

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Гужа Марія Олександрівна

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Система моніторингу перехідних режимів при проектуванні гібридної системи
електропостачання фермерського господарства
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня бакалавр

кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання
ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Гужа М.О.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Яковенко Віталій Адольфович

(прізвище, ім'я, по батькові)

к.т.н., доцент кафедри електрифікації,

автоматизації виробництва та інженерної екології

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2026

АНОТАЦІЯ

Гужа М.О. Система моніторингу перехідних режимів при проектуванні гібридної системи електропостачання фермерського господарства. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2026.

Метою даної роботи є удосконалення систем електропостачання господарств АПК за рахунок застосування нових алгоритмів та апаратних комплексів.

Предметом дослідження являється система моніторингу перехідних процесів гібридних систем електропостачання.

Ключові слова: моніторинг перехідних процесів, гібридні системи електропостачання, технічні вимоги проекту.

ABSTRACT

Guzha M.O. System for monitoring transient regimes when designing a hybrid power supply system for a farm. Qualification work for obtaining a bachelor's degree in specialty 141 - Electric power, electrical engineering and electromechanics - Polissia National University, Zhytomyr, 2026.

The purpose of this work is to improve the power supply systems of agricultural enterprises through the use of new algorithms and hardware complexes.

The subject of the study is the system for monitoring transient processes of hybrid power supply systems.

Keywords: monitoring transient processes, hybrid power supply systems, technical requirements of the project.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ АПК	7
1.1. Загальні проблеми електропостачання АПК станом на 2026 рік.	7
1.2. Сучасні вимоги до проектування гібридної системи електропостачання фермерського господарства	9
Висновки по розділу 1	14
РОЗДІЛ 2 ПРИРОДА ВИНИКНЕННЯ ПРОБЛЕМ ГСЕ	15
2.1. Природа виникнення проблем ГСЕ підприємств АПК	15
2.2. Завдання підвищення надійності ГСЕ фермерського господарства	16
Висновки по розділу 2	19
РОЗДІЛ 3 ТЕХНІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЄКТУ ЕНЕРГОВУЗЛА АПК	29
3.1. Проєкт технічних вимог комплексної системи управління та моніторингу ГЕС фермерського господарства	29
3.2. Якість заземлення та захисту від імпульсних перенапруг	31
3.3. Особливості релейного захисту у мережах з локальними джерелами енергії	
3.4. Обмеження струмів короткого замикання в мережах з ВДЕ	
3.5. Економічна доцільність впровадження СМПР – в локальних мережах фермерських господарств	
Висновки по розділу 3	36
ВИСНОВКИ	37
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	39

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АПК - агропромисловий комплекс;

ВДЕ – відновлювані джерела енергії;

ВЕС – вітрова електростанція;

ГСЕ - гібридні системи електропостачання

ЕЕС – електроенергетичні системи;

КСР – кодекс системи розподілу;

ЛЕП – лінія електропередачі;

НВДЕ – нетрадиційні та відновлювані джерела енергії;

ОЕС – об'єднана енергетична система;

РГ – розосереджена генерація;

СЕЗ – система енергозабезпечення;

СЕП – система електропостачання;

СЕС – сонячна електростанція;

СМІР - система моніторингу перехідних режимів (WAMS — Wide Area Measurement Systems);

ТКУ (КРПТ) - тиристорні конденсаторні установки ;

ШАВР (STS) – швидкісне автоматичне введення резерву

BESS – установки зберігання (накопичення) енергії;

EMS (Energy Management System) — система керування енергією;

PMU - пристрої синхронізованих векторних вимірювань;

Smart Grid - інтелектуальні мережі;

SVC - статичний тиристорний компенсатор реактивної потужності;

STATCOM / SVG - синхронний статичний компенсатор, активний фільтр-компенсатор ;

FACTS (Flexible Alternative Current Transmission System) - гнучкі керовані системи електропередачі змінного струму.

ВСТУП

Актуальність роботи

Станом на 2026 рік агропромисловий комплекс (АПК) України функціонує в умовах **глибокої трансформації енергетичного сектору**. Масовані пошкодження магістральних мереж, дефіцит генеруючих потужностей у системі (що сягає в середньому 10%) та децентралізація генерації змушують агропідприємства масово переходити на локальні гібридні системи електропостачання (ГСЕ).

Трансформація енергетичного сектору України у 2026 році перейшла від етапу «екстреного виживання» до масштабної системної перебудови. Головний вектор розвитку — створення принципово нової архітектури енергосистеми, яка базується на децентралізації, високій гнучкості та інтеграції з європейським ринком споживання. Стара радянська модель (великі електростанції та магістральні ЛЕП) заміщується **розподіленою енергетичною системою** з урахуванням довгострокових екологічних цілей Євросоюзу (Green Deal).

Відбувається масове впровадження моторних генераторних установок малої потужності так і установок потужністю від 1 до 50 МВт поблизу споживачів (комунальні підприємства, великі заводи, кластери АПК) та сучасних відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) які виконують роль базової та маневрової генерації, замінюючи вугільні блоки. Це мінімізує втрати у мережах та ризики одночасного знеструмлення регіонів. Бізнес (промислові СЕС) та населення (просьюмери) масово стали активним учасником ринку. Промислові підприємства будують власні сонячні станції (СЕС) не лише для компенсації власного споживання, а й для продажу надлишків у мережу за ринковими цінами.

Відбуваються масштабні розгортання систем накопичення енергії (BESS). «Укренерго» активно використовує комерційні BESS для надання допоміжних послуг (первинне та вторинне регулювання частоти). Це дозволило частково вирішити проблему нестабільності ВДЕ (сонця та вітру). Стандартом для середнього та великого бізнесу стало встановлення накопичувачів у зв'язці з локальною генерацією для гарантування безперебійності процесів.

Оскільки кількість об'єктів генерації зростає в геометричній прогресії, керувати системою в ручному режимі стало неможливо активно впроваджується інтелектуальне управління електропостачанням (EMS + СМІР) — це поєднання двох потужних систем для забезпечення максимальної енергоефективності, стабільності та автономності енерговузла (підприємства АПК або мікромережі). EMS (Energy Management System) — система керування енергією. Вона розподіляє потоки електрики між мережею, генерацією (сонячні панелі, вітрогенератори), накопичувачами (акумуляторами) та споживачами. Система моніторингу перехідних режимів (СМІР або WAMS — Wide Area Measurement Systems) за мікросекунди виявляє фіксує коливання частоти, просідання напруги або загрозу аварії в загальній мережі та стали обов'язковими для всіх нових об'єктів генерації потужністю понад 500 кВт. Поєднання цих технологій створює «розумну» енергосистему (Smart Grid), яка не просто розподіляє ресурси, а миттєво реагує на аварії та зміни якості струму в системі: ВДЕ - Мережа – BESS у разі локальних аварій.

З кінця лютого 2022 року інтеграція з ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity — Європейська мережа операторів систем передачі електроенергії) нині переросла в ринкову і технічну інтеграцію енергосистем.

Мета кваліфікаційної роботи — практичне застосування моніторингу перехідних процесів ГСЕ за рахунок застосування алгоритмів та апаратних комплексів.

Для досягнення зазначеної мети в роботі були поставлені та вирішені наступні завдання:

1) Проведено аналіз стану енергопостачання та досліджена природа виникнення проблем ГСЕ підприємств АПК;

2) Визначено технічні вимоги та технічні параметри для проектування ГСЕ АПК.

Об'єктом дослідження являються локальні мережі АПК.

Предмет дослідження — аналіз перехідних процесів ГСЕ.

Методи дослідження визначалися поставленими завданнями кваліфікаційної роботи та були засновані на дослідженні проблем ГСЕ та сучасних апаратних рішень СМПР.

Перелік публікацій автора за темою дослідження:

Гужа М.О., Яковенко В.А. СУЧАСНІ ВИМОГИ ДО ПРОЕКТУВАННЯ ГІБРИДНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ФЕМЕРСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА

Наукові читання – 2026: збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками І-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 20 квітня 2026 р. Житомир: Поліський національний університет, 2026. Ч.3.

Гужа М.О. ОСОБЛИВОСТІ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ГІБРИДНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ АПК

Наукові читання – 2026: збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками І-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 20 квітня 2026 р. Житомир: Поліський національний університет, 2026. Ч.3.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ АПК

1.1. Загальні проблеми електропостачання господарств АПК України станом на 2026 рік

До загальних проблем електропостачання господарств АПК у 2026 році відносяться:

1. Жорсткі обмеження та нестабільність параметрів мережі які обумовлені невідповідність графіків відключень технологічним циклам (робота доїльних залів, інкубаторів, вентиляції на птахофабриках, систем зрошення).

2. Коливаннями напруги та частоти в сільських розподільчих мережах (10 кВ та 0,4 кВ) внаслідок високих пускових струмів: одномоментний запуск потужних електродвигунів (норії, КЗС, подрібнювачі кормів) створює критичні просадки напруги в умовах слабого централізованого живлення, що призводить до аварійного вимкнення автоматики сучасного обладнання яке застосовується в АПК.

3. Різке зростання фінансового навантаження яке обумовлено збільшення тарифів на передачу та високі ринкові ціни на електроенергію для комерційних споживачів змушують господарства закладати високі енергетичні ризики у собівартість продукції.

4. Криза неплатежів на балансуєчому ринку обмежує можливості локальних СЕС підприємств вигідно продавати надлишки генерації в загальну мережу.

Також до специфіки аграрного споживання слід віднести сезонну нерівномірність, тобто колосальний дефіцит потужності в періоди збирання, сушіння зерна (серпень–жовтень) та весняної посівної.

1.2. Сучасні вимоги до проектування гібридної системи електропостачання фермерського господарства

Сучасний розвиток гібридних енергосистем характеризується збільшення частки розосередженої генерації, передусім кількості й загальної потужності сонячних та вітрових електричних станцій та системами накопичення електричної енергії. Це обумовлено серійним виробництвом більш потужних

джерел енергії та їх ефективності перетворення енергії. На сьогоднішній день розвиток енергосистем систем також характеризується такими тенденціями як зростання систем накопичення електричної енергії та впровадження систем моніторингу перехідних режимів електричних систем. Система моніторингу перехідних режимів (СМІР або WAMS — Wide Area Measurement Systems) є критичним компонентом при проектуванні гібридних систем електропостачання (ГСЕ) для господарств та підприємств АПК, особливо тих, що використовують відновлювані джерела енергії (ВДЕ).

Інтелектуальне управління електропостачанням (EMS + СМІР) — це поєднання двох потужних систем для забезпечення максимальної енергоефективності, стабільності та автономності енерговузла (підприємства АПК або мікромережі). EMS (Energy Management System) — система керування енергією. Вона розподіляє потоки електрики між мережею, генерацією (сонячні панелі, вітрогенератори), накопичувачами (акумуляторами) та споживачами. Поєднання цих технологій створює «розумну» енергосистему (Smart Grid), яка не просто розподіляє ресурси, а миттєво реагує на аварії та зміни якості струму в системі- СЕС / Мережа / АКБ. СМІР: за мікросекунди виявляє фіксує коливання частоти, просідання напруги або загрозу аварії в загальній мережі. EMS : Оптимізує витрати, аналізує баланс та миттєво перемикає об'єкт на живлення від акумуляторів або скидає неперіоритетні навантаження в системі Споживачі / Пріоритетні лінії. Технологія енергосистеми (Smart Grid) гібридної системи енергопостачання АПК показана на рисунку 1.1.

Таким чином досягаються ключові функції СЕС:

1. Автоматичне вирівнювання генерації від сонячних електростанцій (СЕС) та споживання.
2. Peak Shaving (Зрізання піків): Використання акумуляторів у години максимального споживання, щоб не платити за перевищення ліміту потужності.
3. Оптимізація витрат: Зарядка акумуляторів вночі за дешевим тарифом і розрядка вдень — за дорогим.

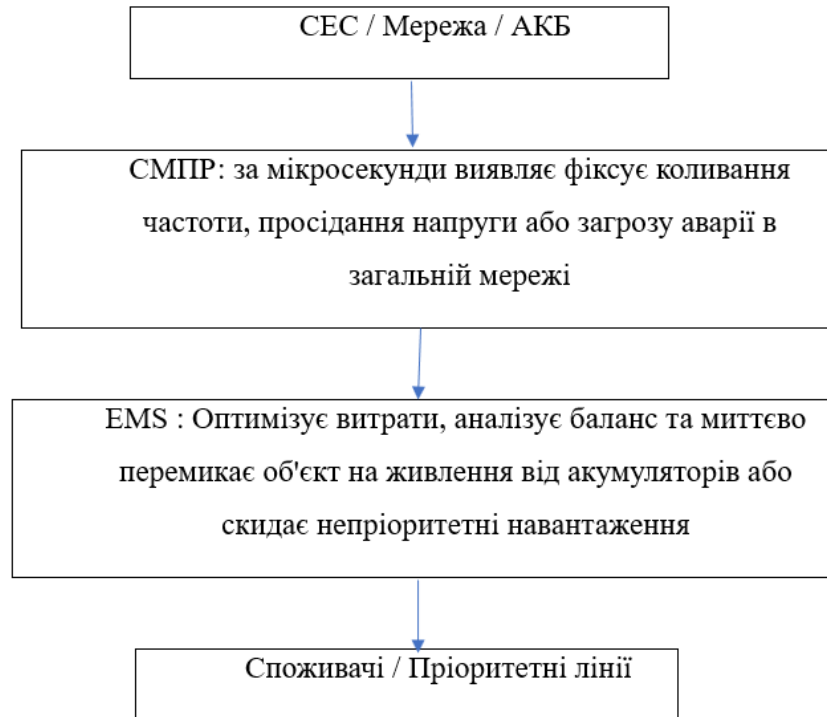


Рисунок 1.1 – Технологія енергосистеми (Smart Grid) гібридної системи енергопостачання АПК

З 2024-2025 років в Україні введені нові редакції Кодексу систем розподілу (КСР) та Кодексу системи передачі, ухвалені НКРЕКП, впроваджують жорсткі європейські стандарти (RfG — *Requirements for Generators*). Україна синхронізувала технічні вимоги для захисту ОЕС від некерованого сплеску розподіленої генерації. Для СЕС 500 кВт та BESS 300 кВт на підстанції 35/110 кВ ці оновлення перетворюють EMS + СМІР із «бажаної опції» на юридично обов'язковий комплекс.

Для проектування таких систем слід керуватися наступними нормативними документами:

Кодекс системи передачі (Постанова НКРЕКП №309): Визначає вимоги до моніторингу поточного режиму системи, засобів оцінювання стану та надання інформації про роботу електроустановок користувачів.

СОУ-Н ЕЕ 40.1-00100227-101:2014: "Норми технологічного проєктування енергетичних систем та електричних мереж 35 кВ і вище". Містить вимоги щодо впровадження інтелектуальних мереж (Smart Grid), цифрової реєстрації та аналізу аварійних процесів.

ДСТУ EN 50160:2023: Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2022, IDT). Регулює характеристики напруги. Оскільки перехідні режими часто супроводжуються відхиленнями параметрів, цей стандарт є базовим для контролю якості електроенергії.

ДСТУ-Н Б В.2.5-80:2015: Настанова з проектування систем електропостачання промислових підприємств (може застосовуватися для великих фермерських комплексів). Вимагає встановлення засобів вимірювальної техніки для контролю показників якості.

ГКД 341.003.001.001-2000: Правила проектування вітрових електричних станцій (якщо в гібридній системі є ВЕУ). Визначає умови приєднання до мереж.

Постанова НКРЕКП про Методичні рекомендації щодо СМП (від 15.07.2025 № 1056): Стосується функціонування систем моніторингу приєднань, що актуально для нових фермерських об'єктів з генерацією. Зобов'язує операторів систем (ОСП/ОСР) створювати прозорі електронні кабінети. Для нових фермерських об'єктів з генерацією це означає перехід на автоматизований контроль кожного етапу приєднання — від видачі технічних умов до фактичного підключення.

Постанова НКРЕКП від 14.03.2018 № 310 Про затвердження Кодексу систем розподілу (КСР).

ДСТУ ISO 50001: Системи енергетичного менеджменту. Хоча це стандарт менеджменту, він визначає необхідність моніторингу процесів для досягнення енергоефективності.

Специфічні вимоги для гібридних систем та АПК:

1. Обов'язкова телеметрія та дистанційне керування (Обсерваційність). Вимога КСР: Усі нові об'єкти генерації типу А (до 1 МВт) напругою вище 1 кВ, які здійснюють відпуск у мережу, зобов'язані забезпечувати передачу телеметричних даних до диспетчерського центру ОСР/ОСП в режимі реального часу і підтримувати функцію дистанційного обмеження потужності. Рішення: EMS виконує роль шлюзу, який інтегрує інвертори за протоколами IEC 60870-5-

104 або IEC 61850 з диспетчерськими пунктами Обленерго. Без EMS станцію просто не дозволять ввести в експлуатацію для комерційного продажу.

2. Жорсткі вимоги до стійкості (Fault Ride-Through — FRT). Вимога КСР: Посилено вимоги щодо «невипадання» генерації з мережі під час короточасних просідань напруги (симетричних та асиметричних КЗ в мережі 35/110 кВ). Інвертори мають залишатися в мережі певну кількість мілісекунд (залежно від профілю напруги) та підтримувати її струмом КЗ. Рішення: СМПП (через високошвидкісні PMU) миттєво розпізнає тип аварійного перехідного процесу в мережі. Вона блокує хибні спрацювання внутрішніх захистів інверторів, даючи їм команду «перетерпіти» посадку напруги згідно з кривими КСР, замість того, щоб аварійно вимкнути СЕС і отримати штраф за невиконання диспетчерського графіка. [1,2]

3. Динамічне регулювання частоти (Frequency Sensitive Mode — FSM). Вимога КСР: Генерація, що працює паралельно з мережею, повинна автоматично знижувати активну потужність у разі підвищення частоти понад нормативні ліміти (наприклад, вище 50.2 Гц), щоб уникнути системної аварії в країні. Рішення: Стандартні інвертори реагують надто повільно або просто повністю вимикаються. Зв'язка СМПП + EMS вираховує швидкість зміни частоти ($\dot{f}$) і плавно, але ультрашвидко (до 20-50 мс) знижує генерацію СЕС або переспрямовує «зайві» кВт на швидку зарядку BESS, рятуючи дохід від продажу.

4. Контроль якості та коефіцієнта потужності ($\cos \phi$). Вимога КСР: Чітко регламентовано діапазони генерації/поглинання реактивної потужності залежно від поточної напруги в точці приєднання 35/110 кВ. За недотримання графіка реактиву передбачено автоматичне відключення або величезні фінансові санкції. Рішення: EMS у реальному часі прораховує баланс реактивної потужності об'єкта, динамічно завантажуючи інвертори СЕС та BESS (використовуючи функціонал СТАТКОМ) для утримання параметрів мережі відповідно до умов КСР.

Таким чином з урахуванням нових правил посилюються вимоги до технічного завдання (ТЗ) які повинні включати контроль нормативів КСР (частота, напруга, реактив).

ТЗ повинні мати вимоги:

1. Сертифікація інверторів: Обладнання СЕС та BESS повинно мати сертифікати відповідності вимогам КСР України щодо роботи в режимах FSM (динамічна зміна частоти) та наявності функцій *Voltage support* (підтримка напруги реактивним струмом).

2. Апаратно виділений контролер EMS: Не можна покладатися на хмарні сервіси чи вбудований моніторинг інверторів. Контролер EMS повинен бути промислового класу, встановлений безпосередньо в релейному залі підстанції, з гарантованим безперебійним живленням від ЩПТ.

3. Швидкісні канали: Внутрішня мережа передачі даних від PMU (СМПП) до EMS та інверторів має базуватися на промисловому Ethernet (оптоволокну всередині ПС) для виключення затримок у мілісекундному діапазоні керування.

Висновки по першому розділу

Типове агропідприємство у 2026 році має розподілену інфраструктуру (елеватор, тваринницький комплекс, ПС, СЕС, BESS), які рознесені територіально. Тому класичні системи моніторингу не працюють у ГСЕ підприємств АПК:

Апаратура релейного захисту і автоматики має низьку дискретизація даних: Звичайні системи телемеханіки передають дані кожні 1–5 секунд. Перехідний процес (наприклад, динамічний провал напруги при пуску компресора чи відключенні мережі) триває від 10 до 200 мілісекунд. За цей час інвертори СЕС встигають вимкнутися через аварійний захист, а диспетчер бачить лише «факт вимкнення», не розуміючи першопричини.

Відсутність синхронізації за часом: Без єдиної мітки часу (від GPS/ГЛОНАСС/Galileo) неможливо зрозуміти, чи аварія почалася через коротке замикання в корівнику, чи через стрибок частоти на насосній установці за 2 кілометри звідти.

Посилення вимог Кодексу систем розподілу та передачі повністю ліквідувало можливість підключення СЕС 500 кВт як «пасивного споживача з генерацією». Об'єкт зобов'язаний бути активним та керованим елементом енергосистеми.

Впровадження EMS + СМПР — це єдиний технічний спосіб виконати законні вимоги ОСР, уникнути примусових обмежень видачі потужності та захистити комерційні інтереси підприємства АПК. [1,2,3,4].

Таким чином впровадження СМПР для підприємства максимально доцільне, якщо:

Вартість простою технологічних процесів на підприємстві висока.

Підприємство планує- чи вимушене працювати в режимі "острова" (енергонезалежність).

Обленерго висуває жорсткі вимоги до якості енергії на межі розподілу.

РОЗДІЛ 2

ПРИРОДА ВИНИКНЕННЯ ПРОБЛЕМ ГІБРИДНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

2.1. Природа виникнення проблем гібридних систем електропостачання підприємств АПК

Дослідження практичної експлуатації ГСЕ виявляє низку специфічних проблем, зумовлених фізичною та технологічною природою їхньої взаємодії: [1, 2,3]

1.Енергетична детермінованість (стохастичний характер відновлюваних джерел): Природа проблеми полягає в тому, що генерація відновлювальних джерел електричної генерації (ВДЕ) залежить від погодних умов і часу доби, які є випадковими величинами. Приклад в АПК - пік сонячної генерації (12:00–

14:00) часто не збігається з піками споживання на тваринницьких комплексах (ранкове та вечірнє доїння).

2. Динамічна несумісність джерел живлення при комутації: Природа проблеми обумовлена різною інерційністю джерел. Надавачі енергії діляться на «миттєві» (інвертори СЕС, АКБ) та «інерційні» (дизель-генератори, біогазові ТЕЦ). Приклад в АПК – у момент аварійного зникнення напруги в зовнішній мережі автоматика ГСЕ повинна миттєво перевести підприємство в автономний (острівний) режим. Якщо в цей момент працює обладнання з високими пусковими струмами, виникає динамічний провал напруги. Локальний дизель-генератор потребує від 10 до 30 секунд для виходу на робочі оберти. Інвертори СЕС без опорної напруги мережі миттєво вимикаються через захист, що призводить до повного «блекауту» підприємства. [4,5,6,]

3. Проблема «острівних» режимів та гармонічних спотворень: Природа проблеми виникає внаслідок нелінійного характеру навантажень в АПК а частотні перетворювачі вентиляторів, насосів, зварювальних апаратів спотворює синусоїду струму. В автономному режимі, коли потужність ГСЕ співрозмірна з потужністю навантаження, виникають вищі гармоніки. Вони спричиняють перегрів обмоток локальних генераторів, збої в роботі контролерів інверторів та прискорену деградацію акумуляторних батарей (АКБ). [6]

2.2. Завдання підвищення надійності гібридних систем електропостачання (ГСЕ) підприємств АПК

Завдання підвищення надійності гібридних систем електропостачання (ГСЕ) підприємств АПК у 2026 році лежить на стику цифрового керування, правильного розрахунку резервів та надійної протиаварійної автоматики. Оскільки класичні методи проектування не враховують стохастичний (випадковий) характер ВДЕ та нульову інерцію інверторів, надійність досягається через комплекс інженерних та алгоритмічних завдань.

1. Комплекс технічних завдань для підвищення надійності системи ГСЕ:

- Впровадження Grid-Forming інверторів (Формування опорної мережі). Проблема: Більшість стандартних інверторів СЕС працюють у режимі *Grid-Following* — їм потрібна опорна напруга від Обленерго. Якщо мережа зникає,

вони вимикаються. Завдання надійності: Інвертор системи накопичення енергії (BESS) 300 кВт повинен мати активовану функцію Grid-Forming. У момент аварії в мережі він миттєво бере на себе функцію віртуального генератора, створюючи стабільну синусоїду напруги 50 Гц для внутрішньої мережі АПК, що дозволяє СЕС 500 кВт продовжувати роботу без зупинки.

- Забезпечення високошвидкісного автоматичного введення резерву (ШАВР / STS). Проблема: Стандартні механічні АВР перемикають живлення за 100–200 мс. За цей час релейний захист (РЗА) та мікропроцесорні контролери йдуть у перезавантаження. Завдання надійності: Встановлення статичного тиристорного перемикача (STS) на ввіді від Обленерго. Швидкість його спрацьовування становить менше 4–8 мс. СМПП фіксує аварію в мережі, STS миттєво відсікає зовнішню лінію, а BESS продовжує жити шини. Для автоматики та РЗА розриву живлення не існує.

- Багаторівневе швидкісне розвантаження (Миттєвий слідінг навантаження). Проблема: Якщо в автономному режимі (коли працюють лише СЕС + BESS) споживання об'єкта раптово перевищить сумарну потужність інверторів, система піде в захист за перевантаженням.

2. Поділ усіх споживачів підприємства АПК на 3 категорії надійності та налаштування автоматики деградації навантаження:

Категорія 1 (Критична — РЗА, автоматика, зв'язок, мікроклімат): Живлення ніколи не вимикається.

Категорія 2 (Технологічна — доїльні апарати, лінії переробки): Вимикаються лише за умови глибокого дефіциту.

Категорія 3 (Другорядна — побутові приміщення, склади, полив): Автоматично скидаються за допомогою швидких дискретних сигналів за 15–20 мс, якщо СМПП фіксує падіння частоти нижче 49.2 Гц.

Завдання підвищення надійності полягає в координації з допоміжною ДГУ (Безшовно на льоту. Проблема: Підключення ДГУ «всліпу» викликає кидки струму та може вибити інвертори СЕС і BESS. Використання СМПП для точної активної синхронізації кутів фаз. ДГУ запускається вхолосту, пристрої PMU

порівнюють вектори напруги BESS та ДГУ, і в момент нульового зсуву фаз контактор замикається. Система об'єднується без розриву живлення.

3. Комплекс організаційно-алгоритмічних завдання (рівень EMS) для підвищення надійності системи ГСЕ вирішує такі завдання:

- Прогнозування генерації та споживання (AI Forecasting): EMS інтегрується з метеорологічними серверами. Якщо система «бачить», що завтра буде затяжна негода, вона заздалегідь забороняє розряджати BESS нижче 50% у нічний час, накопичуючи резерв для критичних потреб.

- Динамічний шеринг потужності (Dynamic Power Curtailment): Щоб запобігти перетоку енергії від СЕС у допоміжну ДГУ (що для неї критично небезпечно), EMS на основі даних СМПР кожні 10 мс регулює вихідну потужність інверторів СЕС, чітко підлаштовуючи її під поточне споживання ферми.

Підвищення надійності ГСЕ у конфігурації «Мережа — СЕС 500 кВт — BESS 300 кВт» для підприємств АПК є комплексним завданням. Специфіка навантажень енергомереж АПК (пікові пускові струми, безперервні технологічні процеси) у поєднанні з нестабільністю СЕС та ризиками зовнішньої мережі вимагає вирішення трьох фундаментальних завдань:

1. Оптимальний розподіл потужностей. У конфігурації, де сонячна станція (500 кВт) потужніша за накопичувач (300 кВт), виникає дефіцит балансуєючої місткості. Завдання підвищення надійності вирішується через правильне налаштування архітектури. Активація режиму Grid-Forming для BESS: Накопичувач на 300 кВт повинен виступати в ролі «віртуального синхронного генератора» [2]. При відключенні мережі саме інвертор BESS задає еталонну частоту 50 Гц та напругу, без чого інвертори СЕС (що працюють у режимі *Grid-Following*) просто вимкнуться [2]. Досягається глибоким секціонуванням шин. Силова мережа підприємства АПК розділяється на 2 секції. Гарантоване живлення (до 300 кВт): роботизовані дойльні зали, вентиляція пташників, РЗА [5,7,8]. Негарантоване живлення: склади, побутові приміщення, допоміжні насоси, які автоматично відсікаються при переході на автономію, щоб не перевантажити BESS.

2. Моніторинг перехідних процесів. Відомо, що найбільша кількість аварій у ГСЕ стається в моменти зміни режимів роботи. Надійність забезпечується впровадженням чіткої логіки:

Швидкісне обмеження СЕС (Dynamic Curtailment): Якщо влітку споживання ферми становить 100 кВт, BESS повністю заряджена, а мережа раптово зникає, СЕС 500 кВт миттєво створить надлишок енергії. Завдання автоматики — за 10–20 мілісекунд примусово знизити генерацію інверторів СЕС до 100 кВт, інакше система вимкнеться через перенапругу на внутрішніх шинах. Демпфування пускових струмів: Запуск потужних двигунів в АПК (норії, млини, компресори) створює короточасні перевантаження, які у 5–7 разів перевищують номінал. Надійність ГСЕ підвищується за рахунок того, що BESS використовує свою надшвидку здатність до перевантаження, видаючи короточасний імпульс струму для компенсації пуску, захищаючи СЕС від захисного відключення [7].

1. Алгоритмічна надійність. Для об'єкта АПК критично, щоб акумулятор (BESS) не виявився розрядженим у момент аварії в зовнішній мережі. Завдання вирішується на рівні алгоритмів EMS (Energy Management System). Динамічний ешелон резерву (State of Charge — SoC): Алгоритм EMS не дозволяє батареї розряджатися «в нуль» під час щоденного згладжування піків. Залежно від сезону та стабільності регіональної мережі, встановлюється недоторканий буфер (наприклад, 30% ємності BESS), який тримається виключно на випадок аварійного блекауту [9,10,11]. Пріоритетність потоків енергії: У сонячний день алгоритм спрямовує енергію СЕС спочатку на покриття навантаження АПК, потім на підзарядку BESS до 100%, і лише надлишок (за наявності дозволу та технічної можливості) віддає в загальну мережу [12,13].

Загальні показники надійності відображені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Загальні показники надійності ГСЕ

Показник надійності системи	Без застосування СМІР та EMS	Із застосуванням СМІР та EMS
Час реакції на аварію мережі	1.5 – 3.0 секунди (пауза)	4 – 8 мілісекунд (без розриву)

Ризик збою автоматики РЗА	Високий (через просадки напруги)	Нульовий (ізольоване DC-живлення)
Ймовірність пошкодження ДГУ	Висока (через зворотну потужність СЕС)	Виключена (завдяки швидкому Curtailment)
Коефіцієнт готовності системи (Кг)	0.92 – 0.94	0.995 – 0.998

Висновки по другому розділу

Природа виникнення аварій ГСЕ в АПК лежить на стику випадкового характеру відновлюваної енергії та жорстких технологічних вимог аграрного виробництва. Для стабільної роботи систем у 2026 році критично впроваджувати інтелектуальні системи керування енергією (EMS — Energy Management Systems). Вони на основі AI-прогнозування погоди та графіків роботи підприємства заздалегідь перерозподіляють потоки енергії, мінімізуючи аварійні перемикання та оптимізуючи використання АКБ. [1, 2] Підвищення надійності ГСЕ підприємства АПК досягається за рахунок переходу від принципу «реагування на факт аварії» до принципу «випереджального демпфування перехідних процесів». Зв'язка інтелектуального управління електропостачанням EMS, надшвидких інверторів з підтримкою Grid-Forming, статичних перемикачів STS та високоточного моніторингу СМПР гарантує стабільну роботу РЗА і повну технологічну безпеку агровиробництва. Для конфігурації «Мережа + СЕС 500 + BESS 300» надійність досягається через динамічний баланс. Система повинна проектуватися не як набір окремого обладнання, а як єдиний цифровий комплекс, де BESS виступає швидким стабілізатором, який миттєво адаптує роботу потужної, але нестабільної СЕС під мінливі потреби підприємства АПК [14,15].

РОЗДІЛ 3

ТЕХНІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЄКТУ ЕНЕРГОВУЗЛА АПК

3.1. Проєкт технічних вимог комплексної системи управління та моніторингу ГЕС фермерського господарства

В якості опорного об'єкта розглядається гібридна система енергопостачання (СЕС 500 кВт + BESS 300 кВт) з інтелектуальним моніторингом. Головною метою є створення автономної енергосистеми, здатної працювати в режимі «острова» при блекаутах, забезпечувати безперебійний пуск потужного обладнання (асинхронний двигун 120 кВт) та мінімізувати витрати на енергію через усунення штрафів за реактивну потужність [16,17, 18].

1. Ключові технологічні рішення та черговість впровадження:

Етап 1. Встановлення СМПП для аудиту фактичних режимів: Забезпечує миттєве (до 20 мс) детектування аварій у зовнішній мережі та дає команду на перехід в автономний режим без зупинки технологічних процесів.

Етап 2. Встановлення СТАТКОМ (200 кВАр) для фінальної стабілізації пускових режимів АД 120 кВт: Гарантує стабільність напруги при пуску АД 120 кВт. На відміну від звичайних стабілізаторів, він працює миттєво, не дозволяючи інверторам СЕС відключитися через просідання напруги.

Етап 3. Монтаж реклоузера 35 кВ та підключення BESS: Виконує роль інтелектуального «щита» на межі з мережею Обленерго. Коштує у 2 рази дешевше в експлуатації (за 25 років) порівняно з КСО з капітальною будівлею ПС.

Основні переваги для бізнесу:

1. Безперервність виробництва: Потужні двигуни запускаються без ризику «погашення» всієї ферми.
2. Енергонезалежність: СЕС 500 кВт продовжує працювати і приносити прибуток навіть при відключенні зовнішньої мережі (завдяки BESS та СМПР).
3. Якість мережі: Повна фільтрація гармонік та стабільна напруга $400\text{В} \pm 1\%$, що важливо для сучасної імпоротної техніки АПК.
4. Низький ОРЕХ: Система «Реклоузер + СТАТКОМ» майже не потребує обслуговування персоналом.

Це обґрунтування демонструє, що впровадження інтелектуальних систем управління перетворює СЕС та BESS із простого джерела енергії на надійний актив, захищений від зовнішніх та внутрішніх аварій.

Основні технічні вимоги до технічних завдань [20,21,22]:

1. Система моніторингу перехідних режимів (СМПР). Призначення: Реєстрація векторних параметрів (PMU) та керування переходом в автономний режим. Вимоги до реєстратора:

- Підтримка протоколу IEEE C37.118.2 (частота передачі 50 кадр/с).
- Синхронізація часу через PTP v2 або GPS (похибка < 1 мкс).
- Запис осцилограм аварійних подій із частотою дискретизації не менше 10 кГц.
- Інтеграція з локальною АСУ ТП по протоколу IEC 61850.

2. Пристрій компенсації реактивної потужності (СТАТКОМ/SVG). Статичний генератор реактивної потужності (IGBT-технологія). Вимоги:

- Потужність: 200 кВАр (динамічна компенсація).
- Швидкість реакції: Повний відгук на зміну навантаження (пуск АД 120 кВт) за час < 15 мс.
- Функціонал: Компенсація реактиву (inductive/capacitive), балансування фаз та фільтрація гармонік (до 50-ї).

- Виконання: Шафове, ступінь захисту не нижче IP54 (захист від пилу АПК).

3. Реклоузер 35 кВ. Вимоги:

- Тип: Вакуумний вимикач у герметичному корпусі для зовнішньої установки.

- Номінальна напруга: 35 (40.5) кВ.

- Номінальний струм: Не менше 630 А.

- Вимоги до контролера: Вбудована функція автоматичного виділення на "острів" при детекції аварії в мережі. Функція контролю синхронізму (Check-synс) для зворотного ввімкнення до мережі Обленерго. Наявність вбудованих трансформаторів напруги з обох сторін вимикача. Застосування реклоузерів (автоматичних пунктів секціонування) у системі (ПС 35 кВ, СЕС 500 кВт, АПК) — це найкращий спосіб захистити мережу від затяжних блекаутів та інтегрувати СМІР у високовольтну частину. У гібридних системах реклоузери виконують роль "розумних роз'єднувачів", які вміють самостійно приймати рішення [23,24,25].

1. Основні переваги застосування реклоузерів для фермерського господарства:

- Автоматичне виділення на "острів" (Island Mode): Реклоузер встановлюється на межі розділу з мережею Обленерго. При фіксації перехідного режиму (аварія в мережі) через СМІР, реклоузер миттєво відключає підприємство, дозволяючи СЕС та BESS продовжувати роботу автономно.

- Захист СЕС від невдалого АПВ мережі: Коли в мережі Обленерго спрацьовує автоматичне повторне ввімкнення (АПВ), виникає ударний струм, який може спалити інвертори СЕС. Реклоузер детектує цей процес і блокує ввімкнення, доки параметри мережі та вашого BESS не синхронізуються.

- Секціонування власних потреб: Якщо розгалужене фермерське господарство (наприклад, декілька віддалених насосних станцій), реклоузери дозволяють

відключати лише пошкоджену ділянку, залишаючи решту об'єкта під живленням від BESS.

2. Технічні переваги для ПС 35 кВ:

- Інтелектуальна РЗА: Реклоузер уже має вбудований мікропроцесорний захист, який легко інтегрується з вашою СМПР по протоколу IEC 61850.
- Вакуумні камери: Вони дозволяють виконувати тисячі операцій ввімкнення/вимкнення без обслуговування, що важливо при нестабільній роботі мережі.
- Вимірювання: Реклоузер сам виступає як датчик для СМПР, передаючи дані про напругу та струми на високій стороні (35 кВ).

Для рівня 35 кВ популярними є:

1. Ensto / NOJA Power (**Преміум**): Світовий стандарт, висока надійність. Найкраща інтеграція з СМПР (WAMS), протокол IEC 61850 "з коробки. Ціна: \$25,000 – \$40,000.

2. Таврида Електрик (серія Rec 35): Дуже поширені в Україні, легкі в налаштуванні. Ціна: \$22,000 – \$28,000.

3. Київприлад / КРЗ: Вітчизняні рішення на базі імпортованих (Китай/Корея) вакуумних камер. Бюджетний варіант. Ціна: \$15,000 – \$18,000.

Ключові висновки для прийняття рішення:

1. Економічна перевага: Реклоузер обходиться в 2 рази дешевше на тривалому горизонті. Головна причина — відсутність потреби в обслуговуванні будівлі та складної шинної архітектури всередині ПС.

2. Надійність для СМПР: Реклоузери зазвичай мають герметичний корпус із заповненням інертним газом або твердою ізоляцією. Це виключає перекриття ізоляції через пил (що часто буває на фермах або біля елеваторів) та гарантує точність даних моніторингу протягом десятиліть.

3. Швидкість відновлення: У разі виходу з ладу реклоузера, він міняється цілим модулем за кілька годин. Ремонт пошкодженої камери КСО може тривати кілька днів, що для СЕС 500 кВт означає великі втрати генерації.

4. Пристрій м'якого пуску (ПМП) для АД 120 кВт. Номінальна потужність: 132-160 кВт (із запасом для важких пусків). Функції: Обмеження пускового

струму до 250- 300% I_{nom} , вбудований байпас, захист двигуна від перевантаження та перекосу фаз.

5. Загальні системні вимоги:

- Комунікації: Побудова локальної мережі на базі промислових керованих комутаторів (Industrial Ethernet).

- Алгоритм роботи: Система повинна забезпечувати безперебійне живлення критичних споживачів при зникненні зовнішньої напруги без зупинки інверторів СЕС.

- Сервіс: Наявність авторизованого сервісного центру в Україні та гарантійний термін не менше 24 місяців.

3.2. Якість заземлення та захисту від імпульсних перенапруг гібридної системи енергопостачання

Для об'єкта з такою високою концентрацією силової електроніки (інвертори, СТАТКОМ, СМПР) якість заземлення та блискавкозахисту є критичною, оскільки імпульсна завада може миттєво вивести з ладу дорогі плати керування [26,27,28].

1. Якість заземлення (Контур ПС 35/0.4 кВ). Згідно з ПУЕ (Правила улаштування електроустановок), заземлення має бути комплексним:

- Опір розтіканню: Для ПС 35 кВ із загальним контуром для напруг 0.4 кВ опір має бути не більше 4 Ом (краще прагнути до <2 Ом для цифрової стабільності СМПР).

- Еквіпотенціальна шина (Мережа вирівнювання потенціалів): Усі металеві корпуси (шафа СТАТКОМ, рами сонячних панелей, корпус реклоузера, BESS) мають бути з'єднані з єдиним контуром. Це запобігає виникненню різниці потенціалів між ними під час аварій.

- Фундаментне заземлення: Для контейнера BESS рекомендується використовувати арматуру фундаменту як частину заземлювача.

2. Блискавкозахист — побудова ешелонованого захисту. Звичайного громовідводу (щогли) недостатньо. Потрібна система ПЗІП (Пристрої захисту від імпульсних перенапруг) трьох рівнів:

- Клас I (B): Встановлюється на вводі 35 кВ (у реклоузері або КСО) — обмежувачі перенапруг (ОПН-35). Захищають від прямого удару в ЛЕП.

- Клас II (C): Встановлюється в ГРЩ-0.4 кВ. Захищає інвертори СЕС та BESS від наведених імпульсів та перенапруг при комутаціях.

- Клас III (D): Встановлюється безпосередньо в шафі СМІР та перед контролерами СТАТКОМ. Це "тонкий" захист для чутливої електроніки. Його головне завдання — поглинути залишкову енергію імпульсу, яка пройшла крізь перші два класи захисту, та придушити високочастотні перешкоди. Технічні характеристики Класу III (D): Місце встановлення: На DIN-рейку всередині шаф управління, якнайближче до захищуваного пристрою (відстань кабелем не повинна перевищувати 5–10 метрів). Рівень захисту напруги зазвичай не більше 0.8 – 1.0 кВ. Це безпечний поріг для мікросхем. Час спрацювання: Найшвидший серед усіх класів — < 25 наносекунд. Окремо захищаються входи GPS-антени (використовуються спеціальні коаксіальні розрядники). Для зв'язку: Захист портів Ethernet (RJ45), якщо кабелі йдуть від реклоузера на велику відстань. Використовуються ПЗІП для систем передачі даних (так звані "інформаційні ПЗІП"). Рекомендоване обладнання (бренди та моделі):

1. Phoenix Contact (серія TERMITRAB або PLUGTRAB): Світовий лідер у захисті автоматики. Мають змінні модулі та індикацію зносу.
2. OBO Bettermann (серія VF): Дуже надійні пристрої, часто використовуються на підстанціях 110-220 кВ.
3. HAKEL (Чехія): Спеціалізовані рішення для ВДЕ та СЕС.

Важливо врахувати: Не можна ставити Клас III без Класу I та II на вводі. Якщо потужний імпульс (від блискавки в ЛЕП 35 кВ) прийде на "тонкий" ПЗІП Класу III, він просто вибухне, не встигнувши захистити реєстратор СМІР. ПЗІП Класу III часто мають вбудований акустичний або світловий сигнал тривоги. Це важливо для АПК: якщо захист спрацював і згорів, персонал почує звуковий сигнал і вчасно замінить модуль, доки наступний стрибок напруги не спалив основне обладнання.

3. Специфіка для СЕС та BESS:

- Захист стрінгів: Кожен вхід постійного струму (DC) на інверторах СЕС повинен мати власні ПЗІП постійного струму (DC SPD Class II).

- Екранування кабелів: Усі контрольні кабелі (від РМУ до СТАТКОМ) мають бути екранованими, а екран — заземленим лише з одного боку (або з обох через спеціальні конденсатори), щоб уникнути "земляних петель".

4. Рекомендації щодо перевірки: Після монтажу обов'язково вимагайте протокол вимірювання опору заземлення сертифікованою лабораторією. Матеріали бажано використовувати оцинковану сталь або мідь. Звичайна "чорна" сталь швидко кородує, і через 3-5 років опір контуру вийде за межі норми.

3.3. Особливості релейного захисту у мережах з локальними джерелами енергії

Релейний захист (РЗА) у мережах із локальною генерацією (СЕС, BESS) кардинально відрізняється від традиційних мереж. Основна проблема — перехід від радіальної структури (де енергія тече лише зверху вниз) до двонаправленої, де джерела енергії розкидані по всій мережі.

Головні особливості, які ви повинні врахувати при проектуванні:

1. Зміна напрямку та величини струмів КЗ. У традиційній мережі струм короткого замикання (КЗ) тече від підстанції до місця аварії. У такому випадку СЕС та BESS також "підживлюють" точку КЗ.

- Проблема: Селективність захисту порушується. Захист на вводі може не побачити аварію, або спрацювати хибно.

- Рішення: Впровадження спрямованих захистів (directional relays), які реагують не лише на величину струму, а й на напрямок потужності.

2. Низький струм КЗ від інверторів. Інвертори (СЕС та BESS) мають обмеження за струмом (зазвичай не більше 1.2–1.5 від номіналу).

- Проблема: Традиційний струмовий захист (МТЗ) може просто "не відчувати" КЗ, якщо воно живиться лише від СЕС.

- Рішення: Використання захисту за напругою ($U <$) та частотою (f), а також адаптивних уставок, які змінюються залежно від того, чи працює підприємство паралельно з мережею, чи в "острові".

3. Захист від "островкування" (Anti-islanding). Це критична функція для безпеки персоналу та обладнання.

- Завдання: СЕС повинна миттєво відключитися, якщо зовнішня мережа зникла, але навантаження продовжує жити від локальних джерел без контролю частоти.

- Реалізація: Використання захисту за швидкістю зміни частоти (ROCOF) та зсуву вектору напруги (Vector Shift). Система СМПР якраз і забезпечує ці дані.

4. Проблема невдалого АПВ (Автоматичне повторне ввімкнення). Якщо мережа Обленерго вимкнулася через аварію і через 1-2 секунди вмикається знову (АПВ), а СЕС ще продовжує працювати в "острові":

- Наслідок: Виникає несинхронне ввімкнення (протифаза). Це ударний момент, який може механічно зруйнувати генератори або спалити інвертори.

- Рішення: Встановлення реле контролю синхронізму (Check-sync) на реклоузері 35 кВ.

5. Селективність при роботі з BESS. BESS потужністю 300 кВт є дуже швидким джерелом.

- Особливість: При виникненні КЗ у внутрішній мережі ферми, BESS може вимкнутися за власним внутрішнім захистом швидше, ніж спрацює ваш автоматичний вимикач на пошкодженій лінії.

- Рішення: Координація часово-струмових характеристик (log-log curves) між інвертором BESS та внутрішніми автоматами.

Висновок для запропонованої конфігурації проекту: Для ГЕС з ПС-35 кВ та СЕС 500 кВт звичайна РЗА на базі струмових реле не підходить. Потрібні мікропроцесорні блоки захисту (наприклад, серії *Siemens SIPROTEC* або *ABB REF*), які підтримують логіку спрямованих захистів та протоколи СМПР [27].

3.4. Обмеження струмів короткого замикання в мережах з ВДЕ

Обмеження струмів короткого замикання (КЗ) у мережах з ВДЕ (СЕС, ВЕС, BESS) має двояку природу: з одного боку, інвертори самі обмежують свій внесок у КЗ, з іншого — це створює проблеми для спрацювання стандартного релейного захисту. Ключові аспекти та методи вирішення:

1. Природне обмеження інверторами. На відміну від синхронних машин, які дають струм КЗ у 5–10 разів більший за номінальний, інвертори (СЕС 500 кВт та BESS 300 кВт) мають жорстке програмне обмеження де величина зазвичай $1.1\text{--}1.5 I_{\text{ном}}$. Таким чином струму замало для спрацювання електромагнітних відсічок звичайних автоматичних вимикачів. Захист «бачить» КЗ як звичайне перевантаження і спрацьовує надто повільно або взагалі ігнорує його.

2. Технічні засоби обмеження (якщо струми завеликі від мережі). Якщо потужність зовнішньої мережі 35 кВ надто висока і пристрої (BESS, СТАТКОМ) можуть постраждати від термічної дії КЗ, застосовують:

- Струмообмежувальні реактори: Встановлюються на вводі ПС. Вони збільшують індуктивний опір кола КЗ, знижуючи амплітуду ударного струму.
- Швидкодіючі запобіжники (aR, gR): Спеціально для захисту силової електроніки (інверторів). Вони спрацьовують швидше, ніж встигнуть пошкодитися IGBT-транзистори.

3. Методи детекції при низьких струмах КЗ. Оскільки інвертори обмежують струм, замість стандартної МТЗ (максимального струмового захисту) використовують:

- Захист за напругою (Volt-Restrained Overcurrent): Поріг спрацювання струмового захисту знижується, якщо одночасно фіксується падіння напруги.
- Захист за зворотною послідовністю: Дуже ефективний для виявлення асиметричних КЗ (однофазних), на які інвертори реагують миттєво.

4. Вимоги Grid Code (FRT — Fault Ride Through). Згідно з українськими та європейськими нормами, ВДЕ не повинні миттєво відключатися при КЗ у зовнішній мережі:

- Low Voltage Ride Through (LVRT): Інвертори повинні "перечекати" просідання напруги протягом певного часу (наприклад, 150–500 мс), підтримуючи мережу реактивним струмом.

- Роль СТАТКОМ: У цей момент СТАТКОМ допомагає утримати напругу, видаючи максимальний реактивний струм, що дозволяє релейному захисту надійно спрацювати.

Резюме для проектування: Для ГСЕ головним завданням є не *обмеження* струму (інвертори з цим справляються самі), а забезпечення чутливості захисту. Потрібні мікропроцесорні реле, які реагують на зміну напруги та частоти, а не лише на амплітуду струму.

3.5. Економічна доцільність впровадження СМПР в локальних мережах фермерських господарств

Економічна доцільність впровадження СМПР (Системи моніторингу перехідних режимів) на підприємстві АПК з ВДЕ (500 кВт СЕС + 300 кВт BESS) базується на мінімізації ризиків та прямій економії. Розрахунок за ключовими статтями:

1. Запобігання технологічним збиткам (найбільша частка). Без СМПР пуск двигуна 120 кВт викликає просідання напруги, що призводить до відключення інверторів СЕС та BESS.

2. Збитки від одного збою: Втрата 15–30 хв генерації + ризик псування продукції (наприклад, зупинка вентиляції в пташнику або елеватора). Оціночно: 10 000 – 50 000 грн/випадок. Ефект впровадження СМПР: Запобігання 10–12 таким зупинкам на рік заощаджує ~300 000 грн/рік.

2. Пряма економія по реактивній енергії. СМПР у парі зі СТАТКОМ усуває платежі за перетоки реактивної потужності (штрафи Обленерго). Для об'єкта такої потужності економія становить 150 000 – 200 000 грн/рік.

3. Зменшення технічних втрат. Оптимізація режимів напруги через СМПР знижує нагрів кабелів та трансформаторів. Економія 2–3% активної енергії: ~80 000 грн/рік.

4. Подовження ресурсу обладнання. СМПР дозволяє системі BESS працювати в "щадному" режимі, уникаючи ударних навантажень.

Відтермінування заміни акумуляторів або інверторів на 2 роки дає амортизаційну вигоду ~120 000 грн/рік. Підсумкова таблиця впровадження тільки СМІР (ROI) показана в таблиці 3.1.. Фінансова модель (тис. грн.) впровадження системи СМІР у поєднанні зі СТАТКОМ для об'єкта АПК : 500 кВт СЕС, 300 кВт BESS) показана в таблиці 3.2.. Розрахунок проведено на горизонті 5 років, що є стандартним для енергетичних проектів.

Таблиця 3.1. - Підсумкова таблиця впровадження.(Тільки СМІР (ROI))

Показник	Значення (орієнтовно)
Вартість впровадження (CAPEX)	\$15 000 – \$25 000 (тільки СМІР + софт)
Сумарна вигода на рік	\$15 000 – \$20 000 (~600 000+ грн)
Термін окупності	1.2 – 1.8 року

Таблиця 3.2.- Фінансова модель (тис. грн.) впровадження системи СМІР у поєднанні зі СТАТКОМ для об'єкта АПК (500 кВт СЕС, 300 кВт BESS)

Стаття / Рік	Рік 0	Рік 1	Рік 2	Рік 3	Рік 4	Рік 5
Капітальні витрати (CAPEX)	-1200	-	-	-	-	-
Економія на штрафних (реактив)	-	+200	+220	+240	+260	+280
Економія на втратах (2% генер.)		+160	+175	+190	+210	+230
Запобігання простоям (АПК)		+350	+385	+420	+460	+500
Зниження витрат на ТО (BESS)		+100	+110	+120	+130	+140
Операційні витрати (OPEX)		-40	-45	-50	-55	-60

Чистий грошовий потік (NCF)	-1 200	+770	+845	+920	+1005	+1090
Накопичений дохід	-1 200	-430	+ 415	+1335	+2340	+3430

Ключові фінансові показники проекту - аналіз витрат та окупність (Cost-Benefit Analysis):

1. Термін окупності (Payback Period): ~1.6 року. Це надзвичайно високий показник для енергетики, де нормальним вважається 5–7 років.
2. Чистий дисконтований дохід (NPV): За 5 років проект приносить ~3.4 млн грн чистого прибутку (понад вартість інвестицій).
3. Коефіцієнт рентабельності (ROI): ~285% за 5 років.

Пояснення до розрахунків:

- CAPEX (1.2 млн грн): Включає вартість реєстратора PMU, СТАТКОМ 200 кВАр, ПЗ та монтажні роботи.
- Операційні витрати (OPEX): Адміністрування, обслуговування високоточних каналів зв'язку та забезпечення кібербезпеки.
- Окупність: Попри значні початкові інвестиції, нормативний термін окупності в масштабах національної або регіональної енергосистеми (на базі ОЕС України) швидко досягається за рахунок запобігання лише одній великій аварії чи розриву в генерації.
- Запобігання простоям: Розраховано виходячи з вартості 1 години простою ферми/цеху переробки (~35 тис. грн) та частоти збоїв (10 разів на рік) без інтелектуального моніторингу.
- Динаміка цін: Закладено щорічне зростання тарифів на електроенергію на рівні 10%, що збільшує цінність зекономлених кіловат-годин.

Висновок: Для гібридної системи АПК СМІР є не "витратою", а високорентабельною інвестицією, яка окупається швидше, ніж самі сонячні панелі.

Висновки по третьому розділу

Природа виникнення аварій у ГСЕ агропідприємств зазвичай криється у мікросекундних та мілісекундних перехідних процесах, які класичні пристрої обліку та електромеханічні реле захисту просто не здатні зафіксувати. СМПР, що базується на пристроях синхронізованих векторних вимірювань PMU, дозволяє вирішити цю проблему. СМПР фіксує параметри (струм, напругу, кут зсуву фаз, частоту) з частотою 50–100 вимірювань на секунду з прив'язкою кожного виміру до астрономічного часу з точністю до 1 мікросекунди. Також вирішуються:

1. Запобігання аваріям при переході в «острівний» (автономний) режим, тобто при зникненні напруги в зовнішній мережі ГСЕ агрокомплексу має перейти в автономний режим. У цей момент виникає критичний небаланс активної та реактивної потужностей. Кут фази напруги починає стрімко змінюватися. Система WAMS миттєво фіксує швидкість зміни частоти (ROCOF — *Rate of Change of Frequency*) та зсув фаз. Це дозволяє автоматичі випереджального ділення (протиаварійній автоматичі) за 20–40 мілісекунд скинути другорядне навантаження (наприклад, допоміжні насоси) та зберегти живлення критичних об'єктів (інкубаторів, доїльних роботів).

2. Оптимізація роботи інверторів ВДЕ з «низькою інерцією», коли сонячні станції підключені через інвертори, які не мають механічної інерції (на відміну від турбін біогазових станцій або дизелів). При різкій зміні хмарності або запуску потужного млина на елеваторі виникають електромагнітні перехідні процеси, які розхитують локальну енергосистему. Рішення СМПР - дані з PMU використовуються для динамічного керування інверторами в режимі Grid-Forming (формування опорної мережі). Інвертори отримують команду на зміну видачі потужності ще до того, як локальна частота вийде за межі критичного допуску.

3. Моніторинг та демпфування низькочастотних коливань ГСЕ яка полягає у взаємодія між регуляторами швидкості дизель-генераторів, системами збудження когенераційних установок та вихідними фільтрами інверторів СЕС викликає резонансні низькочастотні коливання (0.1 – 2 Гц). Вони призводять до «миготіння» світла, перегріву двигунів та виходу з ладу чутливої електроніки сортувальних ліній. WAMS у реальному часі виявляє виникнення таких

коливань, визначає їхнє джерело (наприклад, некоректно налаштований PID-регулятор газопоршневої установки) та дає сигнал на систему керування енергією (EMS) для зміни режиму роботи або підключення накопичувачів (ESS).

4. Економічна доцільність впровадження СМПР для АПК у 2026 році полягає у переході від реактивного до проактивного управління енергосистемою здорожує систему автоматизації проєкту на 10–15%, проте повністю окупається за рахунок наступних факторів:

- Зменшення ємності АКБ (ESS): Завдяки надшвидкому моніторингу та скиданню «розумного» навантаження, підприємству не потрібно купувати величезні масиви дорогих літєвих батарей лише для того, щоб перекривати пускові струми.

- Продовження ресурсу дизель-генераторів: Дизелі рідше працюють у критичних перевантаженнях, оскільки СМПР дозволяє збалансувати систему за рахунок миттєвого підхоплення потужності накопичувачами або регулювання СЕС.

- Розслідування аварій: Наявність «чорної скриньки» з мікросекундною точністю дозволяє точно визначити винуватця аварії (внутрішні обладнання чи неякісна енергія з боку Обленерго) і пред'явити обґрунтовані претензії.

Інвестування в СМПР є виправданим завдяки підвищенню надійності та оптимізації капітальних витрат.

ВИСНОВКИ

ОЕС України з різними джерелами генерації потребують глибокої динамічної оцінки, яку не здатні забезпечити традиційні системи SCADA. Використання систем моніторингу перехідних режимів станом на 2026 рік перейшло з категорії обладнання для магістральних мереж «Укренерго» у розряд критично необхідних компонентів для локальних гібридних систем електропостачання великих підприємств АПК. В умовах нестабільної роботи енергосистеми СМПР стає не просто засобом економії, а гарантією виживання бізнесу. Без неї дорога гібридна система (BESS + CEC) може працювати неефективно або виходити з ладу при системних коливаннях. Крім того СМПР

стає обов'язковою умовою для приєднання нових потужностей ВДЕ до мереж 35-110 кВ. Наявність системи дозволяє підприємству брати участь у ринку допоміжних послуг (платна підтримка частоти мережі), що може генерувати додатковий дохід. Економічна доцільність впровадження СМПР полягає в тому, що її інвестування є виправданим завдяки підвищенню надійності та оптимізації капітальних витрат. Головні фінансові та експлуатаційні переваги:

1. Запобігання масштабним аваріям (Blackouts): СМПР дозволяє фіксувати параметри мережі (частоту, напругу, кути) в реальному часі. Це попереджає каскадне відключення енергоблоків. Запобігання мільйонним збиткам промисловості та інфраструктури від раптового знеструмлення регіонів.

2. Зниження втрат електроенергії: За рахунок точної оцінки динамічного стану мережі, оператори можуть завантажувати лінії ближче до їхньої фізичної межі без ризику руйнування стабільності. Появляється скорочення технологічних втрат електроенергії під час передачі на 3% - 5%.

3. Економія на модернізації інфраструктури (Deferral of Upgrades): Замість дорогого будівництва нових ЛЕП для усунення вузьких місць, система дозволяє досягати максимум з наявних активів завдяки інтелектуальному диспетчерському контролю. Відтермінування капітальних інвестицій у мережеву інфраструктуру на роки.

4. Інтеграція відновлюваних джерел енергії (ВДЕ): СМПР полегшує балансування генерації від вітрових та сонячних електростанцій, які створюють коливання частоти. Сприяє скороченню використання традиційних викопних ресурсів (до 21%) та переходу до сталої енергетики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гребченко М.В. Системи електропостачання з локальними джерелами енергії та керування ними.[Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів

ступеня магістра за освіт. програмою «Системи забезпечення споживачів електричною енергією» спец. 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / М.В. Гребченко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 1-е вид. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 98 с.

2. Методи організації гнучких електричних систем [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», спеціалізації «Електричні системи і мережі» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: В.В. Кирик. – Електронні текстові дані (1 файл: 0,927 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 47 с.

3. Яндульський О.С., Мацейко В.В., Катрич Д.В. Демпфування низькочастотних коливань на основі синхронізованих вимірів від пристроїв СМПР. НТУ «КПІ» УДК 621.311. ISSN 1813-5420 (Print). Енергетика: економіка, технології, екологія. 2014. № 4

4. Лежнюк П.Д., Грицюк Ю.В., Пірняк В.М.: Регулювання реактивної потужності й напруги в електричних мережах як допоміжна послуга. УДК 621.311 Енергетика та електротехніка: Наукові праці ВНТУ, 2010, № 2, с. 1-6

5. Кирик В. В. Електричні мережі та системи : підручник / В. В. Кирик. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2021. – 324 с.

6. С.П.Денисюк, Д.Г.Дерев'янка. Особливості застосування систем гнучкої передачі змінного струму (FACTS) в сучасних електроенергетичних мережах / С.П.Денисюк, Д.Г.Дерев'янка // Енергетика: економіка, технології, екологія - 2011. - №1 - с. 29-37

7. Оцінка стану та реалізації концепцій розвитку «інтелектуальних» електромереж у світовій практиці [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/01/3.-SmartGrid.pdf>

8. Сосков А.Г., Колонтаєвський Ю.П. Промислова електроніка: Підручник. / За ред. А.Г. Соскова. – К.: Каравела, 2015. – 536 с.

9. Перехідні процеси в системах електропостачання : підруч. для студ. вищ. навч. закл. / М. М. Черемісін, О. М. Мороз, О. Б. Єгоров, С. В. Швець. – Харків : ТОВ «В справі», 2016. – 260 с.

10. Єгоров О. Б. Математичне моделювання динамічних процесів в однофазних асинхронних двигунах : монографія / О. Б. Єгоров, О. Ю. Єгорова. – Харків : СПДФО Добринін В. Є., 2014. – 200 с.
11. Перехідні процеси в системах електропостачання : підручник для ВНЗ Г. Г. Півняк, І. В. Жежеленко, Ю. А. Папаїка, Л. І. Несен ; за ред. Г. Г. Півняка ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – 5-те вид., випр. та доп. – Дніпро : НГУ, 2016. – 600 с.
12. Перехідні процеси в системах електропостачання : підручник / Г. Г. Півняк, В. М. Винославський, А. Я. Рибалко, Л. І. Несен ; за ред. академіка НАН України Г. Г. Півняка. – Вид. 2-е, випр. та доп. – Дніпропетровськ : Видавництво НГА України, 2000. – 597 с.
13. Розрахунок перехідних процесів у лінійних електричних колах : навч. посіб. / І. А. Курило, В. П. Грудська, Л. Ю. Спінул, М. А. Щерба. – Київ : НТУУ «КПІ», 2013. – 289 с.
14. Букович Н. В. Розрахунок струмів короткого замикання : навч. посіб. / Н. В. Букович, Г. Н. Міркевич. – Київ : УМК ВО, 1991. – 224 с.
15. Тептя, В. В. Електромеханічні перехідні процеси в електроенергетичних системах : електронний конспект лекцій комбінованого (локального та мережного) використання [Електронний ресурс] / В. В. Тептя, В. В. Кулик. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 183 с. ISBN 978-966-641-872-5
16. ДСТУ 3440-96 Системи енергетичні. Терміни та визначення. Київ, Держстандарт України, 1997 р. – 45 с.
17. ДСТУ EN 50160:2023: Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2022, IDT).
18. ДСТУ-Н Б В.2.5-80:2015: Настанова з проектування систем електропостачання промислових підприємств.
19. ДСТУ ISO 50001: Системи енергетичного менеджменту.
20. СОУ-Н МЕВ 40.1-00100227-68:2012. Стійкість енергосистем. Керівні вказівки.

21. СОУ-Н ЕЕ 40.1-00100227-101:2014: "Норми технологічного проектування енергетичних систем та електричних мереж 35 кВ і вище".
22. Правила улаштування електроустановок. Видання офіційне. Міненерговугілля України. Х.: Видавництво «Форт», 2017. – 760 с.
23. Правила застосування системної протиаварійної автоматики запобігання та ліквідації небезпечного зниження або підвищення частоти в енергосистемах. Наказ Мінпаливенерго України 01.12.2003 № 714
24. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів (вимоги до обслуговування та стану обладнання). Наказ Мінпаливенерго України від 25.07.2006 № 258
25. ГКД 34.20.507-2003 Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила (у редакції наказу від 21.06.2019 № 271).
26. Кодекс системи передачі (Постанова НКРЕКП №309): Вимоги до моніторингу поточного режиму системи, засобів оцінювання стану та надання інформації про роботу електроустановок користувачів.
27. Постанова НКРЕКП про Методичні рекомендації щодо СМП (від 15.07.2025 № 1056): Функціонування систем моніторингу приєднань, що актуально для нових фермерських об'єктів з генерацією.
28. Постанова НКРЕКП від 14.03.2018 № 310 Про затвердження Кодексу систем розподілу (КСР).