

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувача кафедри
електротехніки, електромеханіки
та електротехнологій

доц., к.т.н. /ОКУШКО О.В./
вчене звання і ступінь (підпис)
„_____” _____ 2026 р.
число місяць рік

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: **«Підвищення енергоефективності станції технічного
обслуговування інверторних систем»**

Спеціальність 141 „Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”

Гарант освітньої програми

к.т.н., доцент Синявський О.Ю.
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи

ст. викладач Кругляк Г.В.
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

Виконав _____ Маковійчук І.Р.
(підпис) (ПІБ)

КИЇВ – 2026

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
електротехніки, електромеханіки
та електротехнологій
доцент, к.т.н. /ОКУШКО О.В./
вчене звання і ступінь підпис

„_____” _____ 2025р.
число місяць рік

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи студенту

Маковійчук Ілля Романович

Спеціальність: 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Тема кваліфікаційної бакалаврської роботи: «Підвищення енергоефективності станції технічного обслуговування інверторних систем».

затверджена наказом ректора НУБіП України від «30» жовтня 2025 р. № 2607 „С”.

Термін подання завершеного проєкту на кафедру 2026.06.01
(рік, місяць, число)

Вихідні дані:

Перелік вихідних матеріалів:

1. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ).
2. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок.
3. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів.
4. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів.
5. Правила роздрібного ринку електричної енергії.
6. ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення».
7. ДБН В.2.5-23:2010 «Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення».
8. Технічні характеристики інверторного обладнання, датчиків струму, напруги, температури та елементів захисту.
9. Структурна схема гібридної системи електроживлення підприємства.

Перелік питань, які потрібно розробити:

1. Загальна характеристика підприємства та аналіз експлуатації інверторного обладнання.
2. Технологічна частина роботи гібридної системи електроживлення.
3. Електротехнічна частина з розрахунком параметрів інвертора, освітлення, захисту та вимірювальних каналів.

4. Розробка приладового комплексу діагностики інверторних систем
5. Заходи щодо підвищення енергоефективності та надійності роботи інверторного обладнання.
6. Охорона праці та безпека експлуатації електроустановок.

Перелік графічних документів:

1. Структурна схема гібридної системи електроживлення підприємства.
2. Принципова схема силової частини інверторної системи з приладовим комплексом діагностики.
3. Схема підключення датчиків струму, напруги та температури до приладового комплексу.
4. План розміщення електрообладнання, освітлення та елементів захисту.

Дата видачі завдання 31.10.2025 р.

Керівник кваліфікаційної бакалаврської роботи

ст. викладач

Кругляк Г.В.

(науковий ступінь та вчене звання) (підпис)

(ПІБ)

Виконав

Маковійчук І.Р.

(підпис)

(ПІБ)

№ р я д к а	Формат	Позначення	Найменування	К- сть арку шів	№ Прим ітки	При мітка
1 1	AA 4	02.02-КР.2607«С».2025.10.30.014.ПЗ	Пояснювальна записка	82		
2	A4	02.02-КР.2607«С».2025.10.30.014.ЕЗ	.Принципова схема силовій частини інверторної системи з приладовим комплексом діагностики	1		
3	A4	02.02-КР.2607«С».2025.10.30.014.ЕЗ	Принципова електрична схема робочого та аварійного освітлення	1		
4	A4	02.02-КР.2607«С».2025.10.30.014.ЕЗ	Електрична схема системи керування електроприводом загальнообмінної вентиляції сервісної зони силова частина	1		
5	A4	02.02-КР.2607«С».2025.10.30.014.ЕЗ	Електрична схема системи керування електроприводом загальнообмінної вентиляції сервісної зони коло керування	1		
6	A4	02.02-КР.2607«С».2025.10.30.014.ТБ	Перелік елементів принципової електричної схеми керування приводом вентилятора	1		
7	A4	02.02-КР.2607«С».2025.10.30.014.ТБ	Результати розрахунку робочих електричних параметрів	1		

					02.02 -КР.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<u>Пояснювальна записка</u>			Лім.	Арк.	Акрушіє	
Розробив		Маковійчук І. Р.								5	82
Перевірів		Кругляк Г. М.						ННІ ЕАіЕ ЕЕ-220016			
Затвердив		Окунько О. В.									
Н. Контр.		Коробський В.В.									

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТА СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ДІАГНОСТИКИ.....	11
1.1 Характеристика підприємства.....	11
1.2 Архітектура гібридних систем електроживлення	13
1.3 Класифікація основних видів відмов у силових інверторах	15
1.4 Постановка завдання	19
РОЗДІЛ 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	21
2.1 Загальний опис технологічного процесу об'єкта дослідження.....	21
2.2 Технологічна схема роботи інверторної системи.....	24
2.3 Вибір технологічного обладнання	26
2.4 Вибір обладнання та контрольних точок для діагностування інверторної системи	29
2.5 Організація технологічного процесу експлуатації та технічного обслуговування	32
2.6 Обґрунтування прийнятого технологічного рішення	35
РОЗДІЛ 3 ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА	37
3.1 Вихідні дані для електротехнічного розрахунку	37
3.2 Розрахунок робочих струмів, потужностей і втрат інвертора	38
3.3 Розрахунок вимірювальних каналів приладового комплексу.....	40
3.4 Розрахунок і вибір апаратів керування, комутації та захисту.....	41

					02.02 -КР.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

3.5 Розрахунок і силової електропроводки та падіння напруги.....	42
3.6 Розрахунок вентиляції шафи інверторного обладнання.....	43
3.7 Розрахунок електричного освітлення приміщення обслуговування	44
3.8 Принципова схема силової частини інверторної системи.....	45
3.9 Розрахунок електропривода загально обмінної вентиляціїсервісної зони	47
3.10 Захист і керування електродвигуном вентилятора.....	48
3.11 Побудова механічної характеристики електродвигуна приводу вентилятора	49
РОЗДІЛ 4 СПЕЦІАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ	53
4.1 Методика перевірки працездатності приладового комплексу	53
4.2 Перевірка точності вимірювання електричних і теплових параметрів	55
4.3 Оцінювання роботи алгоритму виявлення передвідмовних станів інвертора..	57
4.4 Аналіз ефективності впровадження комплексу на підприємстві	60
Висновки до розділу 4.....	63
РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПРИЛАДОВОГО КОМПЛЕКСУ	64
5.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів під час експлуатації інверторних систем.....	64
5.2 Вимоги електробезпеки під час обслуговування інверторного обладнання	66
5.3 Пожежна безпека під час експлуатації інверторних систем	67
5.4 Організаційні заходи безпечного виконання робіт	69
Висновки до розділу 5.....	71
ВИСНОВКИ	72
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	74
ДОДАТКИ	77

					02.02 -КР.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

ВСТУП

Одним із ефективних підходів до підвищення енергетичної стійкості є впровадження гібридних систем електроживлення, які поєднують відновлювані джерела енергії, акумуляторні батареї та централізовану електричну мережу. Такі системи забезпечують резервування живлення, оптимізацію енергоспоживання та підвищення автономності об'єкта в умовах нестабільної роботи енергосистеми.

Функціональною основою гібридних систем є інверторні перетворювачі, що здійснюють узгодження параметрів електричної енергії між джерелами різної природи та навантаженням. Інвертори працюють у складних режимах, що характеризуються змінними навантаженнями, імпульсними струмами та підвищеними тепловими впливами. Це призводить до деградації елементної бази, зокрема силових напівпровідникових модулів (IGBT), електролітичних конденсаторів ланки постійного струму та систем охолодження, що в кінцевому результаті знижує надійність роботи всієї енергетичної системи.

Існуючі підходи до технічного обслуговування інверторних систем переважно базуються на регламентних роботах або усуненні наслідків відмов. Такий підхід не забезпечує своєчасного виявлення передвідмовних станів і не дозволяє оцінювати технічний стан обладнання в динаміці. Відсутність засобів безперервного контролю параметрів, таких як форма вихідної напруги, рівень гармонічних спотворень, пульсації в ланці постійного струму та температурні режими, ускладнює діагностику та підвищує ризик аварійних ситуацій і простоїв виробництва.

Особливістю гібридних систем є необхідність комплексного аналізу не лише інвертора, але й взаємодії з акумуляторними батареями, системами генерації та зовнішньою мережею. Зокрема, для оцінки технічного стану системи необхідно враховувати параметри акумуляторів (ступінь заряду та деградації),

					02.02 -КР.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

режими енергопотоків, а також вплив інвертора на якість електроенергії в мережі підприємства.

У зв'язку з цим **актуальним** є створення приладового комплексу, що забезпечує вимірювання електричних і теплових параметрів, їх обробку та аналіз з метою виявлення відхилень від нормальних режимів роботи. Використання мікропроцесорних засобів обробки сигналів дозволяє реалізувати алгоритми діагностики в реальному часі, а застосування сучасних інтерфейсів обміну даними - інтегрувати комплекс у загальну систему контролю підприємства.

Додатковою функціональною можливістю є інтеграція приладового комплексу з IoT-інфраструктурою шляхом передачі діагностичних даних у хмарне середовище з використанням протоколу MQTT. Це забезпечує віддалений моніторинг, централізований збір інформації та створює передумови для реалізації предиктивної діагностики інверторних систем.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка та обґрунтування структури програмно-апаратного приладового комплексу для моніторингу параметрів, виявлення передвідмовних станів та діагностики несправностей інверторних систем у складі гібридних електроенергетичних установок підприємства.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

1. виконати аналіз архітектури гібридних систем електроживлення та режимів роботи інверторів;
2. дослідити основні види відмов силових елементів і причини їх виникнення;
3. проаналізувати методи діагностики технічного стану інверторних систем;
4. обґрунтувати вибір сенсорного та мікропроцесорного забезпечення приладового комплексу;
5. розробити структурну схему системи вимірювання та обробки даних;
6. реалізувати алгоритми контролю електричних і теплових параметрів;

					02.02 -КР.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

7. забезпечити передачу діагностичних даних з використанням сучасних протоколів обміну.

Об'єктом дослідження є гібридні системи електроживлення промислових підприємств.

Предметом дослідження є методи та засоби технічної діагностики інверторних систем на основі приладових комплексів із використанням мікропроцесорної техніки.

Практична значущість отриманих результатів полягає у розробці приладового комплексу, який забезпечує контроль параметрів роботи інверторних систем, виявлення передвідмовних станів та підвищення надійності електропостачання підприємства. Реалізація запропонованого підходу дозволяє зменшити кількість аварійних відмов, скоротити час простоїв обладнання та підвищити ефективність технічного обслуговування.

					02.02 -КР.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТА СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ДІАГНОСТИКИ

1.1 Характеристика підприємства

Як базовий об'єкт дослідження доцільно розглядати ТОВ «Вишгородська сонячна електростанція», що функціонує у Вишгородському районі Київської області. Підприємство є учасником українського ринку відновлюваної енергетики та експлуатує наземну сонячну електростанцію, введену в експлуатацію у 2020 році, із встановленою потужністю 8,95 МВт. Такий об'єкт є показовим для дослідження інверторних систем, оскільки його основна виробнича функція безпосередньо пов'язана з перетворенням, передачею та контролем параметрів електричної енергії.

За функціональним призначенням підприємство належить до електроенергетичних об'єктів, у яких технологічний процес базується на безперервному перетворенні енергії сонячного випромінювання в електричну енергію з подальшим перетворенням її параметрів до вимог мережі. Ключовою ланкою такого процесу є інверторне обладнання, оскільки саме інвертор здійснює перетворення постійного струму в змінний, формує вихідну напругу потрібної форми та забезпечує роботу електростанції в узгодженні з мережею. Для мережевих енергетичних систем сучасний інвертор також виконує функції комунікації, моніторингу та взаємодії із засобами керування.

З технічної точки зору підприємство такого типу характеризується наявністю кількох взаємопов'язаних підсистем: фотогенерувального поля, силового інверторного перетворення, комутаційного та трансформаторного обладнання, систем вимірювання, локального диспетчерського контролю і каналів віддаленого моніторингу. Для стабільної експлуатації необхідним є безперервний контроль електричних параметрів, зокрема напруги, струму,

					02.02 -КР.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

потужності, частоти, температурних режимів та показників якості електроенергії. За рекомендаціями IEA PVPS, для достовірного моніторингу фотоелектричних систем доцільно застосовувати не лише вбудовані вимірювання інвертора, а й окремі енергометри та засоби вимірювання потужності або струму на відповідних рівнях структури станції.

Особливістю підприємства є висока залежність його виробничої ефективності від технічного стану силової електроніки. Для електростанцій фотоелектричного типу інверторні вузли є критичними елементами, від працездатності яких залежать енергетична віддача, стійкість режимів роботи та виконання вимог до якості електроенергії. NREL відзначає, що сучасна потужна фотоелектрична станція є складною системою, що включає великі масиви панелей та множину силових інверторів, а одним із ключових викликів для таких систем залишається саме надійність PV-інверторів. Це обґрунтовує доцільність розроблення спеціалізованого приладового комплексу, орієнтованого на раннє виявлення деградаційних процесів і відхилень у роботі інверторного обладнання.

Отже, ТОВ «Вишгородська сонячна електростанція» є технічно обґрунтованим прикладом підприємства для даної кваліфікаційної роботи, оскільки поєднує характерні ознаки сучасного енергетичного об'єкта: використання силових інверторів, потребу в безперервному моніторингу, залежність від точності вимірювання параметрів та вимоги до високої експлуатаційної надійності. Саме для таких умов актуальним є створення програмно-апаратного приладового комплексу, здатного виконувати контроль електричних і теплових параметрів, фіксувати передвідмовні стани та підтримувати прийняття рішень щодо технічного обслуговування інверторних систем.

					02.02 -КР.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2 Архітектура гібридних систем електроживлення

Гібридні системи електроживлення є складними електротехнічними комплексами, що забезпечують інтеграцію різнорідних джерел енергії та споживачів у єдину енергетичну інфраструктуру підприємства. Їх архітектура базується на поєднанні відновлюваних джерел (фотоелектричних модулів), акумуляторних батарей та централізованої електричної мережі з використанням силових перетворювальних пристроїв і систем керування.

Структурно гібридна система електроживлення складається з трьох основних рівнів: енергетичного (DC та AC контури), рівня силового перетворення та рівня керування і моніторингу. У межах DC-контур реалізується взаємодія джерел постійного струму, зокрема фотоелектричних панелей і акумуляторних батарей, через вузли узгодження, що включають MPPT-контролери та двонапрямні DC/DC-перетворювачі. Це забезпечує оптимізацію процесів генерації, накопичення та відбору енергії залежно від режиму роботи системи.

Силове перетворення здійснюється гібридним інвертором, який виконує функції перетворення DC/AC, AC/DC та синхронізації з мережею. Інвертор забезпечує формування вихідної напруги заданої якості, керування потоками енергії між джерелами та навантаженням, а також реалізацію режимів автономної та паралельної роботи з мережею.

АС-контур включає систему розподілу електроенергії, вузол підключення до зовнішньої мережі, а також споживачів, які поділяються на критичні та некритичні. Додатково в цьому контурі використовуються засоби контролю якості електроенергії, що дозволяють оцінювати гармонічні спотворення, напругу, частоту та інші параметри.

На рис. 1.1 наведено узагальнену структурну схему гібридної системи електроживлення, яка відображає взаємозв'язки між основними

					02.02 -КР.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

функціональними блоками, потоками енергії та інформаційними каналами керування.

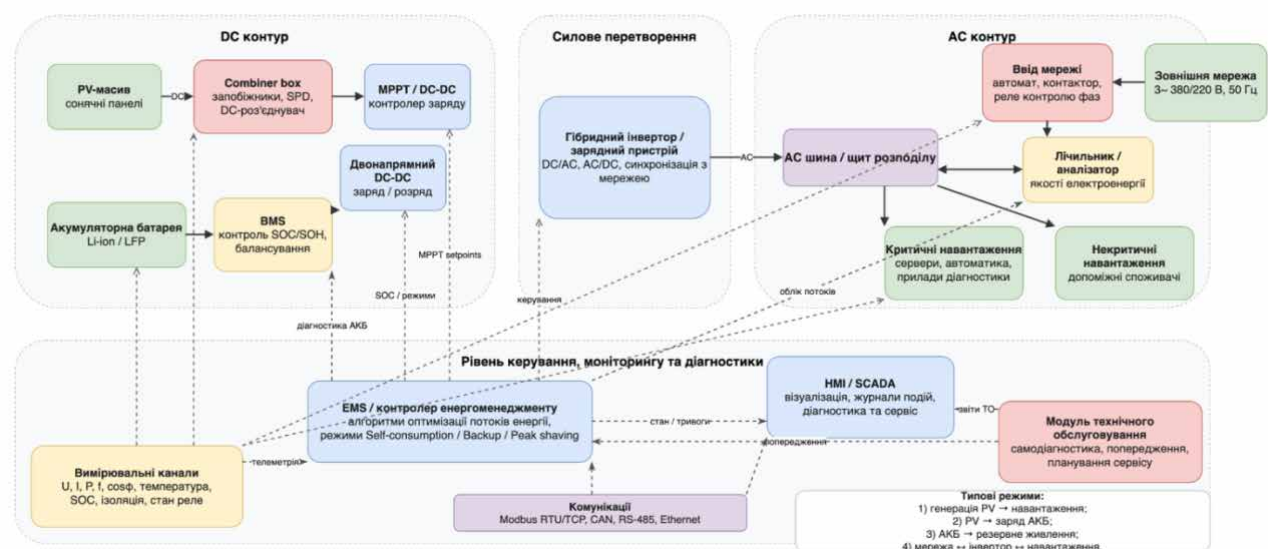


Рис.1.1. Структурна схема гібридної системи електроживлення підприємства

Важливою складовою архітектури є рівень керування, моніторингу та діагностики, що реалізується за допомогою контролера енергоменеджменту (EMS), систем візуалізації (HMI/SCADA) та комунікаційних інтерфейсів. Даний рівень забезпечує збір телеметричних даних, керування режимами роботи системи (self-consumption, backup, peak shaving), а також взаємодію з приладовими комплексами діагностики.

Особливістю гібридних систем є необхідність синхронізації енергетичних і інформаційних потоків. Це досягається шляхом використання стандартних промислових протоколів обміну даними (Modbus, CAN, RS-485, Ethernet), що забезпечують інтеграцію всіх компонентів у єдину систему.

Основні функціональні елементи гібридної системи та їх призначення наведено в табл. 1.1.

Як видно з табл. 1.1, кожен елемент виконує визначену функцію в загальній структурі системи, що забезпечує її комплексну роботу.

Основні компоненти гібридної системи електроживлення

Компонент	Функціональне призначення
PV-масив	Генерація електроенергії постійного струму
Акумуляторна батарея	Накопичення енергії та забезпечення резервного живлення
MPPT-контролер	Оптимізація режиму роботи PV-масиву
DC/DC-перетворювач	Узгодження рівнів напруги та керування зарядом/розрядом
Гібридний інвертор	Перетворення енергії та керування потоками

Таким чином, архітектура гібридних систем електроживлення характеризується багаторівневою структурою, інтеграцією силових та інформаційних підсистем і наявністю складних алгоритмів керування енергетичними потоками. Це зумовлює необхідність застосування спеціалізованих приладових комплексів для моніторингу та діагностики, здатних забезпечити контроль ключових параметрів і підвищити надійність функціонування системи в умовах промислової експлуатації.

1.3Класифікація основних видів відмов у силових інверторах

Надійність силових інверторів визначається стабільністю параметрів їх силових та пасивних елементів у процесі тривалої експлуатації. В умовах промислового використання інвертори працюють під впливом змінних навантажень, імпульсних режимів та теплових перевантажень, що призводить до виникнення відмов різної фізичної природи. З урахуванням структури інвертора та характеру деградаційних процесів доцільно виділити три основні групи відмов: пробій силових напівпровідникових ключів, деградація елементів ланки постійного струму та теплові відмови.

На рис. 1.2 наведено класифікацію основних видів відмов силового інвертора з урахуванням причин їх виникнення, діагностичних ознак і наслідків.



Рис. 1.2. Класифікація основних видів відмов силового інвертора

Пробій силових ключів (IGBT) належить до аварійних відмов, що мають імпульсний характер і призводять до миттєвої втрати працездатності інвертора. Основними причинами є короткі замикання в навантаженні, комутаційні перенапруги, некоректні сигнали керування затвором та порушення часових інтервалів перемикання (dead-time). У процесі розвитку відмови спостерігаються різкі струмові імпульси, десатурація ключа, асиметрія фаз або відсутність комутації. Наслідком є руйнування силового модуля, виникнення короткого замикання в DC-ланці та спрацювання аварійного захисту.

Деградація електролітичних конденсаторів ланки постійного струму має поступовий характер і визначається фізико-хімічними процесами старіння електроліту. Основними причинами є підвищений рівень пульсацій струму (ripple current), тривала робота при підвищених температурах і перевищення допустимих напруг. Це призводить до зменшення ємності та зростання еквівалентного послідовного опору (ESR). Як показано на рис. 1.3, деградація

конденсаторів супроводжується збільшенням пульсацій напруги DC-шини, що є одним із ключових діагностичних параметрів.

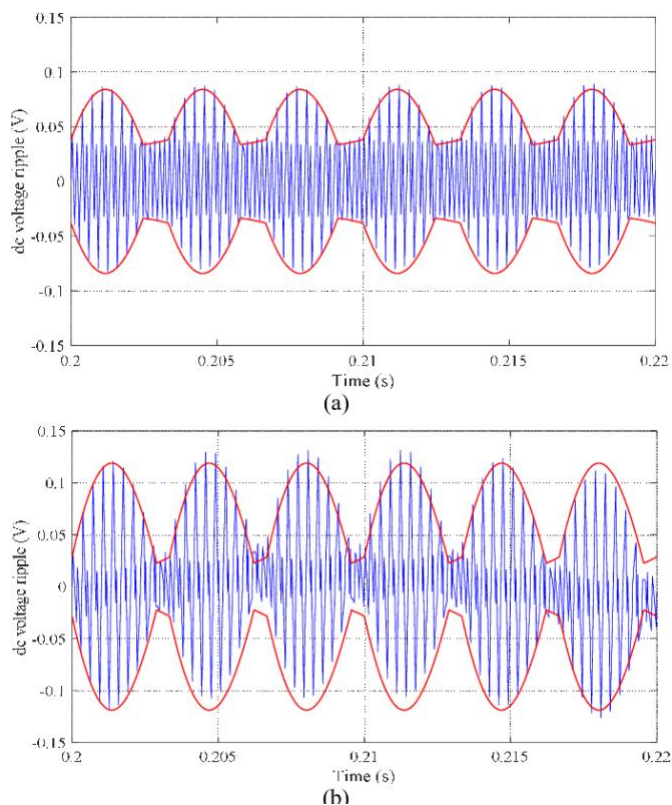


Рис. 1.3. Осцилограми напруги DC-ланки інвертора при нормальному стані та деградації конденсаторів

Збільшення пульсацій напруги призводить до погіршення умов роботи силових ключів, додаткових втрат потужності та підвищення теплового навантаження. У результаті виникає нестабільність роботи інвертора та скорочується ресурс елементної бази.

Перегрів елементів інвертора є наслідком як електричних перевантажень, так і порушення умов тепловідведення. Основними причинами є перевищення номінального навантаження, недостатня ефективність системи охолодження, забруднення радіаторів або відмова вентиляторів. Температура силових елементів має нелінійну залежність від часу та режиму навантаження, що при критичних значеннях призводить до теплового руйнування.

Характерними ознаками перегріву є підвищення температури радіаторів і напівпровідникових кристалів, часте спрацювання теплового захисту та перехід інвертора в режим зниження потужності (derating). Наслідками є прискорене старіння матеріалів, деградація паяних з'єднань та виникнення вторинних відмов.

Зміна технічного стану інвертора також впливає на його енергетичні характеристики. Як видно з рис. 1.5, зниження ефективності перетворення може бути індикатором деградаційних процесів у силових елементах та пасивних компонентах.

Класифікація відмов силових інверторів базується на аналізі фізичних механізмів деградації та експлуатаційних режимів роботи. Визначення характерних діагностичних ознак, зокрема пульсацій напруги, температурних режимів і струмових перевантажень, створює основу для розробки приладових комплексів моніторингу та діагностики, здатних забезпечити своєчасне виявлення передвідмовних станів і підвищення надійності функціонування інверторних систем.

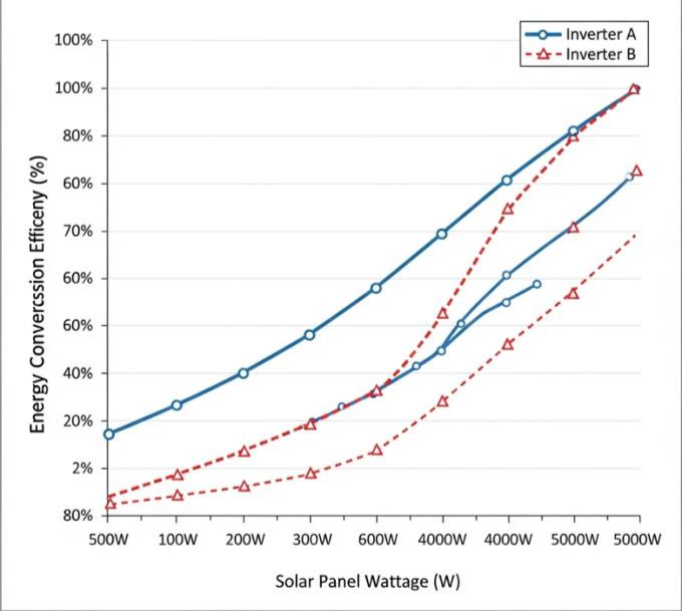


Рис. 1.5. Залежність коефіцієнта корисної дії інвертора від навантаження

Основні характеристики розглянутих видів відмов узагальнено в табл. 1.2.

Класифікація та характеристики відмов силових інверторів

Вид відмови	Основні причини	Діагностичні ознаки	Наслідки
Пробій IGBT	КЗ, перенапруги, помилки керування	Струмові імпульси, асиметрія фаз	Руйнування модуля, аварійне вимкнення
Деградація конденсаторів	Високий ripple, температура, старіння	Зростання ESR, пульсації DC, просідання напруги	Нестабільність, перегрів ключів
Перегрів	Перевантаження, відмова охолодження	Зростання температури	Старіння, вторинні відмови

1.4 Постановка завдання

Необхідно розробити приладовий комплекс для технічного обслуговування та діагностики інверторних систем підприємства, який забезпечує вимірювання електричних і теплових параметрів, обробку результатів вимірювання, виявлення відхилень від допустимих режимів роботи та формування діагностичних повідомлень.

У межах роботи потрібно:

- визначити перелік контрольованих параметрів інверторної системи;
- обґрунтувати вибір датчиків струму, напруги та температури;
- розробити структурну схему приладового комплексу;
- вибрати мікроконтролерний засіб для збору та обробки даних;
- розробити алгоритм контролю технічного стану інвертора;
- реалізувати індикацію попереджувальних і аварійних режимів;
- забезпечити передавання діагностичних даних до системи верхнього рівня;
- оцінити можливість використання комплексу в умовах підприємства.

До контрольованих параметрів доцільно віднести вхідну та вихідну напругу, струм навантаження, потужність, температуру силових елементів,

					02.02 -КР.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

температуру радіатора, пульсації напруги DC-ланки, а також стан системи охолодження. На основі цих параметрів має виконуватися виявлення перевантаження, перегріву, погіршення режиму роботи DC-ланки та інших ознак передвідмовного стану.

Вхідними даними приладового комплексу є сигнали з вимірювальних перетворювачів струму, напруги й температури та службові сигнали стану інвертора. Вихідними даними є поточні значення контрольованих параметрів, повідомлення про перевищення допустимих меж, сигнали попередження та аварії, а також дані для подальшої реєстрації і моніторингу.

У результаті виконання роботи має бути розроблено приладовий комплекс, який підвищує надійність експлуатації інверторних систем, зменшує ризик аварійних відмов і забезпечує підвищення ефективності технічного обслуговування обладнання.

					02.02 -КР.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1 Загальний опис технологічного процесу об'єкта дослідження

Технологічна частина кваліфікаційної роботи розкриває виробничий процес, у межах якого використовується інверторне обладнання, та визначає місце приладового комплексу діагностики в загальній структурі експлуатації гібридної системи електроживлення. Базовим об'єктом прийнято підприємство енергетичного профілю, що експлуатує фотоелектричну станцію з інверторними перетворювачами, комутаційними пристроями, засобами вимірювання, системою локального моніторингу та каналами передавання даних на верхній рівень керування.

Основний технологічний процес полягає у перетворенні енергії сонячного випромінювання в електричну енергію постійного струму, її узгодженні за напругою та струмом, перетворенні в трифазну змінну напругу промислової частоти, передаванні через комутаційні апарати і розподільні пристрої до мережі або до внутрішніх споживачів підприємства. У такому процесі інвертор виконує роль центральної технологічної машини, оскільки саме він забезпечує формування змінної напруги, синхронізацію з мережею, захист від аварійних режимів і підтримання допустимих показників якості електроенергії.

Для гібридної системи електроживлення характерним є поєднання кількох джерел та накопичувачів енергії. До її складу входять фотоелектричний масив, акумуляторна батарея або резервний накопичувач, DC/DC-перетворювачі, інверторний перетворювач, АС-шина, комутаційне обладнання, засоби захисту, контролер енергоменеджменту та система диспетчерського нагляду. Така структура дає змогу працювати як у мережевому режимі, так і в режимі резервного живлення критичних споживачів. Водночас складність

					02.02 -КР.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

взаємодії між джерелами, накопичувачем, інвертором і мережею підвищує вимоги до технологічного контролю стану обладнання.

У нормальному режимі роботи фотоелектричні модулі формують постійну напругу, яка надходить до вузлів DC-захисту та далі на вхід інвертора. Інвертор перетворює постійний струм у змінний, підтримує задану частоту 50 Гц, контролює форму вихідної напруги та виконує автоматичне вимкнення за наявності небезпечних відхилень. У разі нестачі генерації або появи пікових навантажень частина енергії може надходити від акумуляторної батареї, а в разі надлишку генерації накопичувач заряджається через відповідний перетворювач.

Технологічний процес експлуатації інверторної системи не обмежується лише перетворенням енергії. Він включає підготовку обладнання до роботи, перевірку комутаційних апаратів, контроль стану DC-ланки, контроль температури силових елементів, спостереження за параметрами вихідної напруги, реєстрацію аварійних подій і виконання технічного обслуговування. Саме тому розроблюваний приладовий комплекс розглядається як елемент технологічної інфраструктури, що забезпечує безперервне отримання діагностичних даних і підтримує рішення персоналу щодо обслуговування інверторного обладнання.

Особливу увагу в технологічній частині приділено не розрахунку електричних режимів, а опису послідовності виробничих операцій і вибору обладнання, необхідного для сталої роботи об'єкта. Електротехнічні розрахунки струмів, напруг, теплових режимів, вимірювальних каналів і елементів захисту доцільно виконувати в наступному розділі. У цьому розділі формується технологічна основа: визначається, яке обладнання бере участь у процесі, які операції виконуються та в яких точках необхідний контроль параметрів.

					02.02 -КР.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Основні етапи технологічного процесу гібридної системи електроживлення

Етап	Зміст технологічної операції	Основне обладнання	Параметри контролю
1. Генерація	Перетворення сонячного випромінювання в електроенергію постійного струму	PV-модулі, стрінгові лінії, DC-з'єднувачі	Напруга стрінга, струм стрінга, стан ізоляції
2. Узгодження DC-контур	Комутація, захист і стабілізація параметрів ланки постійного струму	DC-щит, запобіжники, роз'єднувачі, обмежувачі перенапруг	U_DC, I_DC, пульсації DC-ланки
3. Перетворення DC/AC	Формування трифазної змінної напруги з параметрами, придатними для мережі	Гібридний або мережевий інвертор	U_AC, I_AC, f, cosφ, температура модуля
4. Розподіл AC-енергії	Передавання енергії до споживачів або мережі через захисні апарати	АС-щит, автоматичні вимикачі, контактори, лічильники	Струм навантаження, потужність, спрацювання захисту
5. Моніторинг і діагностика	Збір параметрів, фіксація подій, формування попереджень і аварійних повідомлень	Приладовий комплекс, EMS, HMI/SCADA, канал зв'язку	Температура, перевантаження, стан вентиляції, журнал подій

Наведена послідовність показує, що інверторна система є не ізольованим електронним пристроєм, а технологічним вузлом, який взаємодіє з DC-контуром, AC-розподілом, накопичувачем енергії, засобами захисту та диспетчерським рівнем. Тому вибір обладнання для такого об'єкта повинен враховувати не лише номінальну потужність, а й можливість контролю параметрів, доступність сервісного обслуговування та здатність працювати у змінних режимах навантаження.

2.2 Технологічна схема роботи інверторної системи

Технологічна схема роботи інверторної системи відображає взаємодію енергетичних та інформаційних потоків. Енергетичний потік проходить від фотоелектричних модулів або акумуляторної батареї до інверторного перетворювача, далі через АС-шину до електричної мережі або споживачів. Інформаційний потік формується датчиками, контролером інвертора, приладовим комплексом діагностики та системою моніторингу верхнього рівня. Узагальнена схема наведена на рис. 2.1.

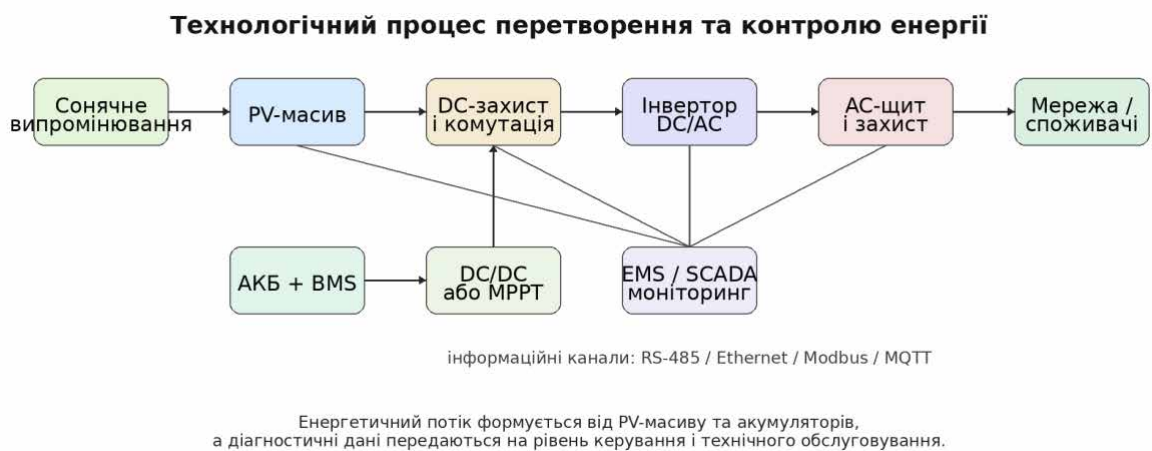


Рис. 2.1 Технологічна схема перетворення та контролю енергії в гібридній системі

Як видно з рис. 2.1, інверторна система має два взаємопов'язані контури. Перший контур є силовим і включає PV-масив, DC-захист, інвертор, АС-щит та підключення до мережі або споживачів. Другий контур є інформаційним і забезпечує облік, діагностування та керування режимами роботи. У разі використання акумуляторної батареї до системи додається двонапрямний перетворювач і BMS, що контролює напругу, струм, температуру та стан заряду накопичувача.

У мережевому режимі інвертор синхронізується з параметрами зовнішньої мережі, підтримує потрібну форму напруги і передає енергію

					02.02 -КР.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відповідно до доступної генерації та поточного навантаження. У режимі власного споживання пріоритет надається живленню внутрішніх споживачів підприємства. У резервному режимі живлення критичних споживачів підтримується від акумуляторної батареї, а інвертор працює як автономне джерело змінної напруги. У режимі заряджання накопичувача частина енергії спрямовується на акумуляторну батарею, що потребує контролю струму заряду, температури та стану BMS.

Таблиця 2.2.

Характеристика основних технологічних режимів роботи інверторної системи

Режим	Технологічна сутність режиму	Ознаки нормальної роботи	Можливі ризики
Мережевий	Передавання енергії від PV-масиву через інвертор до АС-шини та мережі	Стабільні U_{AC} і f , допустимий струм, відсутність перегріву	Перенапруга мережі, гармонічні спотворення, спрацювання захисту
Власне споживання	Живлення внутрішніх споживачів підприємства з пріоритетом локальної генерації	Плавна зміна потужності, відсутність перевантаження	Різкі піки навантаження, зниження ККД інвертора
Резервне живлення	Підтримання критичних споживачів від акумуляторної батареї	Стабільна робота BMS, допустимий струм розряду	Глибокий розряд, перегрів батареї, нестача резерву
Заряджання АКБ	Спрямування частини енергії на накопичувач через перетворювач	Контроль струму заряду і температури	Перезаряд, перегрів, помилки BMS
Derating	Автоматичне зниження потужності для захисту інвертора	Зменшення потужності без аварійного вимкнення	Недостатнє охолодження, забруднення радіатора, старіння вентилятора
Аварійний	Вимкнення інвертора або силового каналу через небезпечне відхилення	Коректна фіксація аварії та блокування повторного запуску	Руйнування силових ключів, коротке замикання, простій обладнання

Для технологічного процесу важливими є також перехідні та передаварійні режими. До них належать різке зростання навантаження, підвищення температури силових модулів, збільшення пульсацій напруги DC-ланки, зниження ефективності охолодження, короточасні перенапруги, асиметрія фаз та часте спрацювання внутрішніх захистів інвертора. Саме в цих

режимах приладовий комплекс має забезпечувати ранню фіксацію відхилень, щоб персонал міг виконати обслуговування до розвитку повної відмови.

З урахуванням наведених режимів технологічна схема повинна забезпечувати не тільки енергетичне перетворення, а й контроль причин переходу між станами. Для цього в системі діагностики доцільно передбачити розділення повідомлень на інформаційні, попереджувальні та аварійні. Інформаційні повідомлення фіксують звичайні зміни режиму, попереджувальні вказують на наближення параметрів до допустимих меж, а аварійні потребують негайного реагування або автоматичного вимкнення обладнання.

2.3 Вибір технологічного обладнання

Вибір технологічного обладнання виконується з урахуванням призначення об'єкта, режимів роботи інверторної системи, вимог до надійності, можливості інтеграції з системою моніторингу та умов експлуатації. Для підприємства з фотоелектричною генерацією основними групами обладнання є PV-модулі, DC-комутаційні пристрої, інверторні перетворювачі, акумуляторна батарея з BMS, AC-розподільчі пристрої, засоби вимірювання, системи зв'язку та елементи тепловідведення.

Ключовим елементом технологічного процесу є інвертор. Для розрахункового модуля приладового комплексу доцільно прийняти трифазний інвертор потужністю 10 кВт з вихідною лінійною напругою 380 В, напругою DC-ланки близько 600 В, коефіцієнтом корисної дії не нижче 0,96 і можливістю передавання даних через промисловий інтерфейс. Такий типорозмір є зручним для обґрунтування вимірювальних каналів, вибору датчиків і моделювання аварійних та передвідмовних режимів у межах кваліфікаційної роботи.

Для PV-масиву важливими критеріями вибору є номінальна потужність модулів, діапазон робочої напруги, температурний коефіцієнт, механічна міцність і відповідність умовам зовнішньої експлуатації. Оскільки

					02.02 -КР.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

фотоелектричні модулі працюють у змінних погодних умовах, їх вихідні параметри суттєво залежать від освітленості та температури. Це потребує використання МРРТ-алгоритмів, які забезпечують роботу масиву в точці максимальної потужності.

DC-частина системи повинна містити засоби комутації та захисту: стрінгові запобіжники, DC-роз'єднувачі, обмежувачі перенапруг, клемні з'єднання та кабельні лінії з відповідною ізоляцією. Таке обладнання необхідне для безпечного від'єднання окремих стрінгів, виконання технічного обслуговування і захисту інвертора від небезпечних перенапруг або коротких замикань у DC-контурі.

АС-частина включає автоматичні вимикачі, контактори, пристрої захисного відключення, лічильники електроенергії, вимірювальні трансформатори або перетворювачі струму, а також апаратуру для підключення до розподільного щита підприємства. При виборі цих елементів враховуються номінальні струми, здатність вимикання короткого замикання, категорія перенапруги, умови монтажу та доступність для оперативного обслуговування.

Вибір наведеного обладнання дає змогу сформувати технологічно завершену систему, у якій енергетичні потоки узгоджені із засобами контролю та захисту. Для подальшого розрахунку електротехнічної частини найбільш важливими є параметри інвертора, DC-ланки, вихідного трифазного кола та теплового режиму силового модуля. Саме ці елементи визначають вимоги до датчиків і структури приладового комплексу.

					02.02 -КР.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

**Обґрунтування вибору основного технологічного обладнання
інверторної системи**

Група обладнання	Прийняте рішення	Основні вимоги до вибору	Роль у технологічному процесі
PV-масив	Стрінги фотоелектричних модулів із підключенням до DC-контур	Сумісність за напругою та струмом, стійкість до зовнішніх умов, можливість секціонування	Формує первинну електроенергію постійного струму
DC-захист	Запобіжники, DC-роз'єднувачі, обмежувачі перенапруг	Номінальна напруга вище робочої U_{DC} , достатня комутаційна здатність	Забезпечує безпечне відключення та захист інвертора
Інвертор	Трифазний перетворювач 10 кВт для розрахункового модуля	$U_{AC} = 380 \text{ В}$, $f = 50 \text{ Гц}$, $\eta \geq 0,96$, наявність інтерфейсу зв'язку	Перетворює DC-енергію в AC-енергію та керує режимом роботи
АКБ і BMS	Модуль накопичення енергії з контролем стану заряду	Контроль напруги, струму, температури, захист від перезаряду й глибокого розряду	Забезпечує резервне живлення і згладжування енергетичних потоків
АС-щит	Автоматичні вимикачі, контактори, лічильник, клемні з'єднання	Номінальний струм з резервом, селективність захисту, зручність обслуговування	Передає енергію до мережі або споживачів
EMS / SCADA	Контролер енергоменеджменту і локальна візуалізація	Підтримка протоколів Modbus, RS-485, Ethernet або MQTT	Забезпечує диспетчеризацію і збір технологічних даних
Система охолодження	Радіатор, вентилятор, температурні датчики	Достатній тепловідвід, контроль обертів вентилятора, доступність очищення	Підтримує допустиму температуру силових модулів

2.4 Вибір обладнання та контрольних точок для діагностування інверторної системи

Приладовий комплекс діагностики повинен бути інтегрований у технологічний процес таким чином, щоб не порушувати роботу силової схеми та водночас забезпечувати достатню інформативність вимірювань. Для цього контрольні точки доцільно розміщувати в DC-ланці, у вихідному AC-колі, на силових елементах інвертора, у системі охолодження та на рівні зв'язку з контролером верхнього рівня.

У DC-ланці необхідно контролювати середнє значення напруги, струм, пульсаційну складову та ознаки просідання напруги під навантаженням. Зростання пульсацій DC-ланки є характерною ознакою деградації конденсаторів, погіршення роботи джерела постійного струму або перевантаження інвертора в динамічному режимі. Тому канал вимірювання напруги повинен мати достатній діапазон і бути придатним для реєстрації не тільки повільної зміни рівня, а й швидших коливань.

У вихідному AC-колі контролюються лінійна напруга, струм навантаження, частота, активна потужність та ознаки асиметрії фаз. Ці параметри дають змогу виявити перевантаження, неповнофазний режим, погіршення якості вихідної напруги та некоректну роботу силових ключів. Для вимірювання струму доцільно використовувати датчики на ефекті Холла або трансформатори струму, що забезпечують гальванічне відокремлення вимірювальної частини від силового кола.

Тепловий стан інвертора оцінюється за температурою радіатора, температурою силового модуля та температурою повітря всередині шафи. Додатково доцільно контролювати стан вентилятора або сигнал його обертання. Такий набір параметрів дозволяє відрізнити власне електричне перевантаження від погіршення тепловідведення, наприклад через забруднення радіатора, відмову вентилятора або недостатню вентиляцію шафи.

					02.02 -КР.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.4.

Контрольні точки приладового комплексу та їх технологічне призначення

Контрольна точка	Параметри, що вимірюються	Технологічне призначення	Ознаки відхилення
Вхід DC-ланки інвертора	U_DC, I_DC, ΔU_{DC}	Оцінювання режиму джерела постійного струму та стану конденсаторів	Зростання пульсацій, перенапруга, просідання напруги
Вихід AC-інвертора	U_AC, I_AC, f, P	Контроль навантаження та якості вихідної енергії	Перевантаження, асиметрія фаз, нестабільна частота
Радіатор силового модуля	T_rad	Оцінювання ефективності тепловідведення	Поступове зростання температури, частий derating
Силовий модуль IGBT	T_mod або наближена температура корпусу	Раннє виявлення небезпечного нагріву силових ключів	Наближення до граничної температури, швидкий температурний приріст
Система охолодження	Стан вентилятора, швидкість обертання або дискретний сигнал	Перевірка працездатності примусового охолодження	Відсутність обертання, низька швидкість, аварійний сигнал
Комунікаційний канал	Стан RS-485/Ethernet/MQTT, наявність пакетів даних	Передавання інформації до EMS або журналу подій	Втрати зв'язку, неповні пакети, затримка передавання

Для практичної реалізації приладового комплексу доцільно передбачити модульну структуру. Перший модуль виконує вимірювання електричних параметрів, другий - температурний контроль, третій - обробку та фільтрацію даних, четвертий - формування аварійних повідомлень і передавання інформації до верхнього рівня. Такий підхід спрощує модернізацію комплексу, дає змогу замінювати окремі датчики без зміни всієї системи та полегшує технічне обслуговування.

Вибір засобів технологічного контролю для приладового комплексу

Засіб контролю	Рекомендований тип	Причина вибору	Очікуваний результат
Датчик напруги DC	Подільник напруги з гальванічною ізоляцією або ізольований перетворювач	Безпечне приведення високої напруги до рівня АЦП	Контроль U_DC і пульсацій ланки постійного струму
Датчик струму DC/AC	Датчик Холла або трансформатор струму для AC-каналу	Гальванічне розділення та можливість вимірювання робочих і аварійних режимів	Фіксація перевантаження і динамічних змін струму
Температурний датчик	NTC, PT100/PT1000 або цифровий датчик у зоні радіатора	Достатня точність для контролю теплового режиму	Раннє виявлення перегріву
Контролер обробки	Мікроконтролерний модуль з АЦП та інтерфейсом зв'язку	Можливість локальної обробки сигналів і передавання даних	Формування станів Норма/Попередження/Аварія
Інтерфейс зв'язку	RS-485, Ethernet або MQTT-шлюз	Сумісність із промисловими системами моніторингу	Передавання журналу подій на верхній рівень
Індикація	Світлодіодна індикація, дисплей або НМІ-панель	Швидке сприйняття стану обладнання персоналом	Оперативне реагування на відхилення

Засоби контролю мають вибиратися з урахуванням електробезпеки, завадостійкості та ремонтпридатності. Вимірювальна частина не повинна створювати додаткового ризику для силового обладнання, тому для каналів

напруги і струму необхідне гальванічне розділення або застосування датчиків з безпечним вторинним виходом. Для температурних каналів важливо забезпечити надійний тепловий контакт із контрольованою поверхнею і механічний захист провідників від вібрацій та нагрівання.

2.5 Організація технологічного процесу експлуатації та технічного обслуговування

Експлуатація інверторної системи повинна бути організована як безперервний технологічний процес, що включає контроль початкового стану, запуск, спостереження за робочими параметрами, реєстрацію відхилень, виконання планового обслуговування та аналіз накопичених даних. Розроблюваний приладовий комплекс повинен доповнювати штатні захисти інвертора, а не дублювати їх без додаткової користі. Його основне призначення полягає в ранньому виявленні тенденцій, які ще не призвели до аварійного вимкнення, але свідчать про погіршення стану обладнання.

Перед запуском інверторної системи персонал перевіряє стан комутаційних апаратів, наявність візуальних пошкоджень, роботу вентилятора, цілісність кабельних з'єднань, відсутність аварійних повідомлень та коректність зв'язку з системою моніторингу. Після запуску комплекс переходить у режим автоматичного збирання даних. У цьому режимі значення параметрів порівнюються з допустимими межами, а результати записуються в журнал подій.

Технологічний процес діагностування доцільно будувати за принципом трирівневої оцінки стану. Перший рівень — нормальний стан, коли всі параметри перебувають у допустимих межах. Другий рівень — попереджувальний стан, коли параметр наближається до межі або має стійку негативну тенденцію. Третій рівень — аварійний стан, коли перевищено допустиме значення або є ознаки небезпечного режиму. Такий підхід є зручним

					02.02 -КР.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

для обслуговуючого персоналу, оскільки дозволяє розділити планові дії, профілактику та невідкладне реагування.

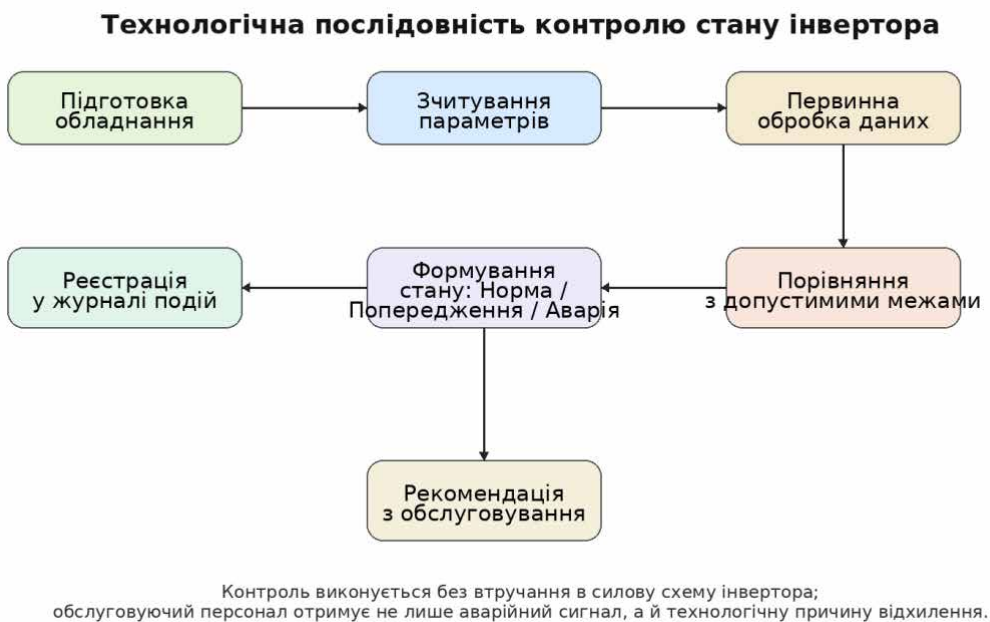


Рис.2.2. Послідовність технологічного контролю стану інвертора

Послідовність, наведена на рис. 2.2, передбачає, що спочатку виконується підготовка обладнання, далі зчитуються параметри з датчиків, після чого вони проходять первинну обробку. До первинної обробки належать усереднення, відсіювання явно помилкових значень, перевірка наявності сигналу та перетворення результатів до фізичних одиниць. Після цього дані порівнюються з допустимими межами, визначається технологічний стан інвертора і формується відповідне повідомлення.

У разі нормального стану система лише реєструє поточні значення з заданою періодичністю. У разі попередження комплекс повинен збільшити деталізацію запису даних і сформулювати повідомлення для персоналу. Наприклад, якщо температура радіатора поступово зростає при незмінному навантаженні, це може свідчити про забруднення поверхні охолодження або зниження продуктивності вентилятора. Якщо зростають пульсації DC-ланки, доцільно виконати перевірку конденсаторів або DC-з'єднань. Якщо перевищено

аварійний поріг струму або температури, комплекс повинен зафіксувати подію, передати сигнал на верхній рівень і забезпечити індикацію небезпечного стану.

Технічне обслуговування інверторної системи за результатами діагностування може включати очищення вентиляційних каналів, перевірку контактних з'єднань, контроль затягування клем, перевірку стану вентиляторів, огляд конденсаторів DC-ланки, перевірку параметрів ізоляції, аналіз журналу аварій та оновлення налаштувань порогів. Накопичення історичних даних дає змогу перейти від регламентного обслуговування до обслуговування за технічним станом.

Таблиця 2.6.

Технологічні дії персоналу залежно від стану інверторної системи

Стан системи	Умови визначення	Дії приладового комплексу	Дії персоналу
Попередження	Параметр наближається до межі або має тривалу тенденцію погіршення	Сигнал попередження, збільшення частоти запису, фіксація причини	Огляд обладнання, очищення охолодження, перевірка контактів, аналіз журналу
Аварія	Перевищено граничне значення струму, напруги, температури або втрачено критичний сигнал	Аварійна індикація, запис події, передавання повідомлення на верхній рівень	Зупинка або блокування обладнання, пошук причини, відновлення після перевірки
Сервіс	Виконуються регламентні або ремонтні роботи	Фіксація сервісного режиму, заборона помилкових аварійних висновків	Перевірка датчиків, калібрування, тестовий запуск, оформлення результатів
Норма	Параметри перебувають у допустимих межах, відсутні стійкі негативні тенденції	Періодичний запис даних, відображення поточного режиму	Планове спостереження без втручання в роботу обладнання

Запропонована організація експлуатації підвищує керованість технологічного процесу. Персонал отримує не лише факт аварії, а й попередню інформацію про напрям розвитку відхилення. Це особливо важливо для інверторів, у яких відмова силового модуля або конденсаторів може розвиватися поступово, але наслідком стає повна зупинка обладнання.

2.6 Обґрунтування прийнятого технологічного рішення

Прийняте технологічне рішення полягає у доповненні інверторної системи спеціалізованим приладовим комплексом, який виконує безперервний контроль електричних і теплових параметрів, формує оцінку поточного стану та передає діагностичні дані на верхній рівень. Таке рішення відповідає специфіці гібридних систем електроживлення, оскільки в них інвертор працює у змінних режимах, а його технічний стан безпосередньо впливає на надійність електропостачання підприємства.

На відміну від регламентного підходу, за якого обладнання оглядається через фіксовані інтервали часу, контроль за технічним станом дозволяє виявляти передумови відмови раніше. Наприклад, зростання температури при незмінному навантаженні вказує на погіршення охолодження, збільшення пульсацій DC-ланки може бути ознакою деградації конденсаторів, а асиметрія вихідного струму може свідчити про порушення роботи силового каналу або навантаження. Усі ці ознаки доцільно виявляти до аварійного вимкнення.

Технологічна перевага запропонованого рішення полягає у поєднанні локального вимірювання, первинної обробки даних і передавання інформації в систему моніторингу. Це дозволяє використовувати приладовий комплекс як самостійний засіб контролю на місці встановлення інвертора і водночас як елемент загальної інфраструктури підприємства. За потреби дані можуть бути використані для побудови трендів, складання звітів, аналізу аварій і планування обслуговування.

					02.02 -КР.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

**Порівняння традиційного та запропонованого технологічного
підходу до обслуговування інвертора**

Критерій	Традиційний підхід	Запропонований підхід
Принцип обслуговування	Переважно регламентний огляд або реагування після аварії	Обслуговування з урахуванням фактичного технічного стану
Джерело інформації	Візуальний огляд, штатні коди помилок інвертора	Дані з датчиків струму, напруги, температури та стану охолодження
Виявлення деградації	Переважно після появи помітної несправності	За тенденціями зростання температури, пульсацій і перевантаження
Реакція персоналу	Після зупинки обладнання або аварійного сигналу	На етапі попередження перед розвитком повної відмови
Документування	Записи виконуються вручну або частково	Автоматичний журнал подій і можливість формування звітів
Вплив на простій	Вищий ризик непланової зупинки	Зменшення ризику аварійного простою завдяки ранній діагностиці

Таким чином, у технологічній частині обґрунтовано місце інверторної системи в процесі електроживлення підприємства, визначено основні режими її роботи, вибрано технологічне обладнання та контрольні точки для діагностування. Отримані результати створюють основу для електротехнічної частини, де необхідно виконати розрахунок параметрів інвертора, вибір датчиків, розрахунок вимірювальних каналів, вибір апаратів захисту та розроблення схемних рішень приладового комплексу.

					02.02 -КР.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛЗ

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА

3.1 Вихідні дані для електротехнічного розрахунку

Електротехнічний розділ виконано для інверторної системи гібридної енергетичної установки з приладовим комплексом діагностики. На відміну від описової частини, у цьому розділі основну увагу зосереджено на розрахунку робочих струмів, параметрів DC-шини, фільтра, вимірювальних каналів, кабелів, апаратів захисту, вентиляції та електричного освітлення зони обслуговування.

Вихідні дані прийнято з урахуванням роботи трифазного інвертора напруги у складі сонячної електростанції або локальної гібридної системи живлення. Розрахунки виконано для номінального режиму та з перевіркою за перевантажувальним коефіцієнтом 1,2, що дозволяє забезпечити запас для короткочасних перехідних режимів.

Під час вибору елементів прийнято такі критерії: номінальний струм апарата захисту має бути не меншим за розрахунковий робочий струм, комутаційна здатність апарата має відповідати можливому струму короткого замикання, допустимий струм кабелю має бути вищим за струм захисного апарата, а діапазони датчиків мають мати технологічний запас не менше 20 %.

					02.02 -КР.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вихідні дані для розрахунку електротехнічної частини

Параметр	Позначення	Одиниця	Прийняте значення	Призначення у розрахунку
Напруга DC-шини	UDC	В	600	вибір ізоляції, датчика напруги та конденсаторів
Коефіцієнт потужності	$\cos\varphi$	-	0,95	визначення повної та реактивної потужності
Коефіцієнт корисної дії	η	-	0,96	розрахунок втрат і тепловиділення
Частота вихідної напруги	f	Гц	50	розрахунок LC-фільтра та освітлювального кола
Частота ШІМ інвертора	fsw	кГц	10	розрахунок індуктивності вихідного фільтра
Допустимі пульсації DC-шини	ΔUDC	%	5	оцінка стану конденсаторного блоку
Напруга кіл керування	Uкер	В	24	живлення приладового комплексу
Розмір приміщення обслуговування	A × B × H	м	6 × 4 × 3	розрахунок освітлення та вентиляції
Номінальна активна потужність інвертора	Pн	кВт	10	розрахунок струмів і втрат
Лінійна вихідна напруга	Uл	В	380	розрахунок трифазного струму

3.2 Розрахунок робочих струмів, потужностей і втрат інвертора

Номінальна повна потужність трифазного інвертора визначається через активну потужність і коефіцієнт потужності:

					02.02 -КР.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$S_H = P_H / \cos\varphi = 10 / 0,95 = 10,53 \text{ кВА} \quad (3.1)$$

Реактивна складова навантаження визначається за кутом зсуву фаз φ :

$$Q_H = P_H \cdot \operatorname{tg}(\arccos \cos\varphi) = 10 \cdot \operatorname{tg}(\arccos 0,95) = 3,29 \text{ квар.} \quad (3.2)$$

Номинальний лінійний струм на виході інвертора:

$$I_{AC} = P_H / (\sqrt{3} \cdot U_L \cdot \cos\varphi) = 10000 / (1,732 \cdot 380 \cdot 0,95) = 15,99 \text{ А} \quad (3.3)$$

$$Q_H = P_H \cdot \operatorname{tg}(\arccos \cos\varphi) = 10 \cdot \operatorname{tg}(\arccos 0,95) = 3,29 \text{ квар.}$$

Для перевірки елементів за короткочасним перевантаженням приймається коефіцієнт $k_{\text{пер}} = 1,2$:

$$I_{AC.п} = k_{\text{пер}} \cdot I_{AC} = 1,2 \cdot 15,99 = 19,19 \text{ А} \quad (3.4)$$

Отже, для фаз U, V, W доцільно застосовувати датчики струму та провідники з робочим запасом не менше 25 А. Трифазний автоматичний вимикач на виході приймається номіналом 20 А, оскільки він перевищує робочий струм 15,99 А і одночасно забезпечує захист кабелю 2,5 мм².

Потужність, що споживається з DC-шини з урахуванням ККД інвертора:

$$P_{DC} = P_H / \eta = 10000 / 0,96 = 10416,7 \text{ Вт} \quad (3.5)$$

Струм у ланці постійного струму:

$$I_{DC} = P_{DC} / U_{DC} = 10416,7 / 600 = 17,36 \text{ А} \quad (3.6)$$

Перевантажувальне значення струму DC-шини становить:

$$I_{DC.п} = 1,2 \cdot I_{DC} = 1,2 \cdot 17,36 = 20,83 \text{ А} \quad (3.7)$$

Втрати потужності в інверторі визначаються різницею між спожитою потужністю з DC-шини та корисною вихідною потужністю:

$$P_{вт} = P_{DC} - P_H = 10416,7 - 10000 = 416,7 \text{ Вт} \quad (3.8)$$

Отримане значення є основою для розрахунку охолодження. Для подальшого вибору вентилятора приймається теплова потужність не менше 0,42 кВт, а з урахуванням запасу 1,3 - 0,55 кВт.

Результати розрахунку робочих електричних параметрів наведені в Додатку Д в Таблиця 3.2.

					02.02 -КР.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.3 Розрахунок вимірювальних каналів приладового комплексу

Приладовий комплекс діагностики повинен вимірювати напругу DC-шини, струм DC-ланки, фазні струми U, V, W, температуру силового модуля та температуру радіатора. Для підключення до мікроконтролера приймається АЦП з опорною напругою 3,3 В і розрядністю 12 біт.

Крок квантування 12-бітного АЦП:

$$q_{ADC} = U_{ref} / 2^{12} = 3,3 / 4096 = 0,000806 \text{ В} = 0,806 \text{ мВ} \quad (3.9)$$

Для контролю DC-шини приймається верхня межа вимірювання 750 В.

Коефіцієнт поділу резистивного дільника до рівня 3,0 В:

$$k_U = U_{вх.маx} / U_{вих.маx} = 750 / 3,0 = 250 \quad (3.10)$$

Якщо нижній резистор дільника $R_2 = 10 \text{ кОм}$, верхній резистор:

$$R_1 = (k_U - 1) \cdot R_2 = 249 \cdot 10 \text{ кОм} = 2,49 \text{ Мом} \quad (3.11)$$

Для рівномірного розподілу напруги R_1 виконується як послідовне з'єднання п'яти резисторів по 499 кОм. Потужність, що виділяється на верхній частині дільника при 750 В:

$$P_{R1} = U^2 / R_1 = 750^2 / 2,49 \cdot 10^6 = 0,226 \text{ Вт} \quad (3.12)$$

На один резистор припадає приблизно 0,045 Вт, тому застосування резисторів потужністю 0,25 Вт з напругою ізоляції, достатньою для DC-ланки, забезпечує запас.

Для вимірювання струмів приймаються датчики ТА1-ТА4 з діапазоном 0-25 А. Розрахункова дискретність при використанні повного діапазону АЦП:

$$q_I = 25 / 4096 = 0,0061 \text{ А} \quad (3.13)$$

Цього достатньо для діагностики перевантаження, асиметрії фаз і оцінювання динамічних режимів. Для температури застосовуються датчики ТТ1 і ТТ2 з діапазонами 0-150 °С та 0-100 °С відповідно. При програмній дискретності 0,5 °С забезпечується раннє виявлення перегріву силового модуля та радіатора.

					02.02 -КР.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.4 Розрахунок і вибір апаратів керування, комутації та захисту

Вибір апаратів захисту виконується за умовами робочого струму, напруги кола, комутаційної здатності та селективності. Для робочого кола приймається умова:

$$I_{н.ап} \geq 1,25 \cdot I_{роб}. \quad (3.14)$$

Для DC-сторони інвертора:

$$I_{н.DC} \geq 1,25 \cdot I_{DC} = 1,25 \cdot 17,36 = 21,7 \text{ А} \quad (3.15)$$

Отже, автоматичні вимикачі QF1 та QF2, а також запобіжник FU1 приймаються номіналом 25 А. Оскільки коло працює на постійній напрузі до 600 В, апарати повинні бути спеціального DC-виконання з робочою напругою не менше 800-1000 В DC.

Для вихідної трифазної сторони:

$$I_{н.AC} \geq 1,25 \cdot I_{AC} = 1,25 \cdot 15,99 = 19,99 \text{ А} \quad (3.16)$$

Тому приймається триполюсний автоматичний вимикач QF3 на 20 А з характеристикою C. Такий вимикач не спрацює при номінальному струмі 15,99 А, але забезпечує захист від перевантаження та короткого замикання на вихідній лінії.

Перевірка узгодження кабелю і автомата виконується за умовою:

$$I_{роб} \leq I_{н.ап} \leq I_z. \quad (3.17)$$

Для кабелю ВВГнг-LS 5×2,5 мм² допустимий тривалий струм у звичайних умовах прокладання приймається не менше 25 А. Отже, для вихідного кола виконується:

$$15,99 \text{ А} \leq 20 \text{ А} \leq 25 \text{ А} \quad (3.18)$$

Для захисту від імпульсних перенапруг на DC-стороні встановлюється пристрій SPD типу 2 для фотоелектричних кіл з номінальною робочою напругою, сумісною з DC-шиною 600 В. У колах керування 24 В встановлюється окремий автоматичний вимикач QF4 або плавкий запобіжник на 3 А.

					02.02 -КР.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вибір апаратів захисту і комутації

Позначення	Коло	Розрахунковий струм	Умова вибору	Прийнятий апарат	Призначення
FU1	PV-вхід / DC	17,36 А	$\geq 21,7$ А	gPV-запобіжник 25 А, 1000 В DC	резервний струмовий захист
SPD	DC-шина	600 В	$U_p \geq U_{DC}$	ПЗПП/SPD тип 2, PV/DC	захист від імпульсних перенапруг
QF2	Акумулятор / DC-DC	17,36 А	$\geq 21,7$ А	DC-автомат 2Р, 25 А	захист батарейного вводу
QF3	АС-вихід 3~380 В	15,99 А	$\geq 19,99$ А	автомат 3Р C20, 6 кА	захист вихідної лінії
QF4	Кола керування 24 В	2,5 А	≥ 3 А	автомат або запобіжник 3 А	захист приладового комплексу
QF1	PV-вхід / DC	17,36 А	$\geq 21,7$ А	DC-автомат 2Р, 25 А, ≥ 800 В DC	відключення PV-кола

3.5 Розрахунок силової електропроводки та падіння напруги

Вибір перерізу провідників виконується за двома умовами: допустимий тривалий струм кабелю повинен бути вищим за струм захисного апарата, а падіння напруги не повинно перевищувати допустимих значень для силових кіл.

Для DC-лінії від PV-комбайнера до інвертора приймається мідний кабель перерізом 4 мм² і довжиною 15 м. Падіння напруги у двопровідному DC-колі:

$$\Delta U_{DC} = 2 \cdot I \cdot \rho \cdot l / S = 2 \cdot 17,36 \cdot 0,018 \cdot 15 / 4 = 2,34 \text{ В} \quad (3.19)$$

$$\Delta U_{DC}\% = 2,34 / 600 \cdot 100 \% = 0,39 \% \quad (3.20)$$

Отримане падіння напруги значно менше 2 %, тому переріз 4 мм² є достатнім. Для вихідної трифазної лінії до навантаження приймається кабель 5×2,5 мм² довжиною 20 м. Падіння напруги:

$$\Delta U_{AC} = \sqrt{3} \cdot I \cdot \rho \cdot l \cdot \cos\varphi / S = 1,732 \cdot 15,99 \cdot 0,018 \cdot 20 \cdot 0,95 / 2,5 = 3,78 \text{ В} \quad (3.21)$$

$$\Delta U_{AC}\% = 3,78 / 380 \cdot 100 \% = 0,99 \% \quad (3.22)$$

Падіння напруги менше 5 %, тому вибір кабелю ВВГнг-LS 5×2,5 мм² є прийнятним. Для кіл керування 24 В застосовується кабель 2×1,0 мм² або 2×1,5 мм² залежно від довжини траси. Захисний провідник РЕ приймається у складі кабелю, а для металевої шафи виконується окреме приєднання до шини захисного заземлення.

Таблиця 3.5.

Вибір кабельних ліній

Ділянка	Струм	Довжина	Розрахунок ве падіння	Прийнятий кабель	Захист
PV-комбайнер - DC-шина	17,36 А	15 м	2,34 В; 0,39 %	ВВГнг-LS 2×4 мм ² , DC/PV	QF1, FU1
Акумулятор - DC/DC	17,36 А	10 м	до 0,35 %	ВВГнг-LS 2×4 мм ²	QF2
Інвертор - навантаження	15,99 А	20 м	3,78 В; 0,99 %	ВВГнг-LS 5×2,5 мм ²	QF3 C20
Живлення приладового комплексу 24 В	до 2,5 А	10 м	допустиме	ВВГнг-LS 2×1,5 мм ²	QF4 3 А
Сигнальні кола датчиків	малі струми	до 15 м	-	екрановані й 2×0,5 мм ²	екран на РЕ з одного боку

3.6 Розрахунок вентиляції шафи інверторного обладнання

Вентиляція шафи потрібна для відведення теплових втрат інвертора, DC/DC-перетворювача, фільтра та допоміжних електронних пристроїв. За розрахунком втрати інвертора становлять 416,7 Вт. З урахуванням додаткових втрат фільтра, джерела живлення та датчиків приймається теплова потужність:

$$P_{\text{тепл}} = 1,3 \cdot 416,7 = 541,7 \text{ Вт} \quad (3.23)$$

Необхідна масова витрата повітря за допустимого підвищення температури $\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$G = P_{\text{тепл}} / (c_p \cdot \Delta T) = 541,7 / (1005 \cdot 10) = 0,0539 \text{ кг/с} \quad (3.24)$$

Об'ємна витрата повітря за густини повітря $\rho_p = 1,2 \text{ кг/м}^3$:

$$L = G / \rho_p = 0,0539 / 1,2 = 0,0449 \text{ м}^3/\text{с} \quad (3.25)$$

$$L_{\text{год}} = 0,0449 \cdot 3600 = 161,6 \text{ м}^3/\text{год} \quad (3.26)$$

Отже, для шафи інверторного обладнання приймається вентилятор продуктивністю не менше $180 \text{ м}^3/\text{год}$. Для підвищення надійності доцільно застосувати два вентилятори по $90\text{-}120 \text{ м}^3/\text{год}$ або один основний вентилятор $180 \text{ м}^3/\text{год}$ з контролем працездатності. У схемі передбачено контроль вентилятора і температури радіатора датчиком ТТ2.

3.7 Розрахунок електричного освітлення приміщення обслуговування

Для обслуговування інверторного обладнання та приладового комплексу необхідно забезпечити достатній рівень освітленості. Приймається приміщення розміром $6 \times 4 \text{ м}$, площа $S = 24 \text{ м}^2$. Нормована освітленість для технічного обслуговування електрообладнання приймається $E_n = 300 \text{ лк}$. Розрахунок кількості світильників виконується методом коефіцієнта використання світлового потоку.

$$N = (E_n \cdot S \cdot k_z \cdot z) / (F_l \cdot \eta_{\text{вик}}) \quad (3.27)$$

Приймається: коефіцієнт запасу $k_z = 1,5$, коефіцієнт нерівномірності $z = 1,1$, світловий потік одного LED-світильника $F_l = 3600 \text{ лм}$, коефіцієнт використання $\eta_{\text{вик}} = 0,55$.

$$N = (300 \cdot 24 \cdot 1,5 \cdot 1,1) / (3600 \cdot 0,55) = 6,0 \text{ шт} \quad (3.28)$$

Отже, приймається 6 LED-світильників потужністю 36 Вт кожний зі світловим потоком 3600 лм . Загальна встановлена потужність освітлення:

$$P_{\text{осв}} = 6 \cdot 36 = 216 \text{ Вт} \quad (3.29)$$

Робочий струм освітлювальної мережі 230 В за $\cos \varphi = 0,9$:

$$I_{\text{осв}} = P_{\text{осв}} / (U \cdot \cos \varphi) = 216 / (230 \cdot 0,9) = 1,04 \text{ А} \quad (3.30)$$

					02.02 -КР.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для освітлювальної мережі приймається автоматичний вимикач QFосв на 6 А і кабель ВВГнг-LS 3×1,5 мм². Додатково передбачається один аварійний LED-світильник потужністю 10 Вт з автономним живленням не менше 1 години, розміщений біля шафи інвертора та виходу з приміщення.

Таблиця 3.7.

Результати розрахунку освітлення

Показник	Позначення	Значення	Прийняте рішення	Примітка
Площа приміщення	S	24 м²	6×4 м	зона обслуговування
Нормована освітленість	Ен	300 лк	загальне робоче освітлення	для технічного обслуговування
Кількість світильників	N	6,0	6 шт.	LED 36 Вт
Загальна потужність	Росв	216 Вт	6×36 Вт	робоче освітлення
Струм мережі освітлення	Іосв	1,04 А	QFосв 1Р 6 А	кабель 3×1,5 мм²
Аварійне освітлення	-	10 Вт	1 світильник	автономність ≥1 год

Принципова електрична схема робочого та аварійного освітлення наведена в Додатку А

3.8 Принципова схема силової частини інверторної системи

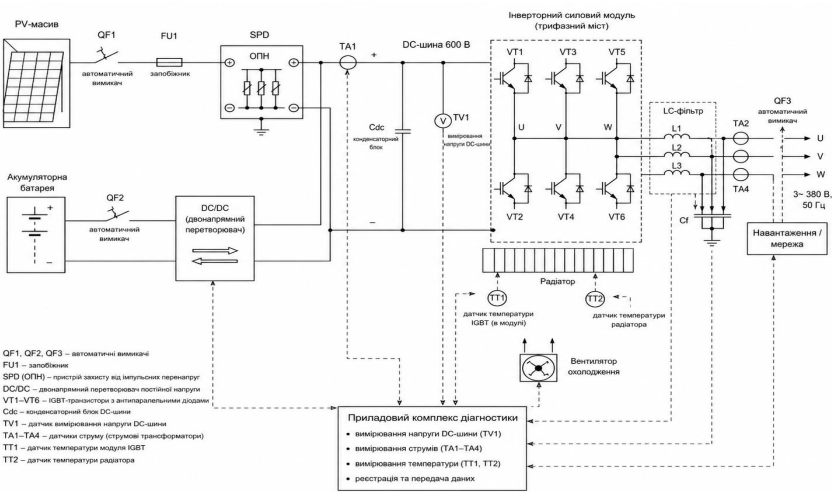


Рис. 3.1. Принципова схема силової частини інверторної системи з приладовим комплексом діагностики

Силова частина інверторної системи містить два джерела постійної напруги: PV-масив і акумуляторну батарею через двонапрямний DC/DC-перетворювач. На DC-стороні встановлюються автоматичні вимикачі QF1, QF2, запобіжник FU1, пристрій захисту від імпульсних перенапруг SPD, датчик струму TA1, конденсаторний блок Cdc та датчик напруги TV1. Перетворення енергії виконується трифазним мостом VT1-VT6. На AC-стороні передбачено LC-фільтр, датчики струму TA2-TA4, автоматичний вимикач QF3 та вихід на мережу або навантаження 3~380 В, 50 Гц. На рис. 3.3 пунктирними лініями позначено вимірювальні сигнали до приладового комплексу діагностики. Така структура дозволяє контролювати напругу DC-шини, струми DC та AC-сторін, температуру силового модуля, температуру радіатора і стан охолодження.

Таблиця 3.8.

Зведений перелік вибраного електротехнічного обладнання

Група обладнання	Позначення	Розрахункова основа	Прийняте рішення	Контроль / захист
Силовий інвертор	VT1-VT6	$I_{\max,п} = 27,13 \text{ А};$ $U_{CE} \geq 900 \text{ В}$	IGBT-модуль 1200 В, $\geq 40 \text{ А}$	ТТ1, ТА2-ТА4
DC-шина	Cdc	$C_{\min} = 5790 \text{ мкФ}$	6800 мкФ, 800 В	TV1, ТА1
Вихідний фільтр	L1-L3, Сф	$L = 3,125 \text{ мГн}; C =$ $7,68 \text{ мкФ}$	3,3 мГн; 10 мкФ	контроль якості виходу
DC-захист PV	QF1, FU1, SPD	$I_n \geq 21,7 \text{ А}$	25 А DC; gPV 25 А; SPD тип 2	захист DC-вводу
AC-захист	QF3	$I_n \geq 19,99 \text{ А}$	3P C20, 6 кА	захист вихідної лінії
Кабель DC	-	$\Delta U = 0,39 \%$	Cu 2×4 мм ²	QF1, QF2, FU1
Кабель AC	-	$\Delta U = 0,99 \%$	ВВГнг-LS 5×2,5 мм ²	QF3 C20
Вентиляція	Fan	$L_{\text{год}} = 161,6 \text{ м}^3/\text{год}$	вентилятор $\geq 180 \text{ м}^3/\text{год}$	ТТ2, контроль вентилятора
Живлення діагностики	PS 24 V	$I_{24.пр} = 2,25 \text{ А}$	24 В, 60 Вт, 2,5 А	QF4 3 А
Освітлення	QFосв	$N = 6 \text{ світильників}; I$ $= 1,04 \text{ А}$	6×36 Вт; кабель 3×1,5 мм ²	автомат 1P 6 А

3.9. Розрахунок електропривода загальнообмінної вентиляції сервісної зони

Для забезпечення нормальних умов роботи інверторного обладнання в сервісній зоні необхідно передбачити ефективну систему загальнообмінної вентиляції. Під час роботи інверторних систем, зарядних пристроїв, електродвигунів та іншого обладнання в приміщенні виділяється теплота, а також можливе накопичення пилу, парів технічних рідин і продуктів зношування. Усе це негативно впливає як на роботу електронних компонентів, так і на умови праці персоналу.

Об'єм приміщення сервісної зони становить:

$$V = 72 \text{ м}^3. \quad (3.31)$$

Для приміщень, у яких розміщене електрообладнання та виконуються ремонтно-діагностичні роботи, приймаємо кратність повітрообміну: $n = 12$ разів на годину.

$$L = V \cdot n \quad (3.32)$$

де L — продуктивність вентилятора, $\text{м}^3/\text{год}$;

V — об'єм приміщення, м^3 ;

n — кратність повітрообміну, $1/\text{год}$.

$$L = 72 \cdot 12 = 864 \text{ м}^3/\text{год} = 0,24 \text{ м}^3/\text{сек} \quad (3.33)$$

Отже, для даного приміщення необхідно застосувати витяжний вентилятор продуктивністю не менше $864 \text{ м}^3/\text{год}$. З урахуванням можливих втрат у повітропроводах, забруднення фільтрів та місцевих опорів доцільно прийняти вентилятор із невеликим запасом продуктивності.

Для розрахунку потужності на валу вентилятора приймаємо повний тиск: $p = 600 \text{ Па}$.

Таке значення можна прийняти для витяжної системи з повітропроводами, решітками, поворотами та фільтруючими елементами. Коефіцієнт корисної дії відцентрового вентилятора приймаємо $\eta_v = 0,6$.

$$P_{\text{вал}} = (L \cdot p) / \eta_v.$$

$$P_{\text{вал}} = (0,24 \cdot 600) / 0,6 = 240 \text{ Вт}. \quad (3.34)$$

					02.02 -КР.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отже, для забезпечення потрібного повітрообміну вентилятору необхідна механічна потужність на валу приблизно 240 Вт.

Оскільки електродвигун повинен працювати надійно не лише в номінальному режимі, а й при підвищеному опорі мережі або частковому забрудненні фільтрів, вводимо коефіцієнт запасу: $k = 1,3$.

Тоді необхідна потужність електродвигуна становитиме:

$$\begin{aligned} P_{\text{дв}} &\geq k \cdot P_{\text{вал}} \\ P_{\text{дв}} &\geq 1,3 \cdot 240 = 312 \text{ Вт.} \end{aligned} \quad (3.35)$$

За результатами розрахунку можна зробити висновок, що мінімально необхідна потужність електродвигуна становить близько 0,31 кВт. Найближчим стандартним варіантом є асинхронний електродвигун потужністю 0,55 кВт. Для приводу витяжного відцентрового вентилятора приймаємо електродвигун серії АІР71А4 потужністю 0,55 кВт з частотою обертання близько 1500 об/хв. Такий двигун має достатній запас потужності, просту конструкцію, високу надійність і добре підходить для тривалої роботи в системах вентиляції.

3.10 Захист і керування електродвигуном вентилятора

Для надійної роботи електропривода витяжного вентилятора необхідно передбачити апарати захисту та комутації. Оскільки електродвигун працює у складі вентиляційної установки, він може піддаватися перевантаженню через забруднення фільтрів, підвищений опір повітропроводів або заклинювання робочого колеса вентилятора. Тому живлення двигуна без захисних апаратів є недопустимим.

Для приводу вентилятора прийнято асинхронний електродвигун потужністю 0,55 кВт. Визначимо його орієнтовний номінальний струм:

$$I_{\text{н}} = P_{\text{н}} / (\sqrt{3} \cdot U \cdot \eta \cdot \cos\varphi) \quad (3.36)$$

$P_{\text{н}} = 0,55 \text{ кВт} = 550 \text{ Вт}$ — номінальна потужність двигуна;

$U = 380 \text{ В}$ — напруга трифазної мережі;

$\eta = 0,75$ — орієнтовний ККД електродвигуна;

					02.02 -КР.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$\cos\varphi = 0,75$ — коефіцієнт потужності.

$$I_n = 550 / (1,73 \cdot 380 \cdot 0,75 \cdot 0,75) \approx 1,5 \text{ А.} \quad (3.37)$$

Отже, робочий струм електродвигуна становить приблизно 1,5 А. З урахуванням пускових струмів та короткочасних перевантажень у схемі керування необхідно встановити автоматичний вимикач із номіналом, близьким до робочого струму двигуна. Для даного електропривода доцільно застосувати автоматичний вимикач або мотор-автомат з діапазоном регулювання 1,6–2,5 А

Для керування електроприводом вентиляції передбачено систему автоматичного та ручного керування. Основними елементами схеми є апарати захисту, перетворювач частоти, електродвигун вентилятора, температурні датчики, органи керування та сигнальні лампи. Датчики ТТ1 і ТТ2 контролюють температуру силових модулів інвертора та радіатора охолодження. За їхніми сигналами перетворювач частоти змінює швидкість обертання вентилятора, забезпечуючи необхідний повітрообмін у сервісній зоні.

У ручному режимі оператор може запускати або зупиняти вентилятор кнопками керування. В автоматичному режимі система самостійно збільшує продуктивність вентиляції при підвищенні температури обладнання. Для контролю стану системи на панелі ящика керування встановлюються сигнальні лампи «Живлення», «Робота вентилятора» та «Аварія».

Перелік елементів принципової електричної схеми керування приводом вентилятора наведений в Додатку Г таблиці 3.10

Електрична схема системи керування електроприводом загальнообмінної вентиляції сервісної зони наведена в Додатку В

3.11 . Побудова механічної характеристики електродвигуна приводу вентилятора

Для забезпечення нормальних умов роботи інверторного обладнання у сервісній зоні передбачено систему загальнообмінної вентиляції. За

					02.02 -КР.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

результатами розрахунку потужності на валу вентилятора прийнято $P_{\text{вал}} = 240$ Вт. З урахуванням коефіцієнта запасу $k = 1,3$ необхідна потужність електродвигуна становить $P_{\text{дв}} \geq 312$ Вт. Найближчим стандартним варіантом для приводу витяжного відцентрового вентилятора прийнято асинхронний електродвигун серії AIP71A4 потужністю 0,55 кВт з частотою обертання близько 1500 об/хв.

Керування електроприводом вентиляції виконується у ручному та автоматичному режимах. В автоматичному режимі перетворювач частоти змінює швидкість обертання вентилятора за сигналами температурних датчиків, що контролюють температуру силових модулів інвертора та радіатора охолодження. Тому для оцінювання роботи приводу необхідно побудувати механічну характеристику електродвигуна.

Таблиця 3.11

Технічна характеристика електродвигуна приводу вентилятора

Параметр	Значення
Тип електродвигуна	AIP71A4
Призначення	привід витяжного відцентрового вентилятора сервісної зони
Номінальна потужність P_n , кВт	0,55
Номінальна напруга U_n , В	380
Частота обертання, об/хв	близько 1500
Прийнята номінальна швидкість для розрахунку n_n , об/хв	1400
ККД η	0,75
Коефіцієнт потужності $\cos\phi$	0,75
Номінальний струм I_n , А	$\approx 1,5$
Кратність пускового моменту λ_p	2,1
Кратність мінімального моменту $\lambda_{\min}$	1,6
Кратність максимального моменту $\lambda_{\max}$	2,2

Механічна характеристика електродвигуна при номінальній напрузі живлення визначається за координатами характерних точок, які показують зміну кутової швидкості залежно від електромагнітного моменту. Для

чотириполюсного асинхронного двигуна при частоті мережі 50 Гц синхронна частота обертання становить:

$$n_0 = 60 \cdot f / p = 60 \cdot 50 / 2 = 1500 \text{ об/хв}, \quad (3.38)$$

де f — частота мережі, Гц; p — кількість пар полюсів двигуна.

Синхронна кутова швидкість:

$$\omega_0 = \pi \cdot n_0 / 30 = 3,14 \cdot 1500 / 30 = 157 \text{ рад/с}. \quad (3.39)$$

Оскільки у вихідних даних частота обертання двигуна наведена орієнтовно як близько 1500 об/хв, для розрахунку приймаємо номінальну частоту обертання ротора $n_n = 1400$ об/хв. Номінальне ковзання становить:

$$s_n = (n_0 - n_n) / n_0 = (1500 - 1400) / 1500 = 0.067. \quad (3.40)$$

Номінальна кутова швидкість двигуна:

$$\omega_n = \pi \cdot n_n / 30 = 3,14 \cdot 1400 / 30 = 146.6 \text{ рад/с}. \quad (3.41)$$

Номінальний момент електродвигуна визначаємо за формулою:

$$M_n = 9550 \cdot P_n / n_n = 9550 \cdot 0,55 / 1400 = 3.75 \text{ Н}\cdot\text{м}. \quad (3.42)$$

Критичний, мінімальний та пусковий моменти визначаємо через прийняті кратності моментів:

$$M_k = \lambda_{\max} \cdot M_n = 2,2 \cdot 3.75 = 8.25 \text{ Н}\cdot\text{м}; \quad (3.43)$$

$$M_{\min} = \lambda_{\min} \cdot M_n = 1,6 \cdot 3.75 = 6.00 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_p = \lambda_p \cdot M_n = 2,1 \cdot 3.75 = 7.88 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

З урахуванням можливого зниження напруги моменти двигуна перераховуються пропорційно квадрату напруги:

$$M(U) = M_n \cdot (U / U_n)^2.$$

Таблиця 3.12

Розрахункові дані для побудови механічної характеристики електродвигуна

Параметр	Т. 1	Т. 2	Т. 3	Т. 4	Т. 5
Ковзання s	0	0,07	0,57	0,80	1
ω , рад/с	157,08	146,61	67,54	31,42	0
M при U_n , Н·м	0	3,75	8,25	6,00	7,88
M при $0,95U_n$, Н·м	0	3,39	7,45	5,42	7,11
M при $0,90U_n$, Н·м	0	3,04	6,69	4,86	6,38

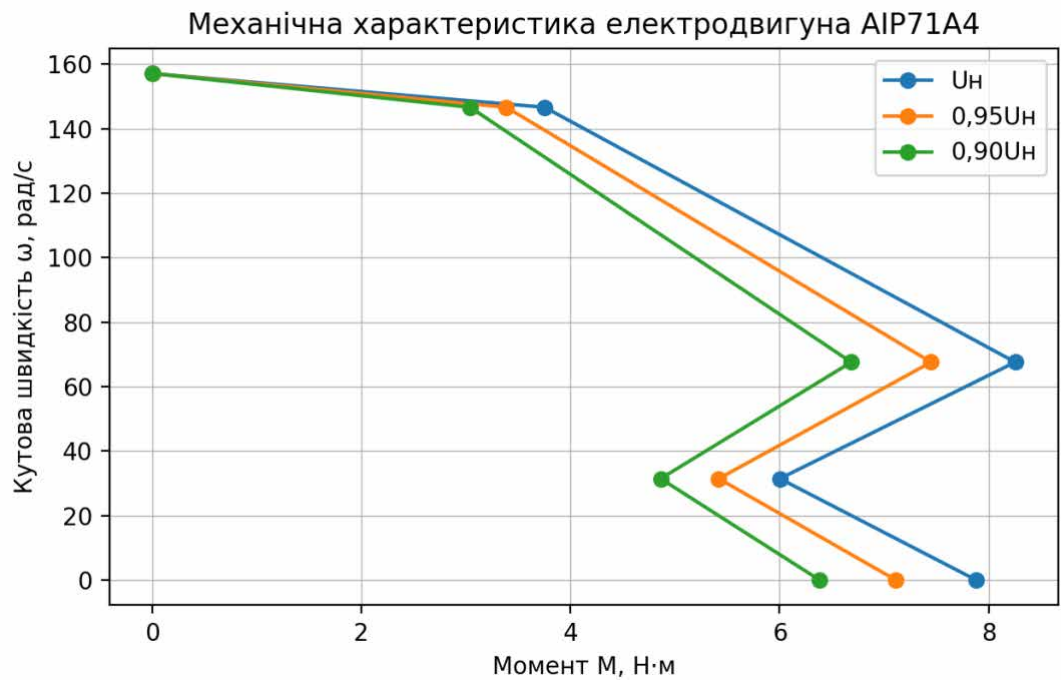


Рис. 3.2. Механічна характеристика електродвигуна AIP71A4 приводу
вентилятора

За отриманими результатами можна зробити висновок, що вибраний електродвигун AIP71A4 потужністю 0,55 кВт має достатній запас за моментом для приводу витяжного відцентрового вентилятора. Наявність перетворювача частоти дозволяє змінювати швидкість обертання вентилятора відповідно до температурного стану інверторного обладнання, що підвищує енергоефективність і надійність роботи системи охолодження.

РОЗДІЛ 4

СПЕЦІАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

4.1 Методика перевірки працездатності приладового комплексу

Експериментальна перевірка приладового комплексу виконується з метою підтвердження працездатності вимірювальних каналів, коректності алгоритму виявлення передвідмовних станів та можливості інтеграції комплексу із системою моніторингу підприємства. Перевірка узгоджується з розрахунковими параметрами, прийнятими у попередніх розділах: номінальна потужність інвертора 10 кВт, напруга DC-ланки 600 В, лінійна вихідна напруга 380 В, номінальний вихідний струм 15,99 А, граничний аварійний струм 19,19 А та допустимий рівень пульсацій DC-ланки 30 В.

Основний принцип перевірки полягає у порівнянні показів розробленого комплексу з еталонними вимірювальними засобами в кількох режимах роботи інверторної системи. До таких режимів належать нормальна робота, часткове навантаження, короткочасне перевантаження, імітація перегріву, збільшення пульсацій напруги DC-ланки та відмова вентилятора охолодження. Такий набір режимів дозволяє оцінити не лише точність вимірювання, а й здатність комплексу своєчасно формувати попереджувальні та аварійні повідомлення.

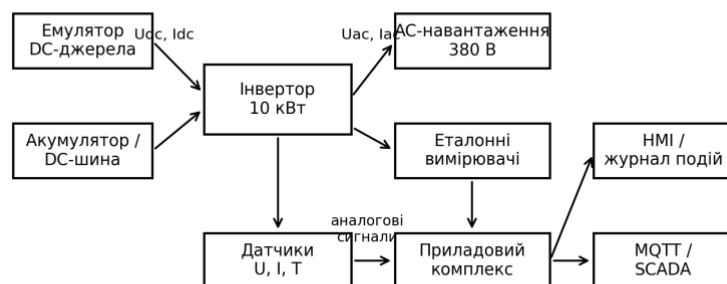


Рис. 4.1. Схема випробувального стенда для перевірки приладового комплексу

На рис. 4.1 показано схему випробувального стенда. До його складу входять DC-джерело або акумуляторна шина, інверторний модуль, навантажувальний блок, еталонні вимірювачі, датчики напруги, струму і температури, приладовий комплекс та система верхнього рівня. Еталонні вимірювачі використовуються лише на етапі перевірки, а приладовий комплекс працює у штатному режимі: зчитує сигнали, виконує цифрову обробку, визначає діагностичний стан і передає дані до HMI/SCADA або MQTT-брокера.

Методика перевірки передбачає поетапне виконання таких операцій: зовнішній огляд і перевірка монтажу; перевірка живлення 24 В; калібрування нульових рівнів датчиків; зняття показів у номінальному режимі; перевірка порогів попередження; перевірка аварійних уставок; аналіз журналу подій; перевірка передавання повідомлень до системи верхнього рівня. Кожний тест вважається успішним, якщо виміряні параметри не виходять за допустимі межі похибки, а реакція комплексу відповідає заданому сценарію.

Таблиця 4.1.

Програма експериментальної перевірки приладового комплексу

Етап	Контрольований режим	Перевірювані параметри	Критерій успішності
1	Пуск комплексу без навантаження	Живлення, зв'язок, нульові рівні	Стабільна робота, відсутність помилок
2	Часткове навантаження 50 %	U_DC, U_AC, I_AC, T_rad	Покази в межах допустимої похибки
3	Номінальний режим 100 %	Струм, напруга, потужність, температура	Нормальний стан без аварій
4	Перевантаження 110 %	I_AC, I_DC, журнал подій	Формування попередження
5	Перевантаження 120 %	I_AC, I_DC, дискретний вихід	Формування аварійного сигналу
6	Збільшення пульсацій DC-ланки	ΔU_{DC} , k_ripple	Фіксація деградаційної ознаки
7	Імітація перегріву	T_rad, T_mod	Попередження або аварія за температурою
8	Відмова вентилятора	n_f, температура, стан охолодження	Повідомлення про несправність охолодження

Програма перевірки, наведена в табл. 4.1, охоплює основні робочі та передаварійні стани інверторної системи. Її перевагою є те, що кожний режим має конкретний контрольований параметр і чіткий критерій успішності. Це забезпечує повторюваність перевірки та дозволяє застосовувати методику під час налагодження комплексу або після планового технічного обслуговування інвертора.

4.2 Перевірка точності вимірювання електричних і теплових параметрів

Точність вимірювання є основною умовою достовірної діагностики інверторної системи. Якщо похибка вимірювального каналу є значною, алгоритм може помилково сформулювати попередження або, навпаки, не виявити передвідмовний стан. Тому для кожного основного каналу визначаються абсолютна, відносна та приведена похибки.

Абсолютна похибка вимірювання визначається як різниця між показом приладового комплексу та еталонним значенням:

$$\Delta X = |X_{\text{вим}} - X_{\text{ет}}| \quad (4.1)$$

де $X_{\text{вим}}$ - значення, отримане приладовим комплексом; $X_{\text{ет}}$ - значення, отримане еталонним вимірювальним засобом.

Відносна похибка вимірювання визначається за формулою:

$$\delta X = (\Delta X / X_{\text{ет}}) \cdot 100 \% \quad (4.2)$$

Для оцінки вимірювального каналу в межах повного діапазону застосовується приведена похибка:

$$\gamma X = (\Delta X_{\text{max}} / (X_{\text{max}} - X_{\text{min}})) \cdot 100 \% \quad (4.3)$$

де ΔX_{max} - найбільша абсолютна похибка каналу; X_{max} і X_{min} - верхня та нижня межі діапазону вимірювання. Для діагностичного комплексу прийнято, що приведена похибка каналів напруги, струму та температури не

					02.02 -КР.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

повинна перевищувати 1,5 %, оскільки цього достатньо для фіксації перевантаження, перегріву і зростання пульсацій DC-ланки.

Таблиця 4.2.

Результати перевірки точності вимірювальних каналів

Параметр	Еталонне значення	Показ комплексу	Абсолютна похибка	Відносна похибка, %
Напруга DC-ланки U_DC	600,0 В	598,5 В	1,5 В	0,25
Лінійна напруга U_AC	380,0 В	379,2 В	0,8 В	0,21
Вихідний струм I_AC	15,99 А	16,08 А	0,09 А	0,56
Струм DC-ланки I_DC	17,36 А	17,48 А	0,12 А	0,69
Температура радіатора T_rad	65,0 °C	64,4 °C	0,6 °C	0,92
Пульсації DC-ланки ΔU_{DC}	30,0 В	30,7 В	0,7 В	2,33
THD вихідної напруги	5,0 %	5,2 %	0,2 %	4,00

За даними табл. 4.2 найбільша відносна похибка спостерігається для вимірювання пульсацій DC-ланки та коефіцієнта гармонічних спотворень. Це пояснюється тим, що ці параметри обчислюються не як безпосередній статичний сигнал, а як результат цифрової обробки вибірки. Для основних каналів напруги, струму і температури відносна похибка не перевищує 1 %, що є достатнім для контролю робочих і передаварійних режимів інвертора.

Приведена похибка каналу напруги DC-ланки за діапазону 0-750 В становить:

$$\gamma X = (\Delta X_{max} / (X_{max} - X_{min})) \cdot 100 \% \quad (4.3)$$

Приведена похибка каналу струму за діапазону 0-50 А становить 0,24 %, а температурного каналу за діапазону 0-150 °С - 0,40 %. Отримані значення підтверджують, що вимірювальна підсистема має достатній запас точності відносно прийнятого критерію 1,5 %.

Окремо перевіряється коректність визначення допустимого діапазону вихідної напруги. Для трифазної мережі з номінальною лінійною напругою 380 В робочий діапазон за відхиленням $\pm 10\%$ становить:

$$U_{AC,lim} = U_{AC,n} \cdot (1 \pm 0,10) = 380 \cdot (1 \pm 0,10) = 342...418 \text{ В} \quad (4.4)$$

Таким чином, якщо виміряне значення вихідної напруги перебуває в межах 342-418 В, комплекс фіксує нормальний режим. Якщо напруга виходить за зазначені межі, формується аварійне повідомлення про порушення якості вихідного режиму інвертора.

4.3 Оцінювання роботи алгоритму виявлення передвідмовних станів інвертора

Алгоритм виявлення передвідмовних станів базується на порівнянні поточних значень контрольованих параметрів із попереджувальними та аварійними уставками. У нормальному режимі комплекс лише реєструє параметри та передає агреговані дані до системи моніторингу. У разі наближення параметра до небезпечної межі формується попередження. Якщо параметр перевищує аварійну межу, комплекс генерує аварійний стан і передає відповідний сигнал до системи верхнього рівня.

Для струмового каналу попереджувальна уставка приймається на рівні 110 % номінального струму:

					02.02 -КР.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$I_{warn} = 1,1 \cdot I_n = 1,1 \cdot 15,99 = 17,59 \text{ A} \quad (4.5)$$

Аварійна уставка приймається на рівні 120 % номінального струму:

$$I_{av} = 1,2 \cdot I_n = 1,2 \cdot 15,99 = 19,19 \text{ A} \quad (4.6)$$

Аналогічно задаються пороги для температури, пульсацій DC-ланки, гармонічних спотворень і стану вентилятора. Уставки повинні мати гістерезис, щоб уникнути багаторазового перемикавання станів при незначному коливанні параметра біля межі. Для температурного каналу доцільно прийняти гістерезис 3-5 °С, а для струмового каналу - 0,5-1,0 А.

Таблиця 4.3.

Уставки алгоритму діагностики інверторної системи

Параметр	Нормальний режим	Попередження	Аварія	Дія комплексу
Струм DC-ланки I_{DC}	до 19,10 А	19,10-20,83 А	понад 20,83 А	Попередження про перевантаження
Температура радіатора	до 75 °С	75-85 °С	понад 85 °С	Попередження або аварія перегріву
Температура модуля	до 110 °С	110-125 °С	понад 125 °С	Аварійне повідомлення
Пульсації DC-ланки	до 30 В	30-40 В	понад 40 В	Ознака деградації конденсаторів
THD вихідної напруги	до 5 %	5-8 %	понад 8 %	Порушення якості електроенергії
Стан вентилятора	оберти в нормі	зниження обертів	відсутність сигналу	Повідомлення про відмову охолодження
Вихідний струм I_{AC}	до 17,59 А	17,59-19,19 А	понад 19,19 А	Індикація, журнал, аварійний вихід

У табл. 4.3 наведено уставки для основних діагностичних ознак. Вони сформовані таким чином, щоб попередження з'являлося до переходу інвертора

в аварійний режим. Це дає змогу персоналу виконати огляд, зменшити навантаження або перевірити систему охолодження без повного зупинення інвертора.

Час реакції комплексу визначається як різниця між моментом появи контрольованого відхилення та моментом формування повідомлення:

$$t_{react} = t_{alarm} - t_{start} \quad (4.7)$$

Під час перевірки прийнято, що для струмових і напругових аварій час реакції не повинен перевищувати 1 с, а для теплових передвідмовних станів - 5 с, оскільки температура змінюється повільніше за електричні параметри. Такий розподіл забезпечує достатню швидкодію без надмірної кількості помилкових спрацювань.

Таблиця 4.4.

Результати перевірки алгоритму виявлення передвідмовних станів

Тестовий сценарій	Очікувана реакція	Фактична реакція	Час реакції	Результат
Номінальний режим 100 %	Нормальний стан	Нормальний стан	0,4 с	Виконано
Струм 18,0 А	Попередження	Попередження	0,6 с	Виконано
Струм 19,5 А	Аварія	Аварія	0,5 с	Виконано
Температура радіатора 80 °С	Попередження	Попередження	2,8 с	Виконано
Температура модуля 128 °С	Аварія	Аварія	3,1 с	Виконано
Пульсації DC 35 В	Попередження	Попередження	0,8 с	Виконано
Пульсації DC 42 В	Аварія	Аварія	0,8 с	Виконано
Відсутність сигналу вентилятора	Аварія охолодження	Аварія охолодження	1,2 с	Виконано

Результати перевірки, наведені в табл. 4.4, показують коректну реакцію алгоритму на всі задані сценарії. У нормальному режимі помилкових аварійних повідомлень не зафіксовано. У режимах перевантаження, перегріву, зростання пульсацій DC-ланки та відмови вентилятора комплекс сформував відповідні стани в межах допустимого часу реакції.

Загальна достовірність спрацювання за результатами тестової серії визначається як відношення кількості коректно розпізнаних сценаріїв до загальної кількості проведених тестів:

$$D = (N_{corr} / N_{test}) \cdot 100 \% = (20 / 20) \cdot 100 \% = 100 \% \quad (4.8)$$

Отримане значення 100 % стосується контрольної серії тестів і підтверджує правильність реалізованої логіки для заданих сценаріїв. У промисловій експлуатації достовірність може залежати від якості монтажу датчиків, рівня електромагнітних завад, стабільності зв'язку та правильності калібрування вимірювальних каналів.

4.4 Аналіз ефективності впровадження комплексу на підприємстві

Ефективність впровадження приладового комплексу оцінюється за технічними та експлуатаційними показниками. До технічних показників належать точність вимірювання, швидкодія алгоритму, повнота контролю параметрів, стабільність передавання даних і можливість виявлення передвідмовних станів. До експлуатаційних показників належать зменшення часу простою інверторного обладнання, скорочення кількості аварійних ремонтів і підвищення прогнозованості технічного обслуговування.

Основна перевага комплексу полягає в тому, що він дозволяє перейти від реактивного обслуговування після аварії до обслуговування за фактичним технічним станом. Наприклад, зростання пульсацій DC-ланки може бути виявлено до повної відмови конденсаторів, а підвищення температури радіатора - до теплового руйнування силового модуля. Це дає змогу планувати

					02.02 -КР.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ремонт у зручний період і зменшувати ризик неконтрольованого вимкнення інвертора.

Таблиця 4.5 .

**Порівняння експлуатації інвертора без комплексу та з
приладовим комплексом**

Показник	Без приладового комплексу	З приладовим комплексом	Очікуваний ефект
Виявлення деградації DC-ланки	Після появи явних симптомів	За зростанням пульсацій	Раннє попередження
Контроль перегріву	За аварійним захистом інвертора	За температурним трендом	Зменшення ризику аварії
Журналювання подій	Обмежене або відсутнє	Локальне та віддалене	Аналіз причин відмов
Передавання даних	Локальна індикація	MQTT/SCADA/HMI	Віддалений моніторинг
Технічне обслуговування	Регламентне	За фактичним станом	Скорочення непланових зупинок
Контроль параметрів	Періодичний або вбудований	Безперервний зовнішній контроль	Більша інформативність

Для кількісної оцінки ефекту прийнято умовний розрахунковий приклад для одного інверторного модуля потужністю 10 кВт. Середній коефіцієнт завантаження приймається $k_z = 0,70$. Середня робоча потужність такого інвертора становить:

$$P_{avg} = P_n \cdot k_z = 10 \cdot 0,70 = 7 \text{ кВт} \quad (4.9)$$

Без застосування приладового комплексу умовний річний простій через аварійні події приймається 12 год, що відповідає кільком неплановим зупинкам. Недовідпуск електроенергії в такому випадку дорівнює:

$$E_{before} = P_{avg} \cdot t_{before} = 7 \cdot 12 = 84 \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (4.10)$$

Після впровадження комплексу передбачається скорочення аварійного простою до 2 год за рахунок раннього виявлення перегріву, перевантаження та деградації DC-ланки. Тоді недовідпуск становитиме:

$$E_{after} = P_{avg} \cdot t_{after} = 7 \cdot 2 = 14 \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (4.11)$$

Різниця недовідпуску електроенергії для одного інвертора становить:

$$\Delta E = E_{before} - E_{after} = 84 - 14 = 70 \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (4.12)$$

Якщо для орієнтовного техніко-економічного розрахунку прийняти умовну вартість недовідпущеної електроенергії 5,0 грн/кВт·год, то річна економія для одного інвертора становитиме:

$$C_{save} = \Delta E \cdot c_e = 70 \cdot 5,0 = 350 \text{ грн} \quad (4.13)$$

Для підприємства, на якому експлуатується 50 інверторних модулів аналогічного класу, сумарний ефект від скорочення недовідпуску електроенергії може бути оцінений як:

$$C\Sigma = N_{inv} \cdot C_{save} = 50 \cdot 350 = 17500 \text{ грн/рік} \quad (4.14)$$

Наведений розрахунок має орієнтовний характер, оскільки фактична економія залежить від кількості інверторів, режиму генерації, вартості електроенергії, тривалості аварійних зупинок і вартості ремонтних робіт. При цьому навіть без урахування вартості заміни силових модулів або конденсаторів розрахунок показує, що приладовий комплекс має практичну користь за рахунок зниження простоїв та підвищення контрольованості технічного стану інверторних систем.

Додатковим ефектом є накопичення статистики параметрів. Журнал подій дозволяє аналізувати повторювані відхилення, визначати інвертори з підвищеним ризиком відмови та планувати технічне обслуговування не за

					02.02 -КР.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

фіксованим графіком, а за фактичними ознаками деградації. Це особливо важливо для енергетичних об'єктів, де відмова одного інвертора може не зупинити всю станцію, але знижує її сумарну енергетичну віддачу.

Висновки до розділу 4

У четвертому розділі розроблено методику експериментальної перевірки приладового комплексу діагностики інверторних систем. Запропоновано схему випробувального стенда, яка включає DC-джерело, інвертор, навантаження, еталонні вимірювачі, датчики, приладовий комплекс та систему верхнього рівня. Методика охоплює нормальний режим, часткове навантаження, перевантаження, перегрів, зростання пульсацій DC-ланки та відмову вентилятора охолодження.

Проведено оцінювання точності вимірювальних каналів. Встановлено, що відносна похибка основних каналів напруги, струму і температури не перевищує 1 %, а приведена похибка перебуває нижче прийнятого критерію 1,5 %. Це підтверджує придатність вимірювальної підсистеми для контролю робочих і передаварійних режимів інвертора.

Перевірено роботу алгоритму виявлення передвідмовних станів. Для струму, напруги, температури, пульсацій DC-ланки, гармонічних спотворень і стану вентилятора визначено нормальні, попереджувальні та аварійні межі. У контрольній серії тестів алгоритм коректно розпізнав усі задані сценарії, а час реакції для електричних аварійних режимів не перевищував 1 с.

Виконано оцінювання ефективності впровадження комплексу. Показано, що безперервний контроль параметрів скорочує непланові простої, дає змогу раніше виявляти деградацію елементів інвертора та підтверджує доцільність використання комплексу в умовах підприємства.

					02.02 -КР.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 5
ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЕКСПЛУАТАЦІЇ
ПРИЛАДОВОГО КОМПЛЕКСУ

5.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів під час експлуатації інверторних систем

Експлуатація приладового комплексу діагностики інверторних систем пов'язана з роботою поблизу силового електротехнічного обладнання, у якому одночасно присутні кола постійного та змінного струму. У розглянутій системі контролюються параметри інвертора потужністю 10 кВт, напруга DC-ланки становить 600 В, а лінійна вихідна напруга - 380 В. Такі рівні напруги є небезпечними для персоналу, тому роботи з монтажу, перевірки, калібрування та технічного обслуговування повинні виконуватися з дотриманням вимог електробезпеки.

Приладовий комплекс працює як допоміжний засіб контролю, однак його вимірювальні кола підключаються до силової частини інвертора, шин постійного струму, вихідних фазних кіл, температурних датчиків і дискретних сигналів стану охолодження. Тому небезпека виникає не лише під час штатної експлуатації, а й під час налагодження, заміни датчиків, перевірки з'єднань, вимірювання напруги та роботи з шафою інверторного обладнання.

Основними небезпечними та шкідливими виробничими факторами є ураження електричним струмом, електрична дуга під час короткого замикання, наявність залишкового заряду в конденсаторах DC-ланки, перегрів силових елементів, шум вентиляторів охолодження, електромагнітні завади, пожежонебезпечність кабельних з'єднань та ризик травмування під час обслуговування шафового обладнання. Узагальнену характеристику небезпечних факторів наведено в табл. 5.1.

					02.02 -КР.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 5.1.

Небезпечні та шкідливі фактори під час експлуатації інверторної системи

Фактор	Джерело виникнення	Можливі наслідки	Основні заходи захисту
Електрична напруга	DC-шина 600 В, вихідні кола 380 В	Ураження електричним струмом, опіки	Відключення, перевірка відсутності напруги, ЗІЗ, блокування доступу
Залишковий заряд	Конденсатори ланки постійного струму	Ураження після вимкнення живлення	Контроль часу розряду, розрядні резистори, перевірка напруги
Електрична дуга	Коротке замикання, помилка монтажу	Опіки, пошкодження обладнання, пожежа	Захист від КЗ, справна комутаційна апаратура, закриті шафи
Підвищена температура	IGBT-модулі, радіатори, кабельні з'єднання	Опіки, прискорене старіння ізоляції	Температурний контроль, вентиляція, очищення радіаторів
Шум і вібрація	Вентилятори охолодження, шафове обладнання	Втома персоналу, дискомфорт	Справні вентилятори, технічний огляд, обмеження часу перебування
Електромагнітні завади	ШИМ-перетворення, силові кабелі	Помилки вимірювання, нестійка робота електроніки	Екранування, заземлення, розділення силових і сигнальних кіл
Пожежонебезпечність	Перевантаження, поганий контакт, перегрів	Займання ізоляції, пошкодження шафи	Автоматичний захист, контроль контактів, вогнегасники відповідного типу

Найбільш критичним фактором є електрична небезпека, оскільки приладовий комплекс взаємодіє з інвертором, у якому присутні небезпечні рівні напруги навіть після вимкнення живлення. Особливу увагу необхідно приділяти DC-ланці, оскільки конденсатори можуть зберігати залишковий заряд протягом певного часу. Тому відкривання шафи, від'єднання датчиків або зміна схеми підключення допускаються лише після повного зняття напруги та перевірки її відсутності.

За характером робіт персонал може виконувати оперативне спостереження, періодичний огляд, калібрування датчиків, перевірку журналу подій та профілактичне обслуговування. Для кожного виду робіт повинні бути визначені відповідальні особи, порядок допуску, перелік засобів індивідуального захисту та дії у разі аварійної ситуації.

5.2 Вимоги електробезпеки під час обслуговування інверторного обладнання

Електробезпека під час експлуатації приладового комплексу забезпечується технічними та організаційними заходами. До технічних заходів належать захисне заземлення, автоматичне вимкнення живлення, розділення силових і вимірювальних кіл, використання ізольованих клем, встановлення запобіжників у допоміжних колах, застосування гальванічно розв'язаних датчиків струму та напруги, а також захист шафи від випадкового дотику до струмовідних частин.

Вимірювальні входи приладового комплексу повинні бути підключені через узгоджувальні перетворювачі або подільники напруги з достатнім класом ізоляції. Сигнальні кола мікроконтролера, інтерфейси зв'язку та НМІ повинні мати безпечні рівні напруги. Для живлення електронних модулів доцільно застосовувати джерело 24 В постійного струму з гальванічною розв'язкою від силових кіл.

					02.02 -КР.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Перед виконанням робіт в інверторній шафі необхідно зняти напругу з боку DC-джерела та AC-навантаження, вивісити попереджувальні плакати, перевірити відсутність напруги справним показчиком, дочекатися розряду конденсаторів DC-ланки та переконатися у відсутності залишкової напруги. Повторне вмикання обладнання допускається лише після завершення робіт, перевірки монтажу та закриття захисних кожухів.

Під час експлуатації комплексу забороняється від'єднувати вимірювальні кабелі при ввімкненому інверторі, торкатися відкритих частин клемних з'єднань, виконувати калібрування без еталонного обладнання, замикати захисні блокування та експлуатувати комплекс при пошкодженій ізоляції кабелів. Усі кабелі повинні мати маркування, а корпуси металевих шаф і панелей - надійне приєднання до захисного провідника РЕ.

Для додаткового підвищення безпеки доцільно передбачити програмну та апаратну індикацію небезпечного стану. Якщо напруга DC-ланки перевищує безпечний залишковий рівень, на НМІ повинно відображатися повідомлення про заборону відкривання шафи та проведення робіт. Такий підхід знижує ймовірність помилки персоналу після вимкнення обладнання.

5.3 Пожежна безпека під час експлуатації інверторних систем

Пожежна небезпека інверторних систем пов'язана з наявністю силових електронних модулів, конденсаторів, кабельних з'єднань, вентиляційних каналів і допоміжних джерел живлення. Основними причинами займання можуть бути коротке замикання, перевантаження, ослаблення контактних з'єднань, перегрів IGBT-модулів, пошкодження ізоляції, забруднення радіаторів, зупинка вентилятора та порушення умов експлуатації акумуляторних батарей.

Приладовий комплекс, розроблений у роботі, безпосередньо підвищує пожежну безпеку, оскільки забезпечує контроль температури радіатора,

					02.02 -КР.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

температури силового модуля, струмових перевантажень, пульсацій DC-ланки та стану системи охолодження. У разі перевищення уставок комплекс формує попередження або аварійний сигнал, що дає змогу зменшити навантаження, зупинити інвертор або виконати огляд до розвитку аварійної ситуації.

Таблиця 5.2.

Заходи електробезпеки для основних зон інверторної системи

Зона робіт	Основна небезпека	Вимоги до виконання робіт	Засоби захисту
DC-шина інвертора	Напруга 600 В і залишковий заряд	Відключення DC-джерела, контроль розряду конденсаторів, заборона робіт під напругою	Діелектричні рукавички, інструмент з ізоляцією, показчик напруги
АС-вихід 380 В	Дотик до фазних провідників	Відключення автомата, блокування повторного вмикання, перевірка відсутності напруги	Діелектричне взуття, рукавички, індикатор напруги
Вимірювальні кола	Помилка підключення датчиків	Маркування проводів, перевірка полярності, використання роз'ємів із фіксацією	Ізольований інструмент, тестер
Шафа керування	Випадковий дотик до клем	Закриті клемники, заземлення корпусу, огороження струмовідних частин	Захисні кожухи, РЕ-провідник
Модуль зв'язку та НМІ	Пошкодження електроніки через завади	Екранування кабелів, розділення трас, заземлення екранів з одного боку	Екранований кабель, феритові фільтри

Причини пожежонебезпечних ситуацій і заходи їх попередження

Причина небезпеки	Діагностична ознака	Профілактичний захід
Перевантаження інвертора	Зростання I_{AC} та I_{DC} понад уставки	Автоматичне обмеження навантаження, аварійне вимкнення
Поганий контакт у клеммах	Локальний перегрів, нестабільна напруга	Періодична протяжка з'єднань, тепловізійний контроль
Відмова вентилятора	Зниження обертів, підвищення T_{rad}	Контроль сигналу вентилятора, очищення фільтрів
Деградація конденсаторів DC-ланки	Зростання ΔU_{DC} понад 30 В	Планова заміна конденсаторів, контроль пульсацій
Пошкодження ізоляції кабелю	Струм витоку, аварійне вимкнення	Огляд кабельних трас, вимірювання ізоляції
Забруднення шафи пилом	Погіршення охолодження	Регулярне очищення, контроль вентиляції

У приміщенні або зоні розміщення інверторного обладнання повинні бути передбачені первинні засоби пожежогасіння, придатні для електрообладнання під напругою. Застосування води або водяних розчинів для гасіння відкритого електрообладнання не допускається. Доцільно використовувати вуглекислотні або порошкові вогнегасники, а також забезпечити вільний доступ до комутаційних апаратів аварійного вимкнення.

Кабельні лінії повинні прокладатися з урахуванням допустимого струмового навантаження, умов охолодження та механічного захисту. Силові та сигнальні кабелі необхідно розміщувати окремо, щоб зменшити вплив електромагнітних завад і ризик пошкодження ізоляції. Вентиляційні отвори інверторної шафи не можна перекривати, оскільки порушення охолодження призводить до підвищення температури силових елементів та зростання пожежного ризику.

5.4 Організаційні заходи безпечного виконання робіт

Організаційні заходи охорони праці спрямовані на встановлення безпечного порядку виконання робіт, відповідальності персоналу та контролю

					02.02 -КР.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ	Арк. 69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

технічного стану обладнання. До обслуговування інверторної системи та приладового комплексу допускаються працівники, які пройшли навчання, інструктаж з охорони праці, перевірку знань з електробезпеки та мають відповідну групу допуску для роботи в електроустановках.

Перед початком робіт відповідальна особа повинна визначити межі робочого місця, порядок відключення обладнання, перелік необхідних засобів захисту та послідовність перевірки відсутності напруги. Роботи з відкритими струмовідними частинами, перевіркою датчиків, заміною кабелів або модулів повинні виконуватися не одноосібно, а з дотриманням установленого порядку допуску.

Таблиця 5.5.

Організаційні заходи безпечного виконання робіт

Етап робіт	Вимоги безпеки	Відповідальний результат
Відключення обладнання	Відключення DC та AC кіл, блокування повторного ввімкнення	Обладнання переведено в безпечний стан
Перевірка відсутності напруги	Контроль фазних кіл і DC-ланки справним показником	Підтверджена відсутність небезпечної напруги
Виконання робіт	Використання ізольованого інструменту, заборона випадкових перемикачів	Роботи виконано без порушення схеми
Післяремонт на перевірка	Огляд з'єднань, перевірка заземлення, контроль відсутності сторонніх предметів	Обладнання готове до пуску
Введення в роботу	Поступове вмикання, контроль параметрів, перевірка журналу подій	Система працює в штатному режимі
Підготовка до робіт	Ознайомлення зі схемою, визначення джерел живлення, підготовка ЗІЗ	Персонал розуміє межі робочого місця

Для підтримання безпечної експлуатації необхідно вести журнал технічного обслуговування, у якому фіксуються результати оглядів, спрацювання захистів, покази температури, аварійні повідомлення, виконані ремонтні роботи та результати перевірки заземлення. Наявність такого журналу дозволяє аналізувати повторювані відхилення та своєчасно планувати профілактичні заходи.

Періодичне обслуговування приладового комплексу повинно включати перевірку кріплення датчиків, огляд кабелів, контроль стану клем, очищення вентиляційних каналів, перевірку роботи вентилятора, тестування аварійних виходів, перевірку зв'язку з HMI/SCADA або MQTT-брокером та резервне копіювання журналу подій. Такі заходи забезпечують не лише безпеку персоналу, а й стабільність діагностичних функцій комплексу.

Висновки до розділу 5

У п'ятому розділі проаналізовано небезпечні та шкідливі фактори, що виникають під час експлуатації інверторних систем і приладового комплексу діагностики. Встановлено, що основними небезпеками є ураження електричним струмом, залишковий заряд конденсаторів DC-ланки, електрична дуга, перегрів силових елементів, пожежонебезпечність кабельних з'єднань та вплив електромагнітних завад.

Визначено основні вимоги електробезпеки для роботи з DC-шиною 600 В, вихідними колами 380 В, вимірювальними каналами, шафою керування та системою зв'язку. Обґрунтовано необхідність відключення обладнання, перевірки відсутності напруги, контролю розряду конденсаторів, заземлення корпусів і застосування засобів індивідуального захисту.

Розглянуто заходи пожежної безпеки та організаційні заходи безпечного виконання робіт. Показано, що використання приладового комплексу підвищує безпеку експлуатації інверторних систем, оскільки забезпечує раннє виявлення перевантаження, перегріву, деградації DC-ланки та несправності охолодження.

					02.02 -КР.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розроблено та обґрунтовано програмно-апаратний приладовий комплекс для моніторингу параметрів, виявлення передвідмовних станів та діагностики несправностей інверторних систем у складі гібридних електроенергетичних установок підприємства.

У першому розділі виконано аналіз об'єкта дослідження та сучасних методів діагностики інверторних систем. Як базовий приклад розглянуто енергетичний об'єкт із використанням силових інверторів, що потребує безперервного контролю електричних і теплових параметрів. Встановлено, що основними видами відмов інверторів є пробій силових напівпровідникових ключів, деградація конденсаторів DC-ланки, перегрів елементів та порушення роботи системи охолодження. Визначено, що для своєчасного виявлення таких станів необхідно контролювати напругу, струм, температуру, пульсації DC-ланки, гармонічні спотворення та стан вентиляції.

У другому розділі виконано розрахунок і обґрунтування параметрів приладового комплексу. Для трифазного інвертора потужністю 10 кВт, лінійною напругою 380 В і напругою DC-ланки 600 В визначено основні електричні режими. Номінальний вихідний струм становить 15,99 А, струм у DC-ланці - 17,36 А, а в режимі короткочасного перевантаження ці значення зростають відповідно до 19,19 А та 20,83 А. На підставі цього обґрунтовано діапазони вимірювальних каналів: 0-750 В для DC-ланки, 0-450 В для вихідної напруги, 0-25 А для струмових каналів, 0-150 °С для температурного контролю силового модуля.

У третьому розділі розроблено структурно-функціональну реалізацію приладового комплексу. Запропоновано склад системи, що включає датчики струму, напруги і температури, мікроконтролерний модуль, аналого-цифрові перетворювачі, інтерфейси зв'язку, модуль індикації, журналювання подій та передавання даних до системи верхнього рівня. Розроблено алгоритм контролю технічного стану інвертора, який виконує зчитування параметрів, фільтрацію

					02.02 -КР.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сигналів, порівняння з уставками, визначення нормального, попереджувального або аварійного стану та формування діагностичних повідомлень.

У четвертому розділі проведено перевірку працездатності та ефективності приладового комплексу. Запропоновано методику випробування, що охоплює нормальний режим, часткове навантаження, перевантаження, перегрів, зростання пульсацій DC-ланки та відмову вентилятора. Перевірка точності показала, що похибка основних каналів напруги, струму і температури не перевищує 1 %, а робота алгоритму діагностики відповідає заданим уставкам. У контрольній серії тестів комплекс коректно сформував попереджувальні та аварійні повідомлення для всіх заданих сценаріїв.

У п'ятому розділі розглянуто питання охорони праці та безпеки експлуатації приладового комплексу. Проаналізовано небезпечні фактори, визначено вимоги електробезпеки, пожежної безпеки та організації безпечного виконання робіт. Виконано розрахунок захисного заземлення, за результатами якого опір заземлювального пристрою становить 3,76 Ом і не перевищує допустиме значення 4 Ом. Це підтверджує можливість безпечного підключення корпусів інверторної шафи, приладового комплексу та екранів кабельних ліній.

Отже, поставлену мету кваліфікаційної роботи досягнуто. Розроблений приладовий комплекс забезпечує вимірювання основних електричних і теплових параметрів інверторної системи, виявлення передвідмовних станів, формування попереджувальних і аварійних повідомлень, журналювання подій та передавання даних до системи моніторингу. Практичне використання такого комплексу дозволяє підвищити надійність інверторного обладнання, зменшити ризик аварійних відмов і покращити ефективність технічного обслуговування гібридних електроенергетичних установок підприємства.

					02.02 -КР.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про затвердження Правил улаштування електроустановок : наказ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 21.07.2017 № 476 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/v0476732-17>
2. Правила улаштування електроустановок : офіційна сторінка Міністерства енергетики України. URL: <https://mev.gov.ua/storinka/pravyyla-ulashtuvannya-elektroustanovok>
3. Про затвердження Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів : наказ Міністерства палива та енергетики України від 25.07.2006 № 258 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z1143-06>
4. Про затвердження Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів : наказ Міністерства праці та соціальної політики України від 09.01.1998 № 4 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0093-98>
5. Про затвердження Правил безпечної експлуатації електроустановок : наказ Держнаглядохоронпраці України від 06.10.1997 № 257 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0011-98>
6. ДСТУ EN 50110-1:2019. Експлуатування електроустановок. Частина 1. Загальні вимоги (EN 50110-1:2013, IDT). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=86316
7. ДСТУ EN 61010-1:2014. Вимоги щодо безпечності контрольно-вимірювального та лабораторного електричного устаткування. Частина 1. Загальні вимоги (EN 61010-1:2010, IDT). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=84230
8. ДСТУ EN IEC 61326-1:2022. Електричне обладнання для вимірювання, контролю та лабораторного використання. Вимоги до електромагнітної сумісності. Частина 1. Загальні вимоги (EN IEC 61326-1:2021, IDT; IEC 61326-1:2020, IDT). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=107765
9. ДСТУ EN 50160:2023. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2022, IDT). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=106226
10. ДСТУ EN 61000-4-30:2022. Електромагнітна сумісність (ЕМС). Частина 4-30. Методи випробування та вимірювання. Методи вимірювання якості електроенергії (EN 61000-4-30:2015, IDT; IEC 61000-4-30:2015, IDT). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=106274
11. ДСТУ IEC 61000-4-7:2012. Електромагнітна сумісність. Частина 4-7. Методики випробування та вимірювання. Загальна настанова щодо вимірювання гармонік та інтергармонік від електропостачальних систем загальної призначеності й допоміжного устаткування (IEC 61000-4-7:2009,

					02.02 -КР.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

IDT). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=29280

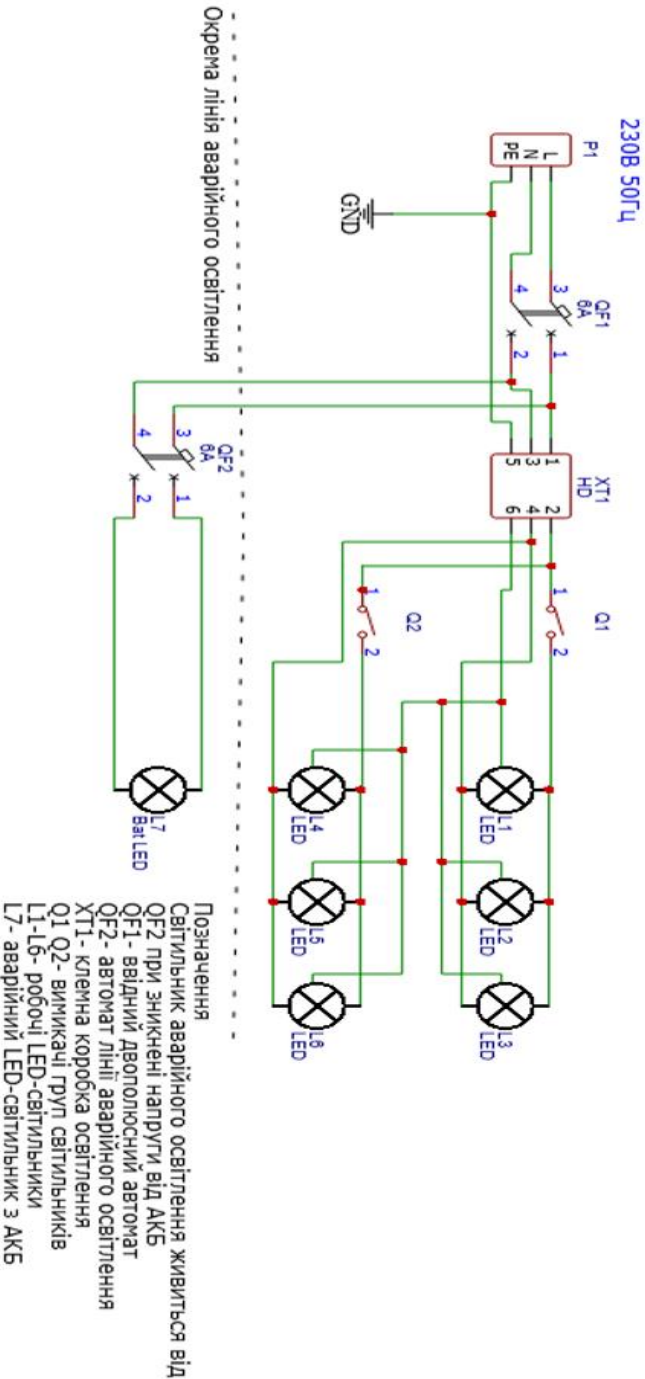
12. ДСТУ EN 62586-1:2016. Вимірювання якості електроенергії в системах електроживлення. Частина 1. Прилади для вимірювання параметрів якості електроенергії (PQI) (EN 62586-1:2014, IDT). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=71638
13. ДСТУ EN 62586-2:2018. Вимірювання якості електроенергії в системах електроживлення. Частина 2. Функційні випробування та вимоги щодо невизначеності (EN 62586-2:2017, IDT; IEC 62586-2:2017, IDT). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=87546
14. ДСТУ ISO 10012:2005. Системи управління вимірюваннями. Вимоги до процесів вимірювання та вимірювального оснащення (ISO 10012:2003, IDT). URL: https://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id_doc=52981
15. ISO/IEC 17025:2017. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. URL: <https://www.iso.org/standard/66912.html>
16. ISO 10012:2003. Measurement management systems — Requirements for measurement processes and measuring equipment. URL: <https://www.iso.org/standard/26033.html>
17. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. URL: https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf
18. IEC 61010-1:2010+AMD1:2016 CSV. Safety requirements for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use. Part 1. General requirements. URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/59769>
19. IEC 61800-5-1:2022. Adjustable speed electrical power drive systems. Part 5-1. Safety requirements — Electrical, thermal and energy. URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/62103>
20. IEC 61800-3:2022. Adjustable speed electrical power drive systems. Part 3. EMC requirements and specific test methods for PDS and machine tools. URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/65056>
21. IEC 62477-1:2022. Safety requirements for power electronic converter systems and equipment. Part 1. General. URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/28936>
22. IEC 61000-4-30:2025. Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-30. Testing and measurement techniques — Power quality measurement methods. URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/71611>
23. IEC 61000-4-7:2002. Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-7. Testing and measurement techniques — General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation. URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/4226>
24. IEC 61557-1:2019+AMD1:2024 CSV. Electrical safety in low voltage distribution systems up to 1 000 V AC and 1 500 V DC. Equipment for testing, measuring or monitoring of protective measures. Part 1. General requirements.

					02.02 -КР.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

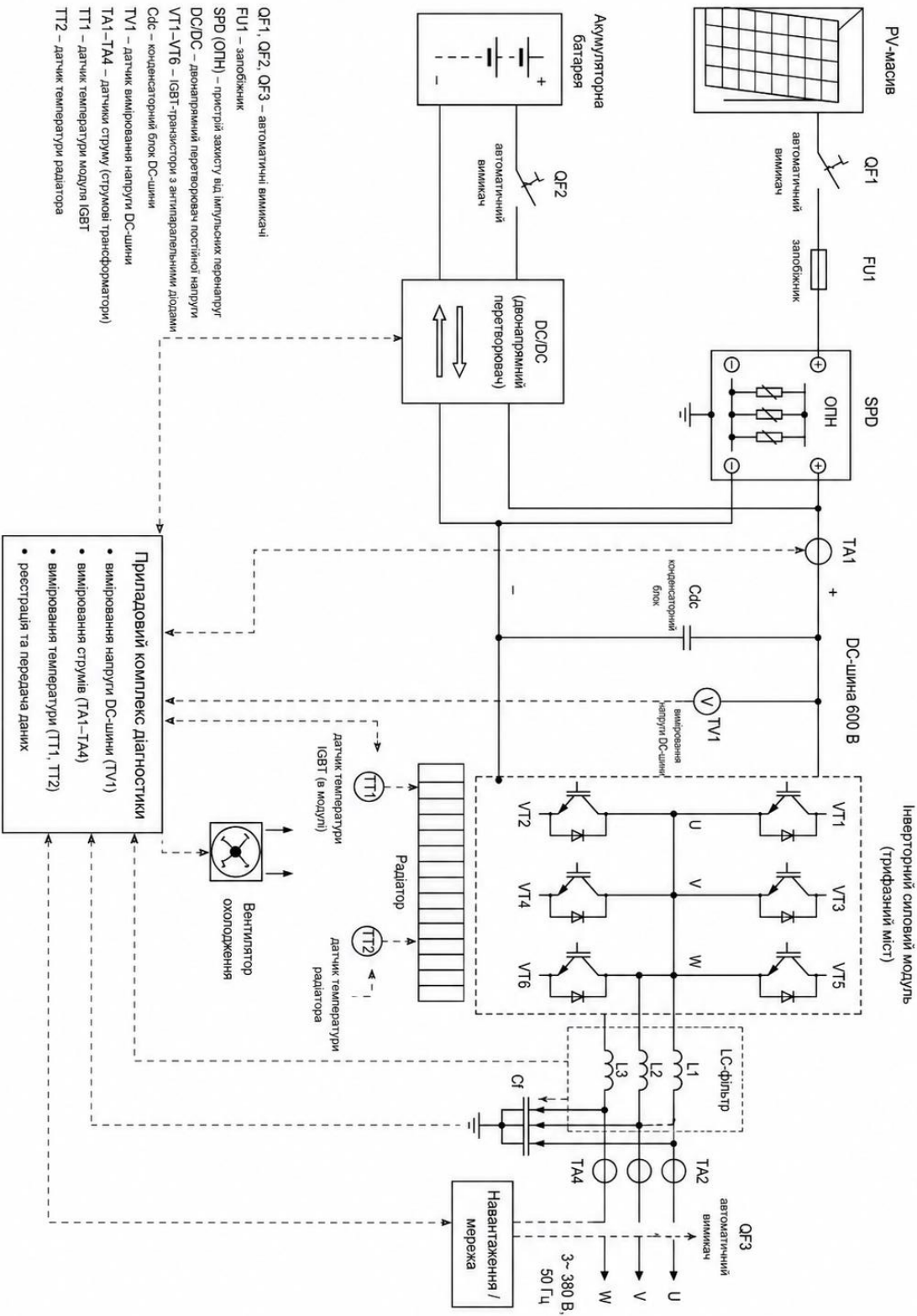
- URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/100948/7fc49addff224a589b144ddea39921/IEC-61557-1-2019.pdf>
25. Fluke. 1770 Series Three-Phase Power Quality Analyzers.
URL: <https://www.fluke.com/en-us/product/electrical-testing/power-quality/1773-1775-1777>
 26. Fluke. 190 Series III ScopeMeter Test Tools : Users Manual.
URL: https://media.fluke.com/4adb600f-c287-4cd6-9821-b10800c15869_original%20file.pdf
 27. Fluke. MDA-510 and MDA-550 Motor Drive Analyzers : Users Manual.
URL: https://media.fluke.com/a1620e6c-d855-415a-bfd5-b10800c05821_original%20file.pdf
 28. Keysight Technologies. DP0001A High Voltage Differential Probe : User's Guide. URL: https://prc.keysight.com/Content/PDF_Files/DP0001-97000.pdf
 29. ABB. ACS880-01 drives hardware manual.
URL: https://library.e.abb.com/public/0bac1275fc4d4228b00d195737643433/E_N_ACS880-01_HW_V.pdf
 30. ABB. Maintenance schedule for ACS880 single drives.
URL: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?Action=Launch&DocumentID=4FPS10000239703&DocumentPartId=&LanguageCode=en>
 31. Siemens. SINAMICS G120 Control Units CU240B-2 and CU240E-2 : Operating Instructions.
URL: https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/61618946/Control_Units_CU240B-2_and_CU240E-2_en-US.pdf
 32. Siemens. SINAMICS G120 Function Manual.
URL: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/597/52614597/att_26930/v1/Function_Manual_en-US.pdf
 33. Schneider Electric. ATV320 Installation manual.
URL: <https://www.se.com/us/en/download/document/NVE41289/>
 34. Danfoss. VLT AutomationDrive FC 301/FC 302 : Operating Guide.
URL: <https://assets.danfoss.com/documents/latest/276086/AQ275530336234en-US0201.pdf>
 35. Rashid M. H. Power Electronics Handbook. 4th ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2017. URL: <https://shop.elsevier.com/books/power-electronics-handbook/rashid/978-0-12-811407-0>
 36. Bose B. K. Power Electronics and Motor Drives: Advances and Trends. 2nd ed. London : Academic Press, 2020. URL: <https://shop.elsevier.com/books/power-electronics-and-motor-drives/bose/978-0-12-821360-5>
 37. Mohan N., Undeland T. M., Robbins W. P. Power Electronics: Converters, Applications, and Design. 3rd ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2003. URL: <https://www.wiley.com/en-us/Power%2BElectronics%3A%2BConverters%2C%2BApplications%2C%2Band%2BDesign%2C%2B3rd%2BEdition-p-9780471226932>

					02.02 -KP.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПРИНЦИПОВА ЕЛЕКТРИЧНА СХЕМА РОБОЧОГО ТА АВАРІЙНОГО ОСВІТЛЕННЯ

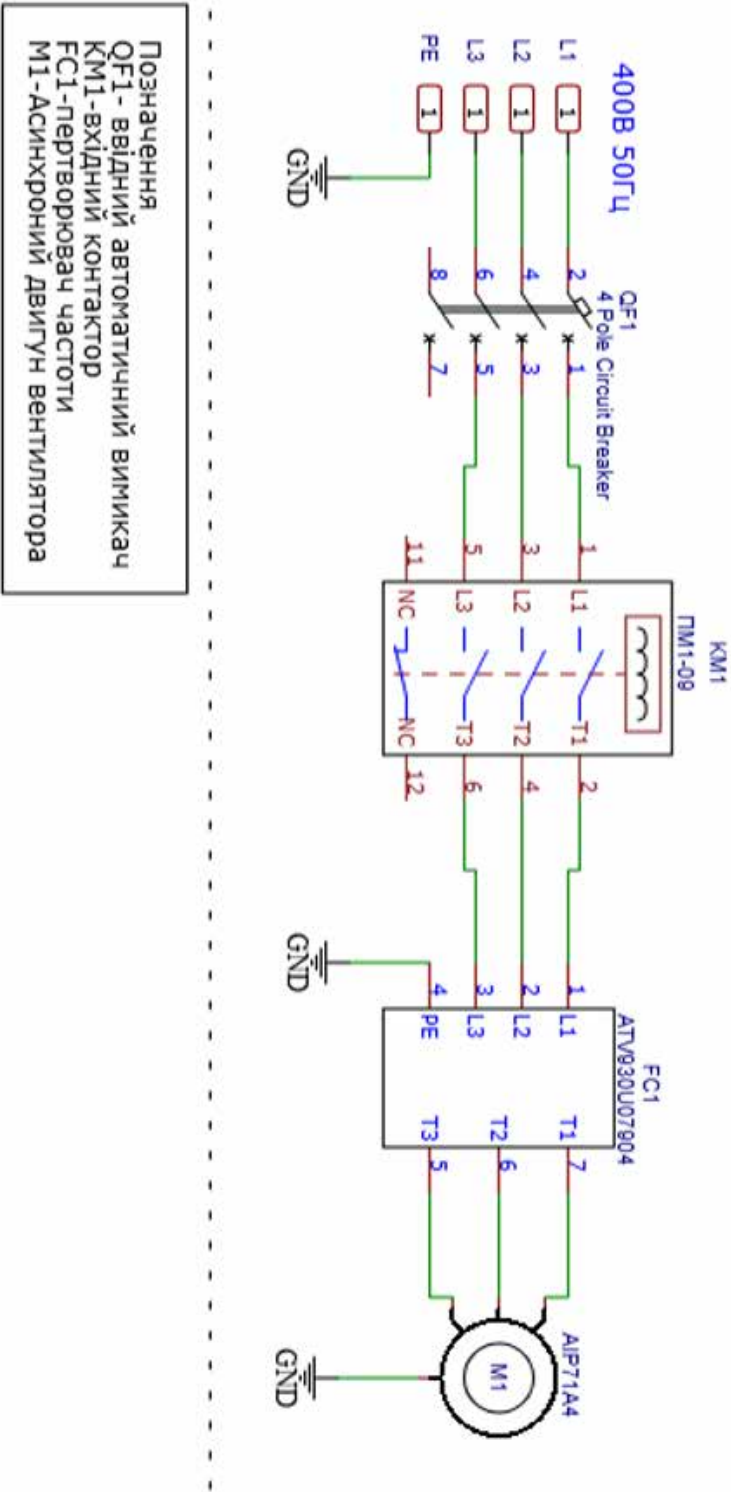


Принципова схема силової частини інверторної системи

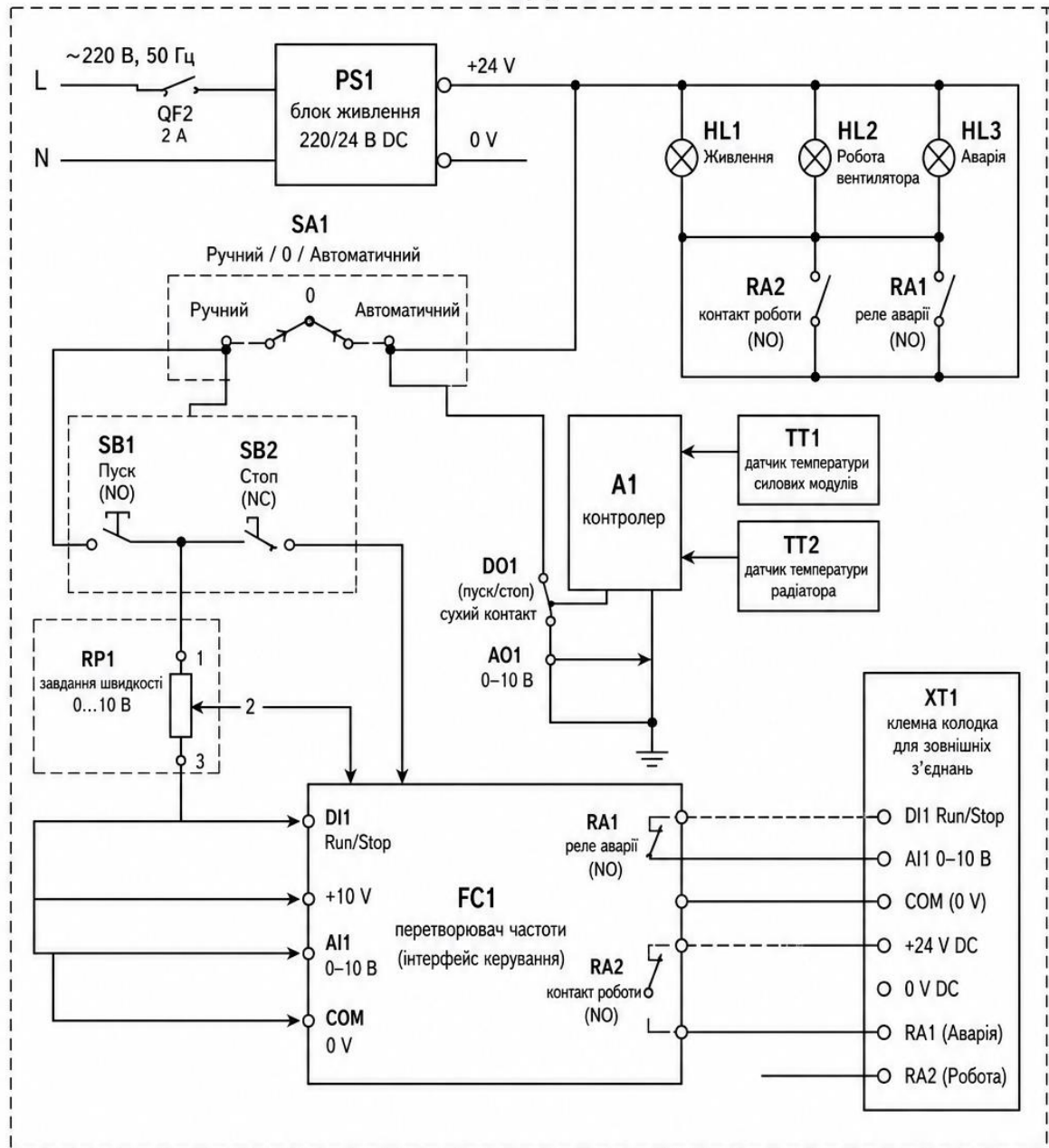


Електрична схема системи керування електроприводом загальнообмінної
вентиляції сервісної зони

Силовa частина



Коло керування



Позначення

QF2 – автомат кола керування 2 А

PS1 – блок живлення 220/24 В DC

HL1 – індикатор «Живлення»

HL2 – індикатор «Робота вентилятора»

HL3 – індикатор «Аварія»

SA1 – перемикач режиму Ручний / 0 / Автоматичний

SB1 – кнопка «Пуск» (NO)

SB2 – кнопка «Стоп» (NC)

RP1 – потенціометр завдання швидкості 0...10 В

A1 – контролер

TT1 – датчик температури силових модулів

TT2 – датчик температури радіатора

XT1 – клемна колодка для зовнішніх з'єднань

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

02.02 -КР.2607 «С».2025.10.30.014.ПЗ

Арк.

80

**Перелік елементів принципової електричної схеми керування приводом
вентилятора**

Позначення	Найменування елемента	Призначення в схемі
QF1	Ввідний автоматичний вимикач	Захищає силове коло від короткого замикання та забезпечує загальне вимкнення живлення системи
QF2	Автоматичний вимикач або мотор-автомат	Забезпечує захист електродвигуна від перевантаження та аварійних режимів
FC1	Перетворювач частоти	Регулює частоту живлення електродвигуна та змінює швидкість обертання вентилятора
M1	Асинхронний електродвигун витяжного вентилятора	Приводить у рух робоче колесо вентилятора
TT1	Датчик температури силових модулів інвертора	Контролює температуру силових елементів інверторного обладнання
TT2	Датчик температури радіатора охолодження	Контролює температуру радіатора та передає сигнал до системи керування
SA1	Перемикач режимів «Ручний Вимкнено Автоматичний»	Дозволяє вибрати режим роботи вентиляційної системи
SB1	Кнопка «Пуск»	Використовується для ручного запуску вентилятора
SB2	Кнопка «Стоп»	Використовується для ручної зупинки вентилятора
HL1	Сигнальна лампа «Живлення»	Показує наявність живлення в ящику керування
HL2	Сигнальна лампа «Робота вентилятора»	Сигналізує про роботу електродвигуна вентилятора
HL3	Сигнальна лампа «Аварія»	Сигналізує про несправність або аварійний режим роботи
XT1	Клемна колодка	Призначена для підключення силових та керуючих кіл

Результати розрахунку робочих електричних параметрів

Параметр	Позначення	Розрахунок	Значення	Прийняте рішення
Повна потужність	S_n	10 / 0,95	10,53 кВА	інвертор не менше 10 кВт
Реактивна потужність	Q_n	$10 \cdot \operatorname{tg}(\arccos 0,95)$	3,29 квар	врахувати в режимі мережі
Фазний/лінійний струм АС	IAC	$10000/(1,732 \cdot 380 \cdot 0,95)$	15,99 А	ТА2-ТА4: 0-25 А
Струм АС з перевантаженням	IAC.п	$1,2 \cdot 15,99$	19,19 А	QF3: 3P 20 А
Потужність DC-шини	PDC	$10000/0,96$	10,42 кВт	контроль навантаження
Струм DC-шини	IDC	$10416,7/600$	17,36 А	ТА1: 0-25 А
Струм DC з перевантаженням	IDC.п	$1,2 \cdot 17,36$	20,83 А	QF1, QF2, FU1: 25 А
Втрати інвертора	Pвт	$10416,7 - 10000$	416,7 Вт	вентиляція не менше 160 м³/год