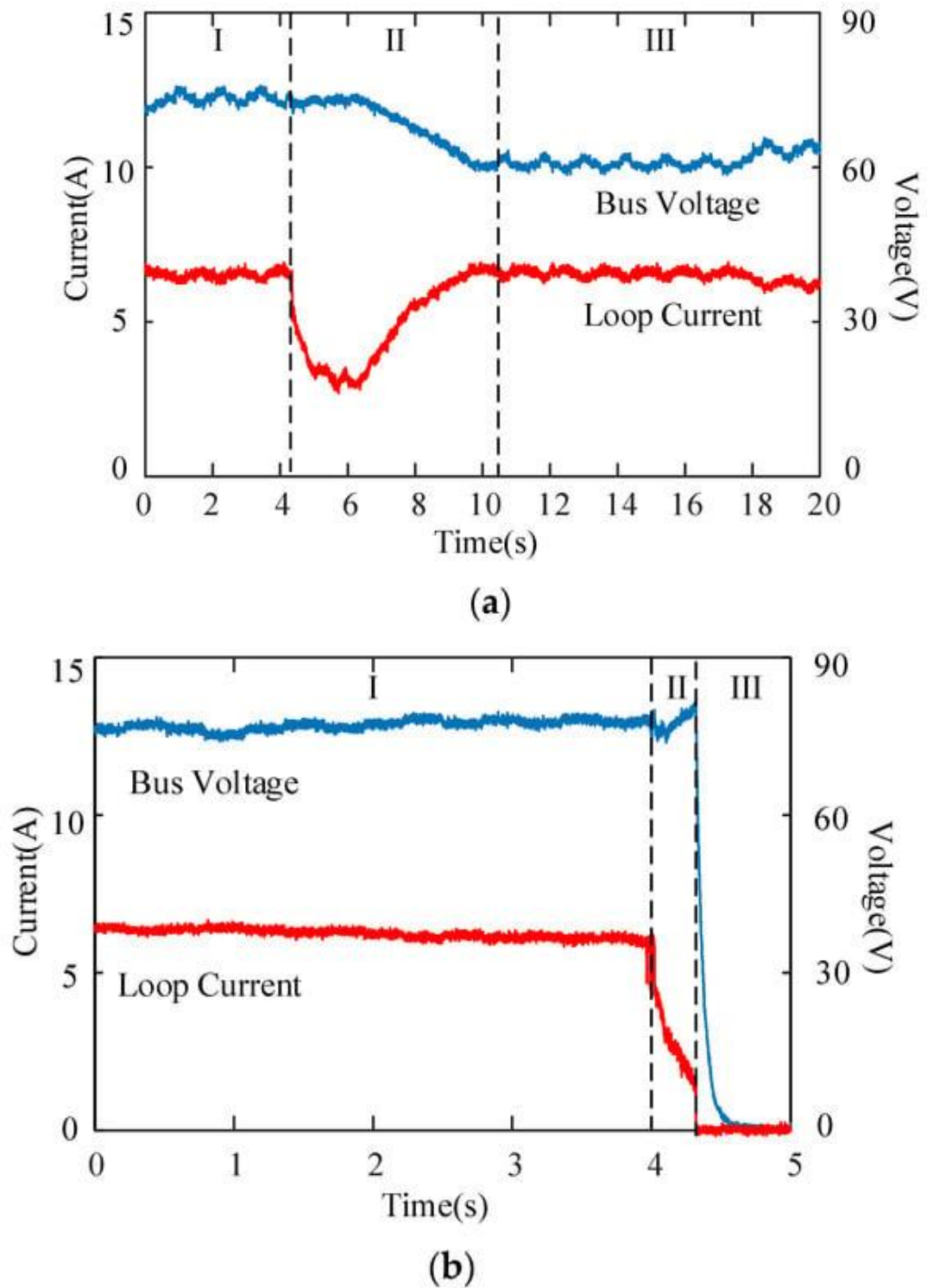


Рисунок 2.9. – Форма сигналу, коли на шині виникає послідовна дуга. (а) Без запропонованого методу. (б) За запропонованим способом.

Під перетворювачем без умови запропонованого методу форма сигналу така, як показано на рисунку 2.9 а. Ступінь I (0–4,1 с) працює нормально, а напруга шини та струм петлі коливаються навколо MPP завдяки методу P&O із фіксованим розміром кроку. Через 4,1 с виникає дуга серії. Напруга на шині залишається незмінною завдяки ПІ-регулятору, а струм петлі падає до 3,5 А. На етапі II (4,1–10,1 с) алгоритм MPPT збільшує вихідну потужність PV через збурення. На етапі 3 (10,1–20 с) впливають за допомогою алгоритму MPPT, і фотоелектрична система досягає нового MPP. Потім напруга шини зменшується на напругу дуги, а струм петлі повертається до рівня до виникнення послідовної дуги.

На рисунку 2.9, а показано, що дуга серії PV може стабільно горіти без запропонованого способу. У фотоелектричній системі контурний струм не має точки перетину нуля. Таким чином, коли послідовна дуга виникає в головній фотоелектричній шині, вона може зберігатися, зменшуючи вихідну потужність фотоелектричної мережі та навіть створюючи небезпеку пожежі.

Під перетворювачем із умовою запропонованого методу форма сигналу показана на рисунку 9 б. Ступінь I (0–4 с) працює нормально, а напруга шини та струм петлі коливаються навколо MPP. Через 4 с головна фотоелектрична шина викликає послідовне дугове замикання, що призводить до падіння струму контуру на 3 А. Крім того, зміна поточного курсу перевищує порогове значення. На етапі II (4–4,5 с) алгоритм виявлення послідовної дуги збільшує цільову напругу алгоритму MPPT у наступному циклі порушення. Напруга на шині зростає, а струм петлі починає зменшуватися. На етапі 3 (4,5–5 с) послідовна дуга гасне, коли струм петлі зменшується до 1,5 А, і положення послідовної дуги розмикає ланцюг. Тоді напруга на шині та струм петлі падають до нуля.

Рисунок 2.9 б показує, що запропонований метод може успішно виявляти та гасити послідовну дугу, яка виникає на головній фотоелектричній шині. Крім

того, пройшло приблизно 0,5 с від генерації дуги до моменту її гасіння, і розрив ланцюга фотоелектричної шини через послідовну дугу був згас.

Після збільшення кількості фотоелектричних модулів до 5 і розміщення дугового генератора на головній фотоелектричній шині тестовий сигнал показаний на рисунку 2.10 .

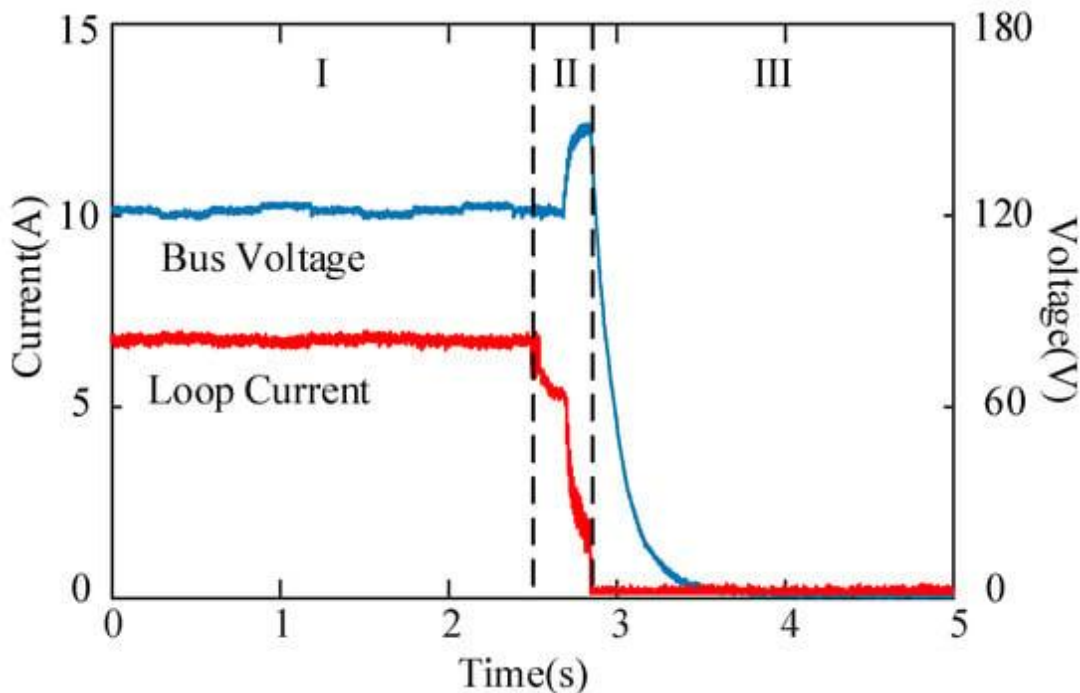


Рисунок 2.10. – Крива струму та напруги за запропонованим способом.

Як показано на рисунку 2.10 , напруга на шині зростає, а струм петлі залишається незмінним. Ступінь I (0–2,5 с) працює нормально, а напруга шини та струм петлі коливаються навколо МРР. Через 2,5 с виникає послідовна дуга, і струм петлі різко зменшується на 1,5 А. На етапі II (2,5–2,9 с) запропонований метод збільшує цільову напругу алгоритму МРРТ у наступному циклі порушення. Напруга на шині зростає, а струм петлі починає зменшуватися. На етапі 3 (2,9–5 с) послідовна дуга гасне, коли струм петлі зменшується до 1,5 А, і положення послідовної дуги розмикає ланцюг. Потім напруга шини та струм петлі падають до нуля через розрив ланцюга шини.

Зі збільшенням кількості фотоелектричних модулів значення падіння струму зменшується, а необхідна додаткова напруга холостого ходу зростає.

Тоді запропонований метод все ще успішно виявляє та гасить послідовну дугу протягом 0,5 с.

Щоб перевірити та перевірити практичність запропонованого методу для послідовної дуги, що виникає в фотоелектричній ланцюзі, шість фотоелектричних модулів були сформовані в фотоелектричну матрицю (три фотоелектричні модулі послідовно та дві струни паралельно), а генератор дуги був розміщений у рядках PV.

Під перетворювачем без умови запропонованого методу форма сигналу показана на рисунку 2.11.

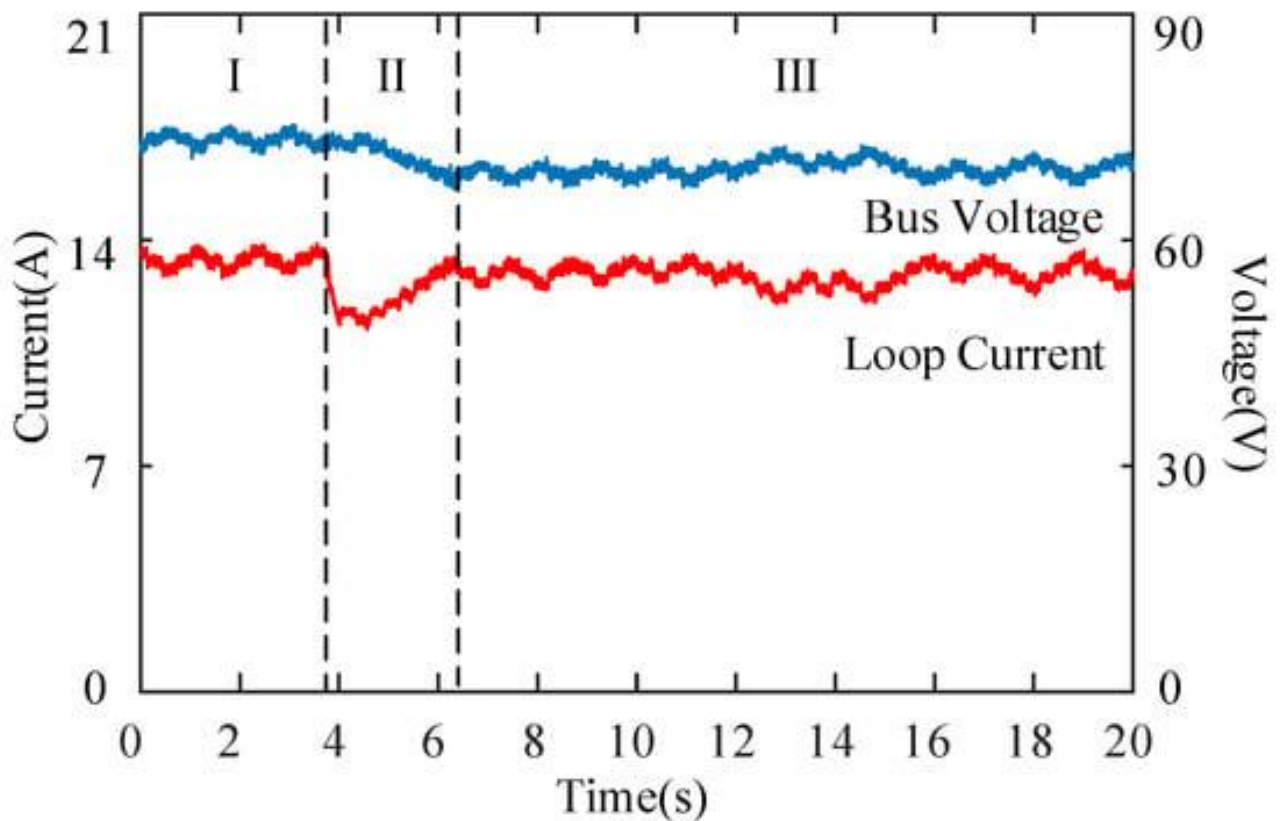


Рисунок 2.11. – Форма хвилі, коли послідовна дуга виникає на фотоелектричній ланцюзі та підвищувальному перетворювачі без алгоритму виявлення послідовної дуги

Ступінь I (0–3,9 с) працює нормально, а напруга шини та струм петлі коливаються навколо MPP. Через 3,9 с виникає послідовна дуга, і струм петлі різко зменшується на 3 А. На стадії II (3,9–6,1 с) алгоритм MPPT збільшує

вихідну потужність PV через збурення. На стадії 3 (6,1–20 с) під впливом алгоритму МРРТ фотоелектрична система досягає нового максимального значення МРР, і струм контуру повертається до рівня, який був до виникнення несправності.

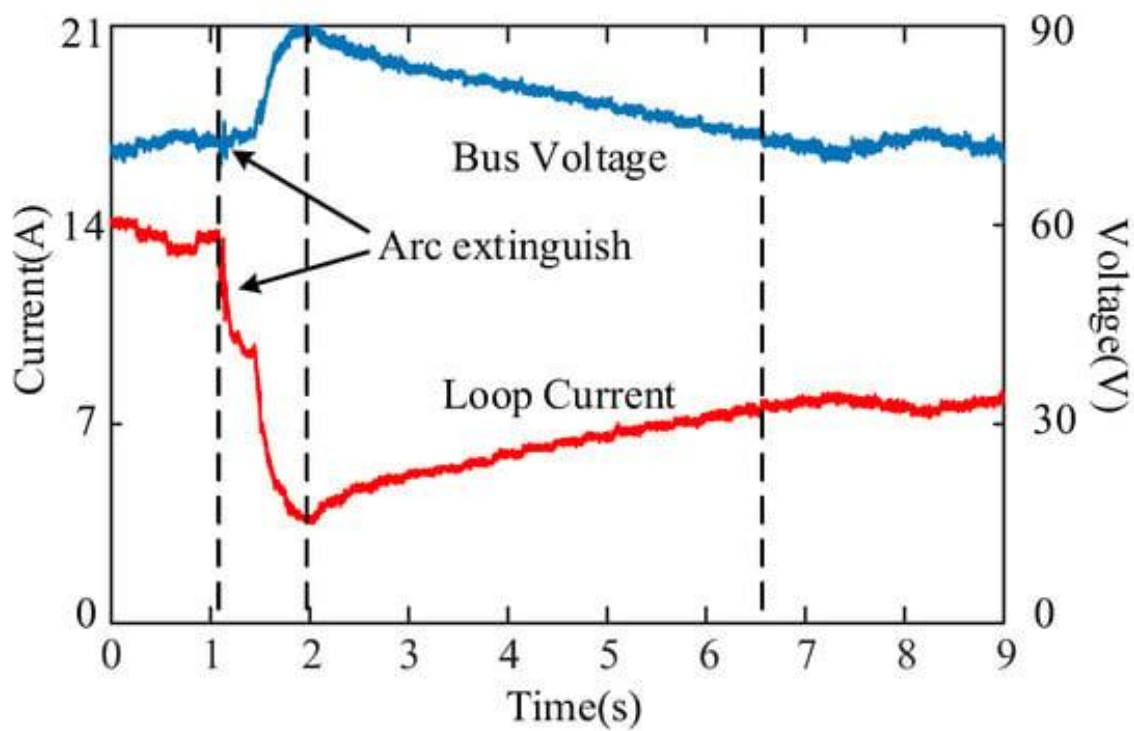
Серійна дуга може стабільно горіти в фотоелектричній струні без запропонованого способу. Під послідовною дугою, розташованою в стані ланцюга PV, напруга МРР несправної ланцюга зменшується, але нормальна напруга МРР ланцюга залишається незмінною. Під послідовною дугою, розташованою на головній фотоелектричній шині, напруга МРР усіх фотоелектричних ліній зменшується. Таким чином, нова напруга МРР, при якій виникає послідовна дуга на фотоелектричній ланцюзі, вища, ніж нова напруга МРР, при якій виникає послідовна дуга на головній фотоелектричній шині.

Після розміщення дугового генератора на фотоелектричній ланцюзі та між фотоелектричним модулем як позиції № 2 і № 3 на рисунку 1 під перетворювачем із умовою запропонованого методу форма сигналу показана на рисунку 2.12.

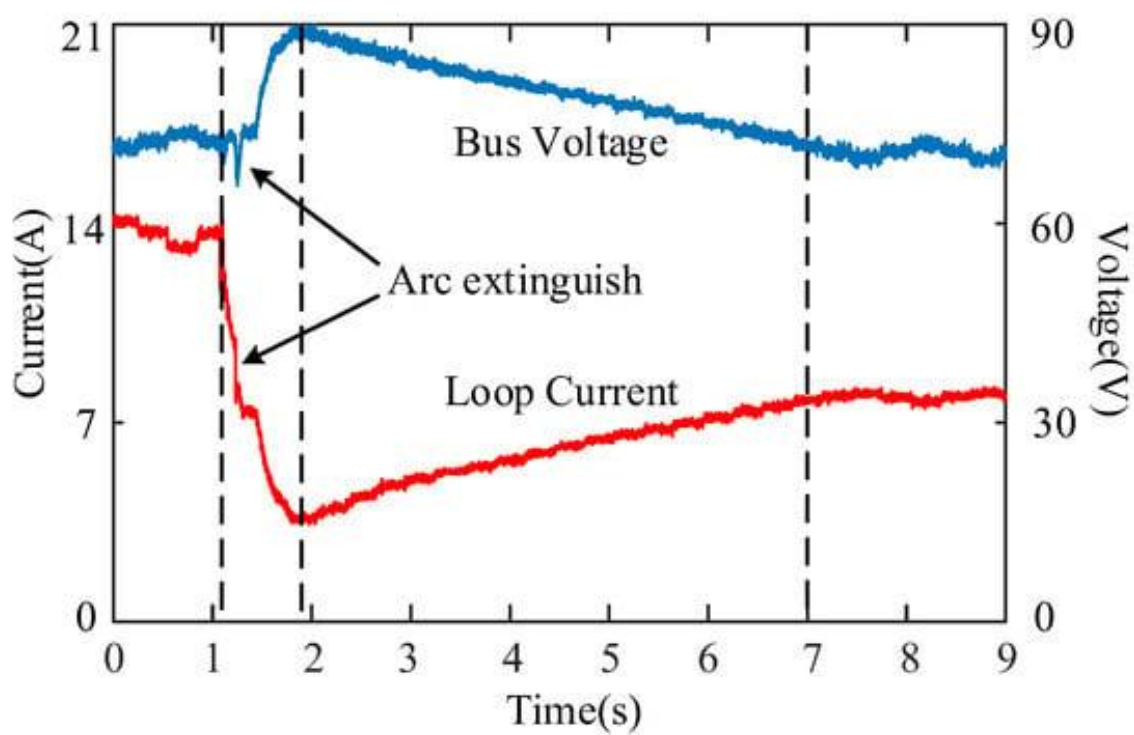
Як показано на рисунку 2.12, вплив послідовної дуги, що виникає в фотоелектричній ланці та між фотоелектричними модулями всередині ланцюга, на фотоелектричну систему є однаковим. Ступінь I (0–1,1 с) працює нормально. Через 1,1 с виникає дуга серії. Струм петлі зменшується на 3 А. На етапі II (1,1–1,9 с) запропонований метод збільшує цільову напругу алгоритму МРРТ. Тоді напруга на шині зростає, а струм петлі зменшується. Послідовна дуга гасне через низький струм дуги при збільшенні напруги шини. Потім вихідний струм несправної ланцюга PV різко падає до нуля. На етапі 3 (1,9–7 с) алгоритм МРРТ збільшує вихідну потужність PV через збурення, і послідовне дугове замикання не запалюється знову. На етапі IV (7–9 с) алгоритм МРРТ переробляється, і фотоелектрична система досягає нового МРР.

Результати показують, що запропонований метод може успішно виявляти та гасити послідовну дугу, яка виникає в струні PV. Несправна фотоелектрична

ланцюг розімкнула ланцюг після послідовного гасіння дуги. Інша нормальна робота струни, і послідовна дуга не запалиться повторно при низькій напрузі. Таким чином, коли фотоелектрична система досягає нового MPP, струм петлі становить лише половину значення до послідовного дугового замикання, а напруга шини залишається незмінною.



(a)



(b)

Рисунок 2.12. – Форма сигналу струму та напруги. (а) Послідовна дугова помилка виникає в фотоелектричній ланцюзі. (б) Послідовне дугове замикання виникає між фотоелектричними модулями всередині ланцюга

Тестування алгоритмів виявлення послідовної дуги в умовах зміни освітленості в умовах хмарної погоди; поточна форма сигналу показана на рисунку 2.13.

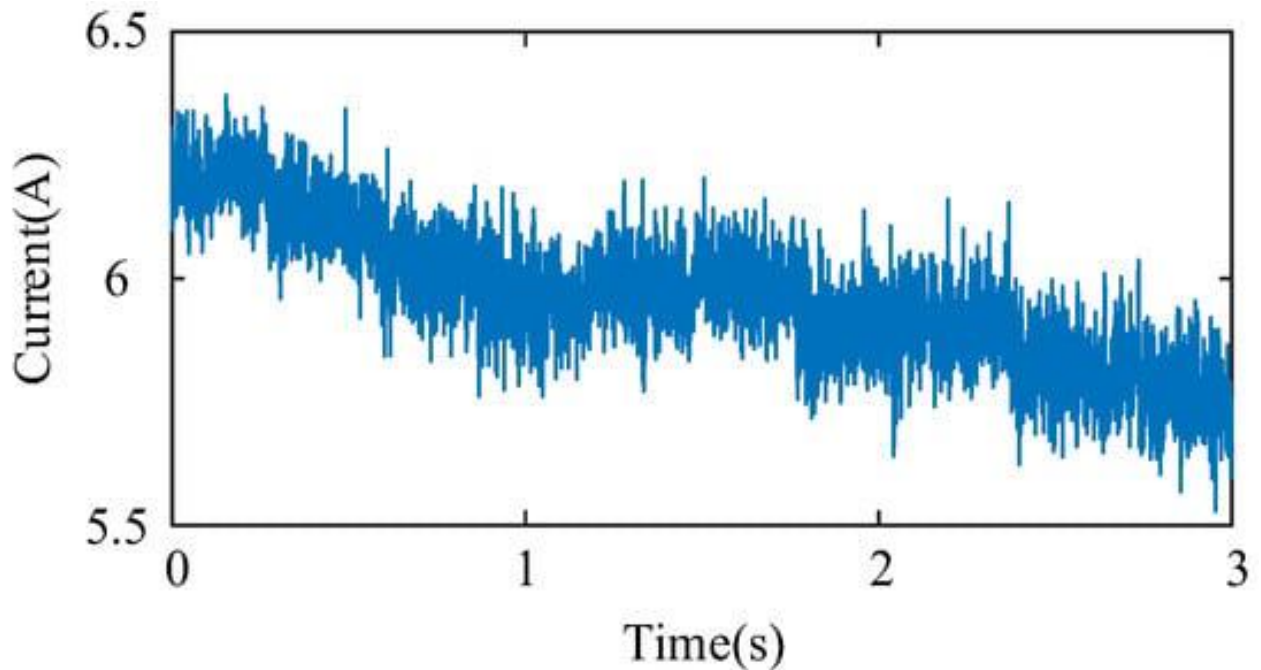


Рисунок 2.13. – Форма хвилі струму петлі в умовах зміни освітленості

Як показано на рисунку 2.13, струм петлі за умов зміни освітленості не зменшується суттєво, як умова послідовного дугового замикання. Таким чином, було перевірено, що запропонований метод є несприйнятливим до коливань освітленості в умовах хмарної погоди.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

Таким чином, запропонований метод має кілька значних переваг:

1. Без додаткового апаратного забезпечення: Метод успішно виявляє та гасить послідовну дугу без потреби в додаткових компонентах або складних апаратних рішеннях, що робить його більш економічним і зручним для інтеграції в існуючі фотоелектричні системи.

2. Стійкість до змін освітленості: Однією з ключових проблем у системах, що використовують сонячну енергію, є зміни освітленості, особливо за хмарних погодних умов. Проте, запропонований метод не піддається помилковим спрацьовуванням через ці зміни, забезпечуючи точне виявлення без хибних спрацьовувань.

3. Гарантована стабільність роботи: Рішення, запропоноване в дослідженні, забезпечує стабільну роботу фотоелектричної системи, що дозволяє уникнути збоїв і знижує ризики, пов'язані з дуговими замиканнями.

4. Підвищення енергетичної безпеки: Це рішення значно покращує рівень енергетичної безпеки об'єкта, оскільки дозволяє запобігати потенційно небезпечним ситуаціям, таким як пожежі або виходи з ладу системи, що може негативно вплинути на національну або локальну енергетичну інфраструктуру.

Враховуючи ці фактори, запропонований метод може бути важливим кроком до покращення безпеки та ефективності фотоелектричних систем, зокрема в умовах сучасних вимог до сталого енергетичного розвитку.

ВИСНОВКИ Й РЕКОМЕНДАЦІЇ

Основні висновки цього дослідження можна підсумувати таким чином:

1. Виявлення послідовної дуги: Після виникнення послідовної дуги вхідна напруга перетворювача залишається незмінною завдяки алгоритму MPPT, а вихідний струм фотоелектричної системи різко зменшується. На основі цього було запропоновано метод виявлення дуги, що ґрунтується на зміні струму.

2. Гасіння послідовної дуги: Дугу серії постійного струму важко стабільно підтримувати при низькому струмі дуги. Для вирішення цієї проблеми був запропонований метод гасіння дуги, який полягає в підвищенні цільової напруги алгоритму MPPT, що дозволяє ефективно зменшити ймовірність пожежі.

3. Інтеграція без додаткового обладнання: В порівнянні з традиційними методами виявлення дуги, запропоновані методи не вимагають додаткових компонентів або складного апаратного забезпечення, що робить їх економічно вигідними та зручними для інтеграції у стандартні фотоелектричні системи.

4. Підвищення енергетичної безпеки: Результати експериментів показали, що запропонований метод успішно виявляє та гасить послідовну дугу в низьковольтних фотоелектричних системах. Це підвищує рівень енергетичної безпеки об'єкта, що особливо важливо для запобігання несанкціонованим втратам енергії, зменшення ризику виникнення пожеж та збереження цілісності інфраструктури.

Це дослідження має потенціал для покращення якості та безпеки фотоелектричних систем, зокрема у контексті їх інтеграції в енергетичну інфраструктуру, а також сприяє розвитку технологій для більш ефективного управління енергетичними ризиками.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Суходоля О. М. Проблеми визначення сфери регулювання енергетичної безпеки. Стратегічні пріоритети. 2019. № 1. С. 5–17.
2. Суходоля О. М. Системний підхід в оцінюванні стану та цілепокладанні у сфері енергетичної безпеки. Стратегічна панорама. 2019. № 1-2. С. 58–72.
3. Про національну безпеку : Закон України від 21.06.2018 № 2469-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2469-19#Text> (дата звернення: 24.09.2021).
4. Енергетична безпека України: методологія системного аналізу та стратегічного планування : аналіт. доп. ; за заг. ред. О. М. Суходолі. Київ : НІСД, 2020. 178 с. URL: <https://niss.gov.ua/publikacii/analitichni-dopovidi/energetichna-bezpeka-ukraini> metodologiya-sistemnogo-analizu-ta
5. ISO 31000. Risk management / ISO. URL: <https://www.iso.org/iso-31000-riskmanagement.html> (дата звернення: 24.09.2021).
6. Конституція України : Конституція України; Верховна Рада України від 28.06.1996 № 254к/96-ВР // База даних «Законодавство України» / 45 Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/254%D0%BA/96-%D0%B2%D1%80>.
7. Закон України "Про національну безпеку України" від 21 червня 2018 р. № 2469-VIII.
8. Закон України "Про енергетику" від 16 жовтня 1997 р. № 575/97-ВР. 3. Закон України "Про ринок природного газу" від 09 квітня 2015 р. № 329-VIII.
9. Закон України "Про альтернативні види палива" від 14 січня 2000 р. № 1391-XIV.
10. Василенко В. О., Ліщинський В. І., Стеценко С. С. Паливноенергетична безпека України: проблеми та перспективи розвитку. Київ: Ніка-Центр, 2016.

11. Кравчук І. В. Енергетична безпека України: стан, проблеми та напрями забезпечення. Львів: Каменяр, 2019.
12. Nadтока Т. & Amelnytska О. (2010) Enerhetychna bezpeka pidpriemstva yak instrument zabezpechennia yoho staloho sotsialno-ekonomichnoho rozvytku [Energy security of the company as a tool for ensuring its sustainable socio-economic development]. Economics and management organization, vol. 2 (8), pp. 15–24.
13. Samborskyi V. (2014) Otsinka enerhetychnoi bezpeky pidpriemstva yak skladova yoho stratehii enerhetychnoi bezpeky [An assessment of the company's energy security as part of its energy security strategy]. Bulletin of the National Technical University "KhPI", vol. 34, pp. 166–171.
14. Energy security. International Energy Agency. URL: <http://www.iea.org/topics/energysecurity> (дата звернення: 04.02.2019).
15. Kapitula S., Shevchenko S. & Shpitko V. (2010) Metodychni pidkhody do otsinky enerhetychnoi bezpeky pidpriemstva [Methodical approaches to assessing the energy security of an enterprise]. Effective economy, vol. 8. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/efek_2010_8
16. Lozynska T. & Myrna O. (2011) Enerhetychna bezpeka miasopererobnykh pidpriemstv: pohliad kriz pryzmu upravlinskykh rishen [Energy security of meat processing enterprises: a look through the prism of managerial decisions]. Scientific works of the Poltava State Agrarian Academy, vol. 3 (2), pp. 19–24.
17. Pudychева Н. (2016) Enerhetychna bezpeka pidpriemstv v konteksti staloho rozvytku ekonomiky [Energy security of enterprises in the context of sustainable economic development]. Socio-Economic Research Bulletin, vol. 1 (60), pp. 179–185. 323 Випуск # 20 / 2019 ЕКОНОМІКА І СУСПІЛЬСТВОЮ
18. NKREKP (2013) Informatsiinyi biuleten NKREKR № 8 : za stanom na 27 serpnia 2013 r. [Newsletter of the NKREKR № 8: August 27, 2013], KyivЮ
19. Мельник Л. Г., Кіча О. М., Козак В. І. Енергетична стратегія України: сучасні виклики та шляхи реалізації. Київ: Інститут економіки та прогнозування НАН України, 2017.

20. Європейська енергетична співдружність: <https://www.energycommunity.org/>
21. Міністерство енергетики та вугільної промисловості України: <https://mev.gov.ua/>
22. Омельченко Володимир. Сектор відновлюваної енергетики України до, під час та після війни. Центр Разумкова. 2022. URL: <https://razumkov.org.ua/statti/sektor-vidnovlyuvanoyi-energetyky-ukrayiny-do-pidchas-ta-pislya-viyny>.
23. Про Концепцію діяльності органів виконавчої влади у забезпеченні енергетичної безпеки України : Постанова Кабінету Міністрів України від 19.01.1998 № 48 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/48-98-%D0%BF/>
24. Про нафту і газ : Закон України від 12.07.2001 № 2665-III URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2665-14>.
25. Про Національний план дій з енергоефективності на період до 2030 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України; План, Заходи від 12.2021 № 1803-р // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1803-2021-%D1%80>.
26. Про Національну комісію, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг : Закон України від 22.09.2016 № 1540-VIII // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1540-19>.
27. Про ринок електричної енергії : Закон України від 13.04.2017 № 2019-VIII URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2019-19>.
28. Про схвалення Концепції впровадження “розумних мереж” в Україні до 2035 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України; Концепція, План, Заходи від 14.10.2022 № 908-р // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/908-2022-%D1%80> .
29. Про схвалення Плану розвитку системи передачі на 2021-2030 роки : Постанова; Нацком.енергетики, ком.послуг від 20.01.2021 № 57 // База

- даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/v0057874-21>.
30. Паливно-енергетичний комплекс України на порозі третього тисячоліття [За заг. ред. А.К. Шидловського, М.П. Ковалка]. – К.: УЕЗ, – 2001. – 398 с.
 31. Сайт світової енергетичної ради [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу:
http://www.worldenergy.org/document/ethiopia_june_30_v_gbeddy_security.pdf.
 32. Міжнародне енергетичне агентство [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу:
http://www.iea.org/subjectetqueries/keyresult.asp?KEYWORD_ID=4103
 33. Микитенко В. В. На чому базується енергетична безпека держави/В.В. микитенко// Вісник НАН України. – 2005. - № 3. – С.41-47.
 34. Омельченко Володимир. Сектор відновлюваної енергетики України до, під час та після війни. Центр Разумкова. 2022. URL: <https://razumkov.org.ua/statti/sektor-vidnovlyuvanoyi-energetyky-ukrayiny-do-pidchas-ta-pislya-viyny>.
 35. Паливно-енергетичний комплекс України на порозі третього тисячоліття [За заг. ред. А.К. Шидловського, М.П. Ковалка]. – К.: УЕЗ, – 2001. – 398 с.
 36. Сайт світової енергетичної ради [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу:
http://www.worldenergy.org/document/ethiopia_june_30_v_gbeddy_security.pdf.
 37. Міжнародне енергетичне агентство [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу:
http://www.iea.org/subjectetqueries/keyresult.asp?KEYWORD_ID=4103
 38. Микитенко В. В. На чому базується енергетична безпека держави/В.В. микитенко// Вісник НАН України. – 2005. - № 3. – С.41-47.
 39. Державна служба статистики України. <http://www.ukrstat.gov.ua/>

40. BP Statistical Review of World Energy 2022.
<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statisticalreview-of-world-energy.html>
41. Lu, S.B.; Phung, B.T.; Zhang, D. A Comprehensive Review on DC Arc Faults and Their Diagnosis Method in Photovoltaic Systems. *Renew. Sust. Energy Rev.* 2018, 89, 88–98. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
42. Seo, G.S.; Kim, A.K.; Lee, K.C.; Lee, K.J.; Cho, B.H. A New DC Arc Fault Detection Method Using DC System Component Modeling and Analysis in Low Frequency Range. In Proceedings of the IEEE Conference on Applied Power Electronics Conference and Exposition, Charlotte, NC, USA, 15–19 March 2015; pp. 2438–2444. [[Google Scholar](#)]
43. *NFPA 70: National Electrical Code*; National Fire Protection Association: Quincy, MA, USA, 2011.
44. Shekhar, A.; Ramirez-Elizondo, L.; Bandyopadhyay, S.; Mackay, L.; Bauera, P. Detection of Series Arcs Using Load Side Voltage Drop for Protection of Low Voltage DC System. *IEEE Trans. Smart Grid* 2018, 9, 6288–6297. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
45. He, C.X.; Mu, L.H.; Wang, Y.J. The Detection of Parallel Arc Fault in Photovoltaic Systems Based on a Mixed Criterion. *IEEE J. Photovolt.* 2017, 7, 1717–1724. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
46. Strobl, C.; Meckler, P. Arc Faults in Photovoltaic System. In Proceedings of the 56th IEEE Conference Electrical Contacts, Charleston, SC, USA, 4–7 October 2010; pp. 1–7. [[Google Scholar](#)]
47. Georgijevic, N.L.; Jankovic, M.V.; Srdic, S.; Radakovic, Z. The Detection of Series Arc Fault in Photovoltaic Systems Based on the Arc Current Entropy. *IEEE Trans. Power Electron.* 2016, 31, 5917–5930. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

48. Lu, Q.W.; Ye, Z.Y.; Su, M.M.; Li, Y.S.; Sun, Y.C.; Huang, H.Q. A DC Series Arc Fault Detection Method Using Line Current and Supply Voltage. *IEEE Access* 2020, 8, 10134–10146. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
49. Ahmadi, M.; Samet, H.; Ghanbari, T. Series Arc Fault Detection in Photovoltaic Systems Based on Signal-to-Noise Ratio Characteristics Using Cross-Correlation Function. *IEEE Trans. Ind. Inform.* 2020, 16, 3198–3209. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
50. Ahmadi, M.; Samet, H.; Ghanbari, T. A New Method for Detecting Series Arc Fault in Photovoltaic Systems Based on the Blind-Source Separation. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2020, 67, 5041–5049. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
51. Amiri, A.; Samet, H.; Ghanbari, T. Recurrence Plots Based Method for Detecting Series Arc Faults in Photovoltaic Systems. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2022, 69, 6308–6315. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
52. Kavi, M.; Mishra, Y.; Vilathgamuwa, M. DC Arc Fault Detection for Grid-Connected Large-Scale Photovoltaic Systems. *IEEE J. Photovolt* 2020, 10, 1489–1502. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
53. Park, H.P.; Kim, M.; Chae, S.Y. Smart DC Optimizer for DC Series Arc Fault Detection and Extinguishing. *IEEE Trans. Power Electron.* 2022, 37, 10117–10121. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
54. Xia, K.; He, Z.H.; Yuan, Y.; Wang, Y.M.; Xu, P. An Arc Fault Detection System for the Household Photovoltaic Inverter According to the DC Bus Currents. In Proceedings of the 18th International Conference of Electrical Machines and Systems, Pattaya, Thailand, 25–28 October 2015; pp. 1687–1690. [[Google Scholar](#)]
55. Gao, Y.; Zhang, Y.; Sun, Y. An innovative photovoltaic DC arc fault detection method through multiple criteria algorithm based on a new arc initiation method. In Proceedings of the 40th Photovoltaic Specialists Conference, Denver, CO, USA, 8–13 June 2014; pp. 3188–3192. [[Google Scholar](#)]

56. Gu, J.C.; Lai, D.S.; Wang, J.M.; Huang, J.J.; Yang, M.T. Design of a DC Series Arc Fault Detector for Photovoltaic System Protection. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2019, 55, 2464–2471. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
57. Chae, S.Y.; Park, J.J.; Oh, S.S. Series DC Arc Fault Detection Algorithm for DC Microgrids Using Relative Magnitude Comparison. *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.* 2016, 4, 1270–1278. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
58. Xiong, Q.; Liu, X.J.; Feng, X.Y.; Gattozzi, A.L.; Shi, Y.H.; Zhu, L.Y.; Ji, S.C.; Hebner, R.E. Arc Fault Detection and Localization in Photovoltaic Systems Using Feature Distribution Maps of Parallel Capacitor Current. *IEEE J. Photovolt.* 2018, 8, 1090–1097. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
59. Xiong, Q.; Gattozzi, A.L.; Feng, X.Y.; Penney, E.C.; Ji, S.C.; Strank, S.M.; Hebner, R.E. Development of a Fault Detection and Localization Algorithm for Photovoltaic Systems. *IEEE J. Photovolt.* 2023; *in press*. [[Google Scholar](#)]
60. Miao, W.C.; Liu, X.Y.; Lan, K.H.; Pong, W.T. Arc-Faults Detection in PV Systems by Measuring Pink Noise with Magnetic Sensors. *IEEE Trans. Magn.* 2019, 55, 4002506–4002515. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
61. Fenz, W.G.; Thumfart, S.F.; Yatchak, R.; Roitner, H.; Hofer, B. Detection of Arc Faults in PV Systems Using Compressed Sensing. *IEEE J. Photovolt.* 2020, 10, 676–684. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
62. Artale, G.; Garavello, G.; Gataliotti, A. Characterization of DC series arc faults in PV systems based on current low frequency spectral analysis. *Measurement* 2021, 182, 109699–109711. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]