

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Мамедов Денис Намікович

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Адаптивні системи управління потоками реактивної потужності в системі
електропостачання підприємства АПК

(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

Мамедов Д.Н.

(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

Мамедов Д.Н.. Адаптивні системи управління потоками реактивної потужності в системі електропостачання підприємства АПК 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 регулювання активної та реактивної потужності для забезпечення надійної та економічної роботи енергосистеми.

Ключові слова: *електричні мережі, реактивна потужність, регулювання напруги, гібридні системи електропостачання.*

ABSTRACT

Mamedov D.N.. Adaptive reactive power flow control systems in the power supply system of an agricultural and industrial enterprise 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 and industrial enterprises through the use of new algorithms and hardware complexes. The subject of the study is the regulation of active and reactive power to ensure reliable and economical operation of the power system. Keywords: electrical networks, reactive power, voltage regulation, hybrid power supply systems.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ АДАПТИВНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ПОТОКАМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ГСЕ АПК	7
1.1 Компенсація реактивної потужності в електричних системах	7
1.2. Аналіз способів регулювання реактивної потужності в електромережах	9
1.3. Вимоги до регулювання реактивної потужності в електромережах АПК	13
Висновки по розділу 1	18
РОЗДІЛ 2 СИСТЕМИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ РП ЛОКАЛЬНИХ МЕРЕЖ АПК	19
2.1. Статичні тиристорні компенсатори і активні фільтри- компенсатори	19
2.2. Актуальність застосування СТАТКОМ в ГСЕ АПК	21
2.3. Розрахунок потужності СТАТКОМ в залежності від пікових навантажень	23
Висновки по розділу 2	26
РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ АДАПТИВНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ПОТОКАМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ	27
3.1. Аналіз локальної компенсації реактивної потужності з урахуванням сумарної потужності нелінійних навантажень	27
3.2. Аналіз технічної реалізації при пуску потужних АД та переваги над встановленням окремих стабілізаторів (автотрансформаторів)	31

3.3. Технічні особливості проектування при реалізації СТАТКОМ в мережах АПК	33
Висновки по розділу 3	40
ВИСНОВКИ	41
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	42

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ВДЕ – відновлювані джерела енергії;

СЕС – сонячна електростанція;

ГЕС – гібридні електроенергетичні системи;

ЕС – Європейський Союз;

ЕЕ – електричної енергії;

ОЕС – об’єднана енергетична система;

ПБЗ - Перемикання відгалужень без збудження (без навантаження)
трансформатора

РГ – розосереджена генерація;

РП – реактивна потужність;

РПН - регулювання під навантаженням;

СЕП – система електропостачання;

СЕС – сонячна електростанція;

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

BESS – установки зберігання (накопичення) енергії;

EMS (Energy Management System) — система керування енергією;

ТКУ (КРПТ) - тиристорні конденсаторні установки ;

SVC - статичний тиристорний компенсатор реактивної потужності (Static Var Compensator);

STATCOM / SVG - синхронний статичний компенсатор, активний фільтр-компенсатор (Static Var Generator);

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

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) замінюється **розподіленою енергетичною системою** з урахуванням довгострокових екологічних цілей Євросоюзу (Green Deal)._ Модернізація електромереж загального призначення за допомогою цифрових технологій — це перехід до «розумних» мереж (Smart Grids), що включає впровадження автоматизації, датчиків, зв'язку та аналітики даних для підвищення надійності, ефективності та безпеки, що дозволяє керувати потоками енергії, інтегрувати ВДЕ, передбачати аварії та оптимізувати обслуговування, та вимагає вирішення завдань інтеграції зі застарілим обладнанням та забезпечення кібербезпеки. "Управління потокорозподілом" (Load Flow Control) в електроенергетиці - це процес регулювання активної та реактивної потужності для забезпечення надійної та економічної роботи енергосистеми. У 2026 році

основними методами та інструментами управління є технічні засоби управління трансформатори з РПН (регулювання під навантаженням, зміна коефіцієнта трансформації для контролю рівня напруги, фазоповоротні трансформатори (PST) які дозволяють змінювати кут зсуву фаз, що безпосередньо перерозподіляє потоки активної потужності між паралельними лініями. Останнім часом застосовуються системи FACTS (гнучкі системи передачі змінного струму), SVC/STATCOM- статичні компенсатори для швидкого керування реактивною потужністю та напругою та TCSC- тиристорно-керовані послідовні конденсатори для зміни опору лінії. Вставки постійного струму (HVDC)- Забезпечують повний контроль над величиною і напрямом потужності, що передається.

Мета кваліфікаційної роботи – практичне застосування адаптивного управління потоками активної та реактивної ЕЕ в ГСЕ за рахунок застосування алгоритмів та апаратних комплексів.

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

1)Проведено аналіз стану адаптивного управління потоками активної та реактивної ЕЕ в ГСЕ підприємств АПК;

2) Визначити технічні вимоги та технічні параметри для проектування ГСЕ АПК апаратних комплексів.

Об'єктом дослідження являються локальні мережі АПК.

Предмет дослідження – аналіз перехідних процесів та потоків реактивної ЕЕ в ГСЕ.

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

Перелік публікацій автора за темою дослідження:

*Мамедов Д.Н., Яковенко В.А. АНАЛІЗ АДАПТИВНИХ СИСТЕМ
УПРАВЛІННЯ ПОТОКАМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ГІБРИДНИХ
СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ АПК.*

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

*Мамедов Д.Н. РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ СТАТКОМ В СИСТЕМІ
АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ РЕАКТИВНИМИ ПОТУЖНОСТЯМИ
ЛОКАЛЬНИХ МЕРЕЖ АПК*

Наукові читання – 2026: збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками I-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 АДАПТИВНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ПОТОКАМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ГІБРИДНИХ СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ АПК

1.1. Компенсація реактивної потужності в електричних системах

Необхідність передачі реактивної потужності від електростанцій до споживачів впливає на конструктивні параметри електричної мережі, оскільки призводить до збільшення струму i , відповідно, до збільшення перерізу проводів, здорожчання опор повітряних ЛЕП і т. д. У випадку, коли лінії вже в експлуатації, компенсація реактивної потужності дозволяє збільшити ними на відповідну величину передачу активної потужності. Передбачивши встановлення компенсувальних установок (КУ) в електричних мережах на стадії їхнього проектування, можна зменшити витрати, зменшивши переріз проводів і потужність трансформаторів на частину, необхідну для передачі реактивної потужності. Передача

реактивної потужності елементами електричної мережі викликає додаткові втрати активної потужності (електроенергії) та втрати напруги. Для покриття додаткових утрат електроенергії повинна бути передбачена додаткова установка потужності на електростанціях, а для підтримання напруги в допустимому діапазоні в електричних мережах повинні бути передбачені додаткові засоби регулювання напруги. Це, очевидно, вимагає додаткових капіталовкладень. Реактивна потужність, протікаючи по елементам електричної мережі, що володіють активним опором, викликає в них додаткові втрати потужності і електричної енергії. Крім того, перетоки реактивної потужності знижують пропускну спроможність ліній електропередач і трансформаторів, або змушують збільшувати перетин проводів, прокладку додаткових кабельних ліній, заміну трансформаторів на велику номінальну потужність. Але величини перетоків реактивної потужності можуть бути зменшені і навіть повністю усунені за допомогою конденсаторів, установлюваних безпосередньо в місцях споживання реактивної потужності. Обмін енергією, в цьому випадку, буде відбуватися між індуктивністю і ємністю ланцюга. Між індуктивністю і джерелом енергії буде відбуватися обмін тільки некомпенсованою частини енергії [1]. На рис. 1 наведено перелік найважливіших чинників впливу реактивної потужності на процес передачі електроенергії.



Рис. 1. Чинники впливу реактивної потужності на електричну мережу

Приклади експлуатаційних проблем, до яких можуть привести нерегульовані потоки активної і реактивної потужності: втрата стабільності системи, високі втрати при передачі, порушення меж напруги, нездатність використовувати можливості лінії передачі до теплового межі і каскадне відключення [2].

1.2. Аналіз способів регулювання реактивної потужності в електромережах

Реактивна потужність — це частина повної потужності в мережах змінного струму, яка безперервно циркулює між джерелом живлення та споживачами (через котушки індуктивності та конденсатори), але не виконує корисної роботи. РП продукують пристрої з індуктивністю (електродвигуни, трансформатори, дроселі) та ємністю (конденсатори, кабельні лінії) накопичують енергію, а потім віддають її назад у мережу. Це викликає зсув фаз між напругою та струмом та мають негативний - корисна робота не виконується, реактивний струм навантажує дроти, кабелі та трансформатори,

викликає їх нагрівання і знижує напругу в мережі. Як наслідки, на прикладі **оплати для бізнесу** - якщо на підприємстві коефіцієнт потужності ($\cos \varphi$) падає нижче встановленої норми (зазвичай 0.95), оператор системи розподілу нараховує додаткові платежі за перетікання реактивної енергії. Для побутових споживачів вона зазвичай окремо не тарифікується. [1,2]

Щоб мережа працювала ефективно, застосовують компенсацію реактивної потужності. Це дозволяє розвантажити кабелі та уникнути штрафів. [1] Засоби компенсації реактивної потужності (ЗКРП) обираються залежно від динаміки навантаження мережі, наявності нелінійних споживачів (які створюють гармоніки) та інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ).

У традиційних мережах навантаження є переважно індуктивним і прогнозованим, тоді як у гібридних системах (з сонячними станціями, вітрогенераторами та накопичувачами) потоки потужності постійно змінюють свій напрямок та величину.

1. Традиційні системи електропостачання. Традиційні системи (фабрики, заводи, комерційні об'єкти з живленням від центральної мережі та використанням асинхронних двигунів або трансформаторів) потребують компенсації сталого або ступенево змінного індуктивного навантаження:

- Автоматичні конденсаторні установки (АКУ / УКРМ): Найбільш поширені пристрої. Вони складаються з косинусних конденсаторів та контролера, який підключає або відключає окремі ступені за допомогою контакторів залежно від поточного ($\cos \varphi$).
- Тиристорні конденсаторні установки (ТКУ): Замість механічних контакторів використовуються тиристорні ключі. Вони забезпечують миттєву комутацію (в межах 20 мс) без пускових струмів, що критично для мереж із швидкозмінним навантаженням (зварювальні апарати, ліфти, крани).
- Фільтрокомпенсуючі пристрої (ФКП): Конденсаторні батареї, з'єднані послідовно з дроселями (реакторами). Вони одночасно компенсують

реактивну потужність і захищають самі конденсатори від руйнування вищими гармоніками, які генеруються частотними перетворювачами чи LED-освітленням.

- Синхронні компенсатори (двигуни): Великі обертові машини, які працюють у режимі перезбудження. Вони плавно регулюють потужність і використовуються переважно на магістральних підстанціях або великих важких підприємствах.

2. Гібридні системи електропостачання. Гібридні системи включають локальну генерацію (сонячні електростанції (СЕС), вітрові установки (ВЕС)), дизель-генератори та акумуляторні системи (BESS). Тут виникають проблеми швидких коливань напруги, появи ємнісного навантаження вночі (через довгі кабельні лінії) та високого рівня спотворень струму. Сучасні мережеві інвертори (сонячні та **акумуляторні**) здатні працювати у всіх чотирьох квадрантах системи координат потужності. Вони можуть генерувати або споживати як активну, так і реактивну потужність (керування за алгоритмами $Q(U)$ або $\cos \varphi (P)$). Вони забезпечують компенсацію безпосередньо в точці генерації без встановлення додаткових конденсаторів. Статичні генератори реактивної потужності (SVG / STATCOM) - силові електронні пристрої на базі IGBT-транзисторів. На відміну від конденсаторів, вони діють як кероване джерело струму та забезпечують ідеально плавну (безступеневу) компенсацію та мають реакцію на зміни за 1–5 мс. Також можуть компенсувати як індуктивну (від двигунів), так і ємнісну (від кабелів СЕС) потужність. Також активні фільтри гармонік (APF) - пристрої високої точності, які одночасно усувають вищі гармоніки (до 50-ї гармоніки), вирівнюють перебіг фаз і компенсують реактивну потужність. Вони незамінні у гібридних мережах з великою кількістю цифрової та перетворювальної техніки. В таблиці 1.1. приведено порівняльний аналіз технологій управління потоками РП.

таблиця 1.1. Порівняльний аналіз технологій управління потоками РП

Критерій	Конденсаторні установки (АКУ)	Статичні генератори (SVG)	Гібридні інвертори (CEC/BESS)
Швидкість реакції	Низька (секунди)	Надвища (1–5 мс)	Висока (мілісекунди)
Регулювання	Ступеневе	Плавне (лінійне)	Плавне (лінійне)
Діапазон роботи	Тільки індуктивна ($Q > 0$)	Індуктивна та ємнісна	Індуктивна та ємнісна
Робота при зниженій напрузі	Ефективність падає пропорційно квадрату напруги U^2	Зберігає номінальний струм навіть при падінні U	Залежить від поточного завантаження по активній потужності
Вартість	Низька	Середня / Висока	Вбудована функція інвертора

Важливо враховувати, що SVC та АКУ з тиристорним керуванням (так звані тиристорні конденсаторні установки — ТКУ або КРПТ) — це пристрої різного класу, складності та вартості.

Головна відмінність полягає в тому, як саме тиристори регулюють потужність: ступінчасто чи плавно. В таблиці 1.2. надано порівняння ТКУ (АКУ з тиристорами) та SVC.

Таблиця 1.2. Порівняння ТКУ (АКУ з тиристорами) та SVC

Характеристика	Тиристорна конденсаторна установка (ТКУ/АКУ)	Статичний тиристорний компенсатор (SVC)
Клас обладнання	Промислове електрообладнання 0.4 кВ	Системи FACTS (гнучкі системи ЛЕП)
Метод регулювання	Ступінчастий (комутація фіксованих ступенів)	Плавний / Безступінчастий (регулювання кута відкриття тиристора)

Компоненти	Батареї конденсаторів + тиристорні ключі (тиристорні пускачі)	Конденсатори + керовані реактори (котушки індуктивності)
Робота на індуктивність	Ні (тільки видає реактивну потужність)	Так (може як видавати, так і споживати реактивну потужність)
Рівень напруги	Переважно 0.4 кВ (рідко 6–10 кВ)	Зазвичай 6 – 110 кВ і вище

Детальна технічна різниця полягає в принципах роботи – тиристор (ТКУ) працює просто як електронний вимикач замість класичного механічного контактора. Він вмикає або вимикає конденсаторну банку цілком (наприклад, ступінь 25 квар або 50 квар) у момент, коли напруга проходить через нуль (щоб не було кидків струму). Регулювання залишається дискретним (кроковим). Складається тільки з конденсаторів і тиристорних ключів. Вона вміє лише генерувати реактивну потужність Q , щоб компенсувати індуктивне навантаження двигунів.

У SVC тиристор працює у режимі фазового керування. Система змінює кут відкриття тиристора (α) всередині кожного півперіоду синусоїди. Це дозволяє плавно, як реостатом, змінювати струм через котушку індуктивності (реактор). Класичний SVC типу TCK-TPP (TSC-TCR) містить: *TCK* (Тиристорно-керовані конденсатори) — для грубого ступінчастого підключення ємності. *TPP* (Тиристорно-регульовані реактори) — котушки індуктивності, що підключені паралельно. Вони працюють постійно і плавно "гасять" надлишок потужності від конденсаторів. Завдяки цьому загальний баланс потужності SVC на виході змінюється ідеально плавно.

Висновок: Для традиційних підприємств найбільш економічно вигідним рішенням залишаються автоматичні конденсаторні установки (АКУ) або установки з розміщеними реакторами (для захисту від гармонік).

Для гібридних систем та об'єктів з власною генерацією найкраще підходять пристрої на базі силової електроніки — SVG (STATCOM) або програмне налаштування режимів роботи наявних гібридних інверторів, оскільки вони здатні миттєво реагувати на зміну хмарності (для СЕС) чи запуск резервних генераторів.

1.3. Вимоги до регулювання реактивної потужності в електромережах АПК

Адаптивні системи управління потоками реактивної потужності (РП) в електромережах підприємств АПК (агропромислового комплексу) є сучасним рішенням для підвищення енергоефективності, стабілізації напруги та зниження витрат на електроенергію, особливо в умовах високо динамічних навантажень. [2,4,5,6]

Існують основні складові, принципи та переваги таких систем, адаптовані до специфіки АПК:

1. Підприємства АПК мають ряд особливостей, що ускладнюють управління потоками РП:
2. Висока частка індуктивних навантажень: Масове використання асинхронних двигунів (насоси, вентилятори, конвеєри, кормозмішувачі).
3. Різкі коливання навантаження: Сезонність, циклічність роботи обладнання (нерегулярні пуски та зупинки), що створює нестабільний графік споживання РП.
4. Низька якість напруги: Довгі мережі та знижена напруга, особливо на віддалених об'єктах. [5,6,7]

Адаптивні системи, на відміну від класичних автоматичних конденсаторних установок (АККУ), не просто вмикають ступені за заданим $\cos \varphi$, а прогнозують і динамічно підлаштовуються до змін режиму роботи. Виконується оперативне прогнозування для визначення майбутнього навантаження на основі поточних даних. Використовуються сучасні силові електронні пристрої (статичні

тиристорні компенсатори - **SVC**, активні фільтри-компенсатори - **STATCOM**) для швидкої компенсації (мс), а не лише вмикання конденсаторів контакторами (с). Відбувається централізоване та децентралізоване управління - поєднання потужної центральної установки на трансформаторній підстанції (ТП) з дрібними компенсаторами безпосередньо біля споживачів (індивідуальна компенсація двигунів).

Засоби реалізації управління потоками РП відбуваються в основному із застосуванням:

1. ТКУ (КРПТ) дозволяють практично безінерційно регулювати РП, уникаючи кидків струму.
2. Активні фільтри-компенсатори **STATCOM** Не тільки компенсують РП, а й згладжують коливання напруги та покращують якість електроенергії (знижують гармоніки).

Переваги для підприємств АПК при застосуванні управління потоками РП:

1. Зменшення втрат активної енергії: Зниження струмів у лініях електропередачі та трансформаторах.
2. Підвищення рівня напруги: Забезпечення стабільної роботи електрообладнання (напруга не просідає нижче норми ДСТУ).
3. Економія коштів: Уникнення штрафів за споживання реактивної енергії та зменшення оплати за перетікання РП.
4. Збільшення пропускної здатності мереж: Можливість підключення додаткового обладнання без модернізації кабелів. [2,5,6,9,10]

Висновок: Впровадження адаптивних систем управління реактивною потужністю в АПК — це необхідний крок для переходу до енергоефективного виробництва, що дозволяє автоматично підтримувати $\cos \phi$ на рівні 0.95–0.99, суттєво зменшуючи технічні та фінансові втрати. [11,12,13]

Статичний синхронний компенсатор (**STATCOM**) — це пристрій силової електроніки, що належить до сімейства гнучких систем передачі змінного струму (FACTS). Його конструкція базується на принципі роботи інвертора напруги, який перетворює постійний струм на змінний. Ось основні компоненти, з яких побудований STATCOM:

1. Перетворювач напруги (VSC — Voltage Source Converter). Це «серце» пристрою. Він складається з потужних напівпровідникових ключів, найчастіше IGBT-транзисторів або IGCT-тиристорів. Функція: Перетворює постійну напругу на накопичувачі (конденсаторі) у трифазну змінну напругу заданої амплітуди та фази. В сучасних установках 2026 року використовується багаторівнева топологія (MMC), яка дозволяє формувати майже ідеальну синусоїду без громіздких фільтрів.

2. Накопичувач енергії (DC-ланка) - зазвичай це блок високоємних конденсаторів на стороні постійного струму. Функція: служить джерелом напруги для інвертора.

3. STATCOM не потребує зовнішнього джерела активної енергії для компенсації реактивної потужності (він лише «перекачує» її між фазами та накопичувачем).

4. Зв'язувальний реактор (або трансформатор). Це індуктивність, через яку STATCOM підключається до мережі. Функція: Забезпечує згладжування струму та дозволяє регулювати обмін потужністю. Різниця напруг між мережею та виходом STATCOM на цьому реакторі визначає напрямок і величину реактивної потужності.

5. Система керування. Це високошвидкісний мікропроцесорний комплекс. Функція: Вимірює параметри мережі в режимі реального часу та миттєво змінює кути відкриття транзисторів. Саме завдяки їй STATCOM реагує на просідання напруги за 1-10 мілісекунд.

6. Система охолодження. Оскільки силові транзистори виділяють багато тепла, використовується рідинне (деіонізована вода) або примусове повітряне охолодження.

Актуальність (STATCOM) : На відміну від старих конденсаторних батарей, STATCOM займає в 2-3 рази менше площі та здатний підтримувати напругу навіть тоді, коли вона в мережі критично впала (конденсатори в таких умовах втрачають ефективність пропорційно квадрату напруги). Порівняння адаптивного регулювання РП із традиційними засобами приведені в таблиці 1.3.:

Таблиця 1.3. Порівняння
адаптивного регулювання РП із традиційними засобами

Характеристики	СТАТКОМ	Автоматична конденсаторна установка (АКУ)
Швидкість реакції	Мілі секунди	Секунди
Робота при низькій напрузі U	Видає повний струм при глибоких просадках U	Потужність падає пропорційно квадрату напруги
Гармоніки	Активно фільтрує	Можуть визивати резонанс

Ключові переваги застосування: 1. Стабілізація напруги: СТАТКОМ забезпечує над швидке (менше 2 циклів) регулювання напруги, що критично при пусках потужних електродвигунів у системі власних потреб. 2. Підвищення якості електроенергії: Пристрій ефективно пригнічує флікер та вищі гармоніки (особливо 5-у та 7-у), працюючи як активний фільтр. 3. Підтримка при аваріях (Fault Ride Through): У разі просадок напруги у зовнішній мережі СТАТКОМ генерує реактивну потужність, утримуючи напругу на шинах СН та запобігаючи вимкненню захисту або зупиненню критичного обладнання. 4. Компактність: У порівнянні з традиційними СТК (статичними тиристорними компенсаторами), СТАТКОМ вимагає значно менше місця, що спрощує його інтеграцію в існуючі РУ власних потреб. 5. Встановлення даної системи на СН ПП суттєво знижує ризики «інциденту зі втратою власних потреб», що є критичним фактором для стабільної роботи всієї енергосистеми.

Технічні особливості реалізації: 1. Тип підключення: Зазвичай підключається паралельно шин СН через узгоджувач трансформатор або реактори. 2. Гібридні рішення: У 2026 році актуальним трендом є інтеграція СТАТКОМ з накопичувачами енергії (ESS), що дозволяє керувати не лише реактивною, а й активною потужністю для компенсації короткочасних провалів частоти. 3. Економічні стимули: У 2026–2028 роки продовжено пільги

(наприклад, звільнення від ПДВ) на імпорт високотехнологічного енергетичного обладнання, що знижує капітальні витрати на впровадження таких систем та через застосування процедур RAB- тарифів.

СТАТКОМ стає економічно та технічно вигіднішим за КРП та ПМП у випадках, коли система має низьку інерцію (багато ВДЕ) або потребує миттєвої реакції:

1. Робота в автономному режимі (Island Mode) Якщо ваша підстанція або ферма від'єднується від мережі Обленерго і живиться лише від СЕС та BESS. На відміну від КРП: В автономній мережі немає "жорсткої" напруги мережі. Підключення ступені конденсаторів викликає різкий стрибок напруги, який може вибити інвертори СЕС за перенапругою.

2. Перевага СТАТКОМ: Він плавно "підмішує" реактивну потужність, стабілізуючи мікромережу без стрибків.

3. При пуску потужних асинхронних двигуні частіше 5–10 разів на годину. Тиристори ПМП та контакти КРП сильно перегріваються. Конденсаторам потрібен час на розряд (1-3 хв), інакше при повторному ввімкненні виникне вибухонебезпечний кидок струму. СТАТКОМ в даному випадку готовий до роботи 24/7 без пауз на розряд, оскільки не накопичує енергію в конденсаторах надовго. Він здатен підтримувати номінальний струм навіть при глибоких просіданнях напруги, "витягуючи" мережу до норми

4. Наявність нелінійних навантажень (Гармоніки). Наприклад якщо на фермі багато частотних перетворювачів, комп'ютерної техніки або сучасного LED-освітлення він працює як активний фільтр, активно пригнічуючи гармоніки, що покращує якість напруги для чутливої електроніки СМПП та РЗА. При КРП - конденсатори мають низький опір для високих частот. Вони вбирають у себе гармоніки, перегріваються і "роздуваються" (виходять з ладу).

Висновок: Якщо задача — просто не платити штрафи за реактив у нормальному режимі можливо обмежитись КРП. Якщо задача — енергонезалежність, *робота з ВДЕ та захист обладнання від збоїв при пусках АД*: СТАТКОМ окупиться швидше за рахунок відсутності аварійних зупинок.

Висновки по розділу 1

Реактивна потужність є невід’ємним елементом виробництва, передачі і споживання електроенергії. Транспортування її електричними мережами викликає низку негативних явищ, які виявляються в погіршенні якості напруги та в збільшенні втрат електроенергії. Вона також впливає на стійкість вузлів навантаження, зменшує пропускну здатність мережі. Виробництво й передача реактивної потужності пов’язані з витратами, які в ринкових умовах повинні відшкодовуватися. Оплата послуги за регулювання реактивної потужності і підтримку напруги в електричних мережах повинна формуватися не тільки за рахунок утрат електроенергії, викликаних передачею реактивною потужністю, але й з врахуванням інших чинників впливу реактивної потужності на електричну мережу. Для традиційних підприємств найбільш економічно вигідним рішенням залишаються автоматичні конденсаторні установки (АКУ) або установки з розміщеними реакторами (для захисту від гармонік). Для гібридних систем та об’єктів з власною генерацією найкраще підходять пристрої на базі силової електроніки — SVG (STATCOM) або програмне налаштування режимів роботи наявних гібридних інверторів, оскільки вони здатні миттєво реагувати на зміну хмарності (для СЕС) чи запуск резервних генераторів.

РОЗДІЛ 2. СИСТЕМИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ РП ЛОКАЛЬНИХ МЕРЕЖ АПК

2.1. Статичні тиристорні компенсатори і активні фільтри-компенсатори

Хоча SVC (Static Var Compensator) та STATCOM / SVG (Static Var Generator) належать до одного класу пристроїв FACTS (гнучких систем передачі змінного струму), вони мають принципово різну технологічну базу.

Головна відмінність - в таблиці 2.1. показані характеристики статичних тиристорні компенсатори (SVC) та активних фільтрів-компенсаторів – STATCOM (SVG)

Таблиця 2.1. Порівняльні характеристики статичних тиристорні компенсатори (SVC) та активних фільтрів-компенсаторів – STATCOM (SVG)

Характеристика	Статичний тиристорний компенсатор (SVC)	Активний фільтр-компенсатор (STATCOM / SVG)
Елементна база	Тиристори (повільніші)	IGBT-транзистори (надшвидкі)
Принцип роботи	Зміна імпедансу (конденсатори + реактори) [1]	Джерело напруги (генерація синусоїди інвертором)
Швидкість відгуку	20 – 40 мілісекунд (1-2 періоди мережі)	1 – 5 мілісекунд (миттєва реакція)
Залежність від напруги	Критична. При просадці напруги видача реактивної потужності падає квадратично U^2	Відсутня. Видає повний струм компенсації навіть при падінні напруги до критичних значень
Фільтрація гармонік	Потребує громіздких пасивних LC-фільтрів	Активна фільтрація. Сам вираховує та гасить вищі гармоніки (до 50-ї гармоніки)
Габарити та площа	Великі (через масивні котушки індуктивності та конденсатори)	Компактні (модульна конструкція, що займає в 3-5 разів менше місця)
Ризик резонансу	Існує ризик резонансу з індуктивністю мережі	Повністю відсутній (не має великих ємностей/індуктивностей)

1. Поведінка при глибоких просадках напруги (критично для пуску двигуна 120 кВт):

- SVC: Оскільки SVC складається з фізичних конденсаторів, його здатність видавати реактивну потужність прямо залежить від напруги в мережі. Якщо в момент пуску вашого двигуна 120 кВт напруга впаде на 20%, то SVC зможе видати лише 64% від своєї номінальної потужності. Тобто він слабшає саме тоді, коли потрібен найбільше.
- STATCOM: Працює як керований генератор струму. Навіть якщо напруга впаде на 20% чи 30%, STATCOM все одно видасть 100% свого номінального струму в мережу, миттєво піднімаючи напругу.

2. Швидкість реакції:

- SVC: Тиристори чекають природного переходу синусоїди струму через нуль для комутації [1]. Це обмежує швидкість реакції часом у 20–40 мс. Для звичайного заводу цього достатньо, але для чутливих інверторів СЕС (500 кВт) та BESS (300 кВт) такий час є задовгим — інвертори встигнуть піти в захист.
- STATCOM: ШІМ-керування (широтно-імпульсна модуляція) на IGBT-транзисторах працює на частотах у кілька кілогерц. Відгук відбувається за 1–5 мс, що є непомітним для автоматики захисту СЕС та BESS.

3. Робота з вищими гармоніками (Якість електроенергії):

- SVC: Сам по собі тиристорний регулятор (особливо ТРР — тиристорно - регульовані реактори) генерує в мережу додаткові гармоніки струму (3-ю, 5-ту, 7-му) [1]. Для їх уловлювання доводиться проєктувати громіздкі пасивні фільтри під конкретний об'єкт.
- STATCOM: Працює як активний фільтр. Він у реальному часі сканує форму хвилі струму, виявляє спотворення (викликані, наприклад,

частотним перетворювачем двигуна 120 кВт або інверторами СЕС) і генерує "протифазний" струм, ідеально вирівнюючи синусоїду.

Для сучасних гібридних систем АПК з відновлюваною енергетикою технологія **SVC вважається застарілою**. Вона занадто повільна і громіздка. Для конфігурації СЕС 500 кВт + BESS 300 кВт + двигун 120 кВт підходить **виключно STATCOM (SVG)**. Тільки він здатний забезпечити миттєву швидкість реакції, захистити інвертори від відключення та одночасно виконати функцію активного фільтра гармонік від силової електроніки.

2.2. Актуальність застосування СТАТКОМ в гібридних системах енергопостачання АПК

Актуальність застосування STATCOM (статичних синхронних компенсаторів) у гібридних системах енергопостачання агропромислового комплексу (АПК) обумовлена необхідністю миттєвої стабілізації напруги та підвищення якості електроенергії в умовах масової інтеграції нестабільних відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та специфіки сільськогосподарських споживачів. [2,3] Гібридні системи енергопостачання АПК поєднують традиційні мережі, сонячні (СЕС), вітрові (ВЕС) електростанції та біогазові установки. Таке поєднання створює низку технічних викликів, які ефективно вирішує STATCOM: [6,7]

- Компенсація нестабільності ВДЕ: Потужність сонячних і вітрових станцій різко змінюється залежно від погоди. STATCOM здійснює динамічне регулювання реактивної потужності за мілісекунди, нівелюючи коливання напруги.
- Специфіка споживачів АПК: Аграрні підприємства (тваринницькі комплекси, елеватори, переробні заводи) використовують велику кількість потужних асинхронних електродвигунів (насоси, вентилятори, млини). Їхній запуск викликає глибокі просадки напруги. STATCOM підтримує рівень напруги в моменти пуску важкого обладнання.

- Робота в автономних (острівних) режимах: Сучасний тренд в АПК України — перехід на автономне енергозабезпечення через ризики пошкодження центральних мереж. В ізольованих гібридних мікромережах (Microgrids) STATCOM виступає головним інструментом підтримки динамічної стійкості системи.
- Покращення якості енергії: Пристрої силової електроніки (інвертори ВДЕ, частотно-регульовані приводи) спотворюють синусоїду струму. STATCOM не лише компенсує реактивну потужність, а й здатний фільтрувати вищі гармоніки, захищаючи чутливе цифрове обладнання Smart Grid. [15]

Для гібридної системи із СЕС 500 кВт та накопичувачем BESS 300 кВт в АПК застосування STATCOM має конкретні технічні завдання та межі доцільності:

1. Оскільки BESS (система накопичення) сама по собі має інвертор, який частково може керувати реактивною потужністю (режим 4-квадрантного регулювання), STATCOM у такій конфігурації виконує роль регулятора, який розвантажує батарею та захищає мережу. Пуск потужного асинхронного двигуна (наприклад, вентилятора сушарки елеватора або насоса на 110 кВт) потребує величезного імпульсу реактивного струму. Якщо цей імпульс покриватиме інвертор BESS, це викличе теплове перевантаження його ключів та прискорить деградацію акумуляторів через різкі піки струму. STATCOM бере на себе 100% динамічної реактивної потужності за 1–2 мілісекунди. BESS у цей час спокійно видає лише активну потужність (P), що суттєво продовжує термін служби акумуляторів.
2. Стабілізація автономної роботи (Острівний режим / Island mode). Якщо підприємство за замовчуванням живиться від СЕС та BESS (при вимкненні зовнішньої мережі), мережа стає "слабкою" (низький струм короткого замикання). У такій слабкій мережі будь-яке увімкнення навантаження викликає різкий стрибок напруги. STATCOM утримує

напругу в межах $\pm 5\%$ від номіналу, не дозволяючи інверторам СЕС відключитися по аварійному захисту (Over/Under Voltage).

3. Компенсація "тіньових" ефектів СЕС. Хмарність викликає швидкі коливання генерації СЕС 500 кВт. При цьому змінюється режим роботи трансформатора підприємства. STATCOM згладжує коливання напруги в точці загального підключення (РСС), мінімізуючи миготіння світла (флікер) та спрацювання автоматики.

2.3. Розрахунок необхідної потужності STATCOM в залежності від пікових навантажень

Для СЕС 500 кВт та BESS 300 кВт встановлювати STATCOM великої потужності недоцільно. Оптимальний вибір розраховується за формулою або типовим співвідношенням: Потужність STATCOM складає 20%-30% потужності СЕС. Тобто, для гібридної системи із СЕС 500 кВт та накопичувачем BESS 300 кВт оптимальним є модульний STATCOM потужністю від 100 до 150 квар (кВА реактивних). Технічна специфікація для вибору обладнання - тип інвертора: На базі IGBT-транзисторів із 3-рівневою топологією (забезпечує низький коефіцієнт гармонік $THD < 3\%$), швидкість реакції: < 5 мілісекунд (повна компенсація). Конструктивне виконання: Модульна шафа внутрішнього або зовнішнього (контейнерного) виконання для роботи в умовах пилу (актуально для АПК).

В таблиці 2.2. надано порівняльний аналіз застосування інвертора BESS та STATCOM

Таблиця 2.2. Порівняльний аналіз застосування інвертора BESS проти STATCOM

Функція	Інвертор BESS (300 кВт)	STATCOM (150 квар)
Регулювання активної потужності (P)	Так (заряд/розряд батареї)	Ні

Регулювання реактивної потужності (Q)	Так (але зменшує корисну активну потужність)	Так (спеціалізовано, на 100% потужності)
Швидкість відгуку	20–100 мілісекунд	1–5 мілісекунд
Знос при імпульсних навантаженнях	Прискорює деградацію батареї	Знос відсутній

Висновок: Для системи СЕС 500 кВт + BESS 300 кВт інтеграція STATCOM на 100–150 кВАр є виправданою, якщо на підприємстві є часті пуски двигунів потужністю понад 45–55 кВт або якщо система має тривалий час працювати повністю автономно від зовнішньої мережі.

В той же час наявність на об'єкті двигуна більшої потужності в 120 кВт повністю змінює технічні вимоги та робить встановлення STATCOM критично необхідним, особливо під час роботи від гібридної системи СЕС 500 кВт + BESS 300 кВт. При прямому пуску (DOL) або навіть при пуску "зірка-трикутник" асинхронний двигун потужністю 120 кВт споживає пусковий струм у 5–7 разів більший за номінальний. Відповідно пускова реактивна потужність складає близько 600–800 квар у перші секунди. BESS має потужність інвертора лише 300 кВт. Якщо двигун запускається в автономному (острівному) режимі відбувається миттєве перевантаження BESS. Відбувається просадка напруги, коли навіть за наявності слабкої зовнішньої мережі напруга впаде нижче 180 В. Через це інвертори СЕС 500 кВт миттєво вимкнуться, захищаючи себе від падіння напруги в мережі. Інвертор BESS піде в аварійний захист за перевантаженням струму (Overcurrent). Система повністю згасне (Blackout). STATCOM під час пуску двигуна 120 кВт миттєво видає необхідні сотні квар реактивної потужності локально, безпосередньо біля двигуна.

Якщо пуск двигуна відбувається через частотний перетворювач (ЧП) або пристрій плавного пуску (ППП): Пусковий струм менший (в 2–3 рази), але виникає інша проблема — ЧП генерує сильні вищі гармоніки (THD струму

зростає до 30-40%). STATCOM у режимі активного фільтра нейтралізує ці гармоніки, захищаючи плати керування CEC та BESS.

Якщо пуск прямий, тоді STATCOM утримує рівень напруги, не дозволяючи системі піти в аварію.

Розрахунок та вибір потужності STATCOM враховуючи потужність двигуна (120 кВт) та загальну потужність генерації (CEC 500 + BESS 300), оптимальний вибір рекомендована потужність STATCOM: 200 квар або 250 квар (Оскільки BESS 300 кВт може взяти на себе частину короточасного навантаження (якщо дозволяє його перевантажувальна здатність інвертора, зазвичай це 120-150% на 10-30 секунд), STATCOM на 200 квар компенсує основний реактивний удар). Бажано модульного типу, наприклад, 2 або 3 модулі по 100 квар у загальній шафі.

Алгоритм роботи інтегрованої системи:

1. Режим очікування: STATCOM працює в режимі мінімального споживання, коригуючи ($\cos \phi$) підприємства до 0.99. BESS балансує активну потужність CEC.
2. Момент пуску двигуна 120 кВт: За <5 мілісекунд STATCOM видає свої 200 квар.
3. Підтримка від BESS: Інвертор BESS плавно (за 20-50 мс) нарощує видачу активної потужності для покриття механічного моменту на валу двигуна.
4. Сталий режим: Двигун запустився, STATCOM знижує видачу до номінального споживання двигуна (~ 40 -50 квар), система працює стабільно.

Висновки по розділу 2.

Для сучасних гібридних систем електропостачання АПК зтехнологія SVC вважається застарілою. Вона занадто повільна і громізка. Для конфігурації CEC 500 кВт + BESS 300 кВт + двигун 120 кВт підходить виключно STATCOM (SVG). Тільки він здатний забезпечити миттєву

швидкість реакції, захистити інвертори від відключення та одночасно виконати функцію активного фільтра гармонік від силової електроніки. Проаналізовані головні характеристики статичних тиристорні компенсатори (SVC) та активних фільтрів-компенсаторів – STATCOM (SVG) та обґрунтована актуальність застосування СТАТКОМ в гібридних системах енергопостачання АПК. Проведено розрахунок необхідної потужності STATCOM в залежності від пікових навантажень на прикладі навантаження асинхронним двигуном потужністю 120 кВт.

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ РЕАЛІЗАЦІЙ АДАПТИВНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ПОТОКАМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

3.1. Аналіз локальної компенсації реактивної потужності з урахуванням сумарної потужності нелінійних навантажень

СТАТКОМ стає економічно та технічно вигіднішим за КРП та ПМП у випадках, коли система має низьку інерцію (багато ВДЕ) або потребує миттєвої реакції. Тому вибір СТАТКОМ є безальтернативним у випадках :

1. Робота в автономному режимі (Island Mode). Якщо підстанція підприємства або ферма від'єднується від мережі Обленерго і живиться лише від СЕС та BESS. При застосуванні КРП в автономній мережі немає "жорсткої" напруги мережі. Підключення ступені конденсаторів викликає різкий стрибок напруги, який може вибити інвертори за перенапругою. СТАТКОМ плавно "підмішує" реактивну потужність, стабілізуючи мікромережу без стрибків.

2. Висока частота пусків двигунів. Якщо двигун 120 кВт (або інші АД) запускається частіше 5–10 разів на годину. При застосуванні ПМП/КРП тиристори ПМП та контакти КРП сильно перегріваються. Конденсаторам потрібен час на розряд (1-3 хв), інакше при повторному ввімкненні виникне вибухонебезпечний кидок струму. СТАТКОМ готовий до роботи 24/7 без пауз на розряд, оскільки не накопичує енергію в ємностях надовго.

3. Наявність нелінійних навантажень (гармоніки). Якщо на фермі багато частотних перетворювачів, комп'ютерної техніки або сучасного LED-освітлення. При КРП конденсатори мають низький опір для високих частот. Вони вбирають у себе гармоніки, перегріваються і "роздуваються" (виходять з ладу). Перевага СТАТКОМ - він працює як активний фільтр, активно пригнічуючи гармоніки, що покращує якість напруги для чутливої електроніки СМПП та РЗА.

4. Необхідність підтримки напруги (Voltage Support). Якщо ПС знаходиться в "слабкому" вузлі мережі, де напруга постійно просідає нижче 360 В. При КРП ефект від конденсаторів залежить від квадрата напруги. Якщо напруга впала, КРП видає значно менше потужності, ніж заявлено. Перевага СТАТКОМ- він здатен підтримувати номінальний струм навіть при глибоких просіданнях напруги, "витягуючи" мережу до норми.

Порівняльний аналіз технічної та економічної доцільності надано в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Порівняльний аналіз технічної та економічної доцільності:

Ситуація	КРП + ПМП	СТАТКОМ
Економія на штрафх (статична)	Вигідно	Дорого
Пуск 120 кВт в "острові" (від СЕС)	Ненадійно	Ідеально
Фільтрація гармонік (THD)	Шкідливо	Ефективно
Швидкість реакції	Секунди	Мілісекунди

Висновок: КРП доцільна якщо задача — просто не платити штрафи за реактив у нормальному режимі з потужною мережею. Якщо задача — енергонезалежність, робота з ВДЕ та захист обладнання від збоїв при пусках АД - СТАТКОМ окупиться швидше за рахунок відсутності аварійних зупинок.

Розрахунок нелінійних навантажень (тих, що створюють гармонійні спотворення) на об'єкті АПК за групами обладнання приведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2. Розрахунок сумарної потужності нелінійних навантажень за групами обладнання

Група обладнання	Встановлена потужність	Коефіцієнт нелінійності (THDi)	Розрахункова нелінійна потужність
Інвертори СЕС (500 кВт)	500 кВт	~3–5% (сучасні моделі)	15–25 кВт
Інвертор BESS (300 кВт)	300 кВт	~3–5%	9–15 кВт
Двигун 120 кВт (через ПЧ)	120 кВт	~30–40% (6-полюсний)	36–48 кВт
Системи LED та Офіс/РЗА	20 кВт	~15–20%	3–4 кВт
РАЗОМ	940 кВт	Середній THD: ~8–12%	~63–92 кВт

Згідно з нормативами (ДСТУ EN 50160), якщо сумарна потужність нелінійних споживачів перевищує 15–20% від потужності трансформатора, встановлення звичайної КРП стає ризикованим. Виникає ризик для експлуатації КРП, коли 60–90 кВт "нелінійного" навантаження створюватимуть струми високих частот. Конденсатори КРП мають низький опір для цих частот, що призведе до їхнього перегріву та резонансу. Пристрій СТАТКОМ потужністю 200 кВАр легко "поглине" ці 90 кВт гармонік, працюючи як активний фільтр. Це очистить синусоїду для реєстраторів СМІР, гарантуючи точність їхніх вимірювань.

Висновок:

1. Якщо Двигун 120 кВт пускається через ПМП (софт-стартер): Нелінійність висока лише під час пуску (10-15 сек). В інший час СЕС та BESS тримають мережу відносно чистою. Можна зекономити і поставити КРП з детюнінговими дроселями (7%).
2. Якщо Двигун 120 кВт працює через ПЧ (частотник): Нелінійність присутня постійно. КРП вийде з ладу за 6-12 місяців. СТАТКОМ є єдиним надійним варіантом.
3. При роботі в "Острові (Island Mode)": КРП може викликати автоколивання напруги з інверторами. Тільки СТАТКОМ.

Тобто для конфігурації (СЕС 500 + BESS 300 + АД 120) оптимальним є СТАТКОМ на 200 кВАр. Він закриває три задачі одночасно:

1. Безпечний пуск двигуна 120 кВт.
2. Фільтрація гармонік від інверторів.
3. Миттєва підтримка напруги в автономному режимі.

Якщо обирати варіант із КРП (конденсаторною установкою) для економії бюджету, обов'язково потрібні фільтрові (детюнінгові) дроселі. Без них гармоніки від СЕС та частотників швидко виведуть конденсатори з ладу.

1. Технічні вимоги до фільтрової КРП (7%). Для об'єкта (з урахуванням двигуна 120 кВт та інверторів) установка повинна мати такі параметри:

- Розстроювання (Detuning factor): 7% (або 189 Гц). Це стандарт для захисту від 5-ї гармоніки, яка є найбільш руйнівною для інверторних систем.

- Напруга конденсаторів: Не 400 В, а 440 В або 480 В. Це важливо, бо дросель трохи підвищує напругу на самих банках.

- Тиристорні ключі (замість контакторів): Для двигуна 120 кВт це критично — вони вмикають ступені за 20 мс (без затримок на розряд).

2. Вартість обладнання (орієнтовна для України) приведена в таблиці 3.3.. Для компенсації нашого навантаження потрібна установка потужністю близько 150–200 кВАр.

Таблиця 3.3.

Вартість КРП

Тип установки	Комплектація	Орієнтовна ціна
Базова КРП (без фільтрів)	Контактори + Конденсатори 400В	\$2,500 – \$3,500
Фільтрова КРП (7%)	Дроселі + Конденсатори 440В + Контактори	\$4,500 – \$6,500
Швидкодіюча фільтрова КРП	Дроселі + Тиристорні ключі	\$7,500 – \$9,500

СТАТКОМ на таку ж потужність коштує від \$12,000, тобто фільтрова КРП з тиристорами дозволяє зекономити близько 30-40% бюджету.

3. Порівняння вигоди: КРП + ПМП vs СТАТКОМ. Якщо обирати фільтрову КРП (\$8,000) та ПМП для двигуна (\$2,500), загальні витрати складуть \$10,500. Це майже дорівнює вартості одного СТАТКОМ (\$12,000), який замінює обидва пристрої та працює значно ефективніше в "островному" режимі. Висновок- для ПС 35 кВ (де бюджет обмежений):

-Якщо двигун запускається рідко — доцільно ставити фільтрову КРП (економія ~\$4,000).

- Якщо двигун працює постійно і вимушено прогнозується часто працювати автономно (від BESS) — краще доплатити \$2,000-\$3,000 і поставити СТАТКОМ. Він окупиться за рахунок меншого зносу акумуляторів BESS.

3.2. Аналіз технічної реалізації при пуску потужних АД та переваги над встановленням окремих стабілізаторів (автотрансформаторів)

Традиційні стабілізатори (вольтододавальні трансформатори або сервопривідні пристрої) програють СТАТКОМ за всіма ключовими параметрами в сучасних гібридних системах (Таблиці 3.4.;3.5.)

Таблиця 3.4. Загальні переваги над стабілізаторами (автотрансформаторами)

Характеристика	Стабілізатор / Автотрансформатор	СТАТКОМ
Швидкість дії	Дуже повільно (від 100 мс до кількох секунд)	Надшвидко (< 20 мс) встигає до того, як спрацює захист інверторів
Принцип роботи	Змінює коефіцієнт трансформації (механічно або реле)	Електронний синтез струму (без рухомих частин)
Робота з реактивом	Не компенсує реактивну потужність, лише піднімає напругу	Повна компенсація реактиву та фільтрація гармонік
Габарити та ККД	Великі, важкі, гріються, мають втрати в залізі	Компактні силові модулі, ККД > 98%
Ресурс	Обмежений кількістю перемикань контактів/реле	Практично необмежений (силова електроніка)

Таблиця 3.5. Технічна реалізація СТАТКОМ + Стабілізатор в ГЕС при пуску АД 120 кВт на об'єкті з СЕС 500 кВт

Ситуація	Зі стабілізатором (автотрансформатором)	Зі СТАТКОМ (150-200 кВАр)
Реакція на пуск	Повільна (0.5–2 сек). Напруга встигає впасти до 320В	Миттєва (10–15 мс). Напруга тримається на рівні 385–395 В
Доля СЕС 500 кВт	Вимикається через захист по напрузі (Under-voltage)	Продовжує працювати, не помічаючи пуску двигуна
Ресурс контактів	Високий знос реле або сервоприводу при кожному пуску	Відсутність механічного зносу (повністю електронне керування)
Вплив на BESS	Акумулятор отримує ударне навантаження	СТАТКОМ «закриває» потребу в реактиві, розвантажуючи BESS

Якщо ставити стабілізатор на ввід від ПС:

1. При пуску двигуна напруга впаде, стабілізатор почне перемикає обмотки. Поки він це робить (0.5 сек), СЕС вже відключиться за "Under-voltage".
2. Стабілізатори часто "конфліктують" з інверторами СЕС/BESS, викликаючи автоколивання напруги.
3. Стабілізатор не виправляє ($\cos \phi$), тобто ви продовжуєте платити штрафи Обленерго за реактивну енергію.

Висновок для проектування :СТАТКОМ — це динамічний пристрій, який лікує "причину" (дефіцит реактивної потужності), тоді як стабілізатор намагається боротися з "наслідком" (низькою напругою) занадто повільними методами. Для СГЕ (500 кВт СЕС) СТАТКОМ є обов'язковим елементом, якщо ви хочете реальної енергонезалежності та безперебійної роботи потужних агрегатів.

3.3. Технічні особливості проектування при реалізації СТАТКОМ в мережах АПК

Приклад конфігурації обладнання для АД 120 кВт. Найкраще підійде модульний СТАТКОМ (наприклад, 2 модулі по 100 кВАр або 4 по 50 кВАр):

1. Локальне підключення: Встановлюється безпосередньо в ГРЩ (головний розподільчий щит) ферми.
2. Режим керування: "Fast Voltage Control" (швидке регулювання напруги).
3. Зв'язок із СМПР: СМПР передає сигнал "Пуск АД" (якщо є можливість зняти сигнал з пускача) або СТАТКОМ спрацьовує автономно за фактом зміни вектора напруги.

Економічна перевага у такому випадку: Стабілізатор такої потужності (на 120–150 кВт), він коштуватиме близько \$5,000–\$7,000, але не вирішить проблему відключення СЕС. СТАТКОМ на 150 кВАр коштуватиме дорожче (орієнтовно \$12,000–\$15,000), але він забезпечить безперебійну роботу генерації 500 кВт, яка за годину простою влітку втрачає близько 4,000 грн чистого прибутку.

Для підключення СТАТКОМ до мережі живлення АД 120 кВт використовується паралельна схема. **Важливо розуміти: СТАТКОМ не ставиться «в розрив» кабелю двигуна, а підключається до тих самих шин, що й двигун.** Технічні особливості реалізації:

1. Точка зняття сигналу (Трансформатори струму):

Для того, щоб СТАТКОМ миттєво зреагував на пуск АД 120 кВт, його вимірювальні ТС повинні стояти або на загальному вводі (щоб бачити просідання), або безпосередньо на кабелі живлення двигуна. Це дозволяє пристрою побачити стрибок струму за 1-2 мс і видати компенсацію ще до того, як напруга почне падати.

2. Захист (QF2):

Автоматичний вимикач для СТАТКОМ на 200 кВАр вибирається з

запасом (зазвичай 320А), оскільки СТАТКОМ може короткочасно перевантажуватися для максимально швидкої стабілізації.

3. Кабельна лінія:

Кабель від шин до СТАТКОМ має бути максимально коротким, щоб мінімізувати власний індуктивний опір лінії, що критично для швидкодії системи.

4. Взаємодія з ПЧ або ПМП (Soft Start):

Якщо двигун 120 кВт підключений через частотний перетворювач (ПЧ), СТАТКОМ буде працювати переважно на фільтрацію гармонік, які створює ПЧ. Якщо ж пуск прямий або через "софт-стартер" — СТАТКОМ фокусується на підтримці напруги.

Тоді перевага використання СЕС 500 кВт полягає в тому, що у момент пуску двигуна 120 кВт СТАТКОМ стає "віртуальним генератором" реактивної потужності. Без нього цей реактивний струм потягнеться з мережі або інверторів. Інвертори СЕС побачать це як перевантаження або глибокий провал напруги і підуть у захист. СТАТКОМ ізолює вплив двигуна на інвертори СЕС.

Важлива деталь: При проектуванні шафи СТАТКОМ для АПК обов'язково потрібно передбачити активне охолодження з пилофільтрами, оскільки силова електроніка СТАТКОМ дуже чутлива до перегріву під час частих пусків потужних двигунів.

Електрична схема (Однолінійна схема підключення (Power & Control) підключення СТАТКОМ для компенсації пуску двигуна 120 кВт у гібридній системі (СЕС 500 кВт + BESS 300 кВт) складається:

1. Шафа СТАТКОМ: Це металева шафа (зазвичай 800x600x2000 мм), що стоїть поруч із ГРЩ. В середині знаходяться силові IGBT-модулі, конденсатори постійного струму та контролер.
2. Точка підключення: СТАТКОМ підключається до шин ГРЩ мідним кабелем або шинним мостом.

3. Вимірювальні ланцюги: На кабель, що йде до двигуна 120 кВт, надіваються Трансформатори струму (ТС). Сигнал від них іде на контролер СТАТКОМ.

Графік процесу (відбувається в момент пуску):

- $t = 0$ мс: Подається живлення на АД 120 кВт. Струм різко зростає.
- $t = 2-5$ мс: СТАТКОМ через ТС "бачить" стрибок реактивного струму.
- $t = 10-15$ мс: СТАТКОМ синтезує протилежний реактивний струм.

Результат: Напруга на головній шині (Bus) "просідає" лише на 2-3% замість 15-20%. Інвертори СЕС та BESS продовжують працювати в штатному режимі.

Технічні параметри для закупівлі:

- Тип: SVG (Static Var Generator).
- Потужність: 200 кВАр (забезпечує запас для АД 120 кВт).
- Час відгуку: < 15 мс.
- Інтерфейс: RJ45 (для СМПП/Ethernet).
- Ступінь захисту: IP54 (для умов АПК).

Розрахунок параметрів кабелів та захисної апаратури проводиться з урахуванням пускових навантажень та для підключення СТАТКОМ потужністю 200 кВАр (номінальний струм близько 290–300 А) та двигуна 120 кВт (номінальний струм близько 230 А):

1. Розрахунок для СТАТКОМ (200 кВАр)

СТАТКОМ працює в динамічному режимі, тому кабель і захист вибираються з невеликим запасом по струму.

- Розрахунковий струм (I_{nom}) ~ 290 А.

- Автоматичний вимикач: рекомендується номінал 400 А (наприклад, серія MCCB з електронним розчеплювачем для налаштування селективності).

- Перетин кабелю (Мідь, Cu) - Оптимально: 150 мм² (допустимий тривалий струм ~320-350 А при прокладанні в повітрі/лотку), якщо лінія довга (> 20 м), краще використовувати 185 мм², щоб мінімізувати індуктивний опір, що важливо для швидкодії пристрою - $1 \times (3 \times 150 + 75)$.

2. Розрахунок для двигуна АД (120 кВт)

Для двигуна важливий не лише номінальний струм, а й здатність кабелю витримувати пусковий стрибок без надмірного падіння напруги.

- Розрахунковий струм (I_{nom}) ~230 А.

- Автоматичний вимикач: номінал 250 А або 320 А (з характеристикою D або регулюванням відсічки під пусковий струм).

- Перетин кабелю (Мідь, Cu) - Мінімально: 95 мм² (тривалий струм ~250 А). Рекомендовано (з урахуванням пуску): 120 мм² - $1 \times (3 \times 120 + 70)$.

- Тип кабелю: Використовуйте гнучкий кабель (наприклад, ВВГнг або РППШ), оскільки він зручніший для підключення до клемних блоків силової електроніки СТАТКОМ.

- Заземлення: Для СТАТКОМ обов'язково використовуйте окрему шину заземлення великого перетину (не менше 50% від фазного), оскільки пристрій містить фільтри для скидання високочастотних завад.

- Відстань: Намагайтеся розмістити СТАТКОМ якомога ближче до двигуна 120 кВт або до головних шин ГРЩ. Кожен зайвий метр кабелю додає індуктивність, яка сповільнює реакцію системи на пуск.

Марки стабілізаторів та СТАТКОМ від виробників з їх цінами та характеристиками для ГСЕ (СЕС 500 кВт, BESS 300 кВт, АД 120 кВт) (обладнання, яке офіційно представлено в Україні. Ціни є орієнтовними

(бюджетними) станом на 2025 рік для промислового сектору) – Таблиці 3.6., 3.7..

Таблиця 3.6.

СТАТКОМ (SVG — Static Var Generators) час спрацювання <15 мс.

Виробник / Серія	Потужність	Ключові характеристики	Орієнтовна ціна
SINE X (серія SVG)	200 кВАр	Модульна конструкція, швидкість <10 мс, ККД 98.5%. Найкраща сумісність із СЕС	\$11,500 – \$13,000
Delta Electronics (SVG2000)	200 кВАр	Промисловий стандарт, висока стійкість до гармонік, вбудований моніторинг	\$14,000 – \$16,500
SATEC (модуль Р600)	150 кВАр	Ізраїльська технологія, ідеальна інтеграція з реєстраторами SATEC РМ180	\$10,000 – \$12,500
ABB (PQFS)	200 кВАр	Преміум сегмент. Працює як активний фільтр + СТАТКОМ. Найвища надійність	\$19,000 – \$23,000

Таблиця 3.7.

Стабілізатори напруги (промислові /сервопривідні/електронні)

Виробник / Серія	Потужність	Тип / Швидкість	Орієнтовна ціна
ORTEA (Orion Plus, Італія)	200 кВА	Сервопривідний, точність $\pm 0.5\%$. Дуже важкий та надійний	\$12,000 – \$15,000

EREA (Бельгія)	160 кВА	Електронний (тиристорний), швидкість реакції 20-40 мс	\$9,000 – \$11,000
Укртехнологія (Universal)	3х63 кВА)	Український виробник, симісторний тип. Дешевий в обслуговуванні	\$5,000 – \$7,000
Герц (Елекс, Україна)	3х50 кВА	Тиристорний, 36 ступенів регулювання. Хороший сервіс	\$4,500 – \$6,000

Висновок:

1. Технічна доцільність: Стабілізатор (наприклад, ORTEA) просто підніме напругу, але він не встигне за пуском двигуна 120 кВт, і СЕС все одно «відвалиться» по захисту. СТАТКОМ (наприклад, SINE X) — єдиний пристрій, який врятує інвертори від зупинки.
2. Ціна/Результат: Хоча українські стабілізатори (Елекс) дешевші, вони не вирішують проблему штрафів за реактивну енергію та не забезпечують «чисту» синусоїду для BESS.
3. Рекомендація: Для підприємства АПК з ВДЕ найкращим вибором за співвідношенням ціна/якість сьогодні є SINE X SVG. Він дешевший за європейські аналоги (ABB/Schneider), але має спеціалізовані алгоритми для роботи з сонячними інверторами.

Порівняльна специфікація (BoQ) для тендеру, щоб отримати пропозиції на обидва варіанти від постачальників. Для гібридних систем у секторі АПК важливо обирати виробників, які мають не лише офіційне представництво, а й сертифіковані сервісні центри в Україні, здатні забезпечити оперативний виїзд (особливо в сезон збору врожаю).

Ось перелік перевірених рішень, адаптованих до інтеграції з СМПП:

1. SINE X (Китай – преміум сегмент). На сьогодні це одне з найпопулярніших рішень в Україні для СЕС та промисловості завдяки ідеальній сумісності з інверторами. Серія SVG (Static Var Generator). Модульна конструкція (можна нарощувати потужність). Дуже висока швидкість реакції (<15 мс). В Україні є великий склад запчастин. Повна підтримка Modbus TCP для зв'язку з вашою СМІР.
2. ABB (Швейцарія/Швеція). Класика промислової енергетики. Серія PQFS або PCS100. Найвищий рівень надійності та найкращі алгоритми фільтрації гармонік. Особливості - ороже за китайські аналоги, але ідеально працює в жорстких умовах (пил, волога), що важливо для АПК. Мають потужний сервісний офіс у Києві.
3. Schneider Electric (Франція). Моделі AccuSine PCS+. Ці пристрої можуть працювати одночасно як СТАТКОМ і як активний фільтр гармонік. Дуже зручний інтерфейс налаштування. Найширша мережа партнерів по всій Україні, що спрощує технічне обслуговування.
4. Elit (Україна/ЄС). Українська компанія, яка постачає та обслуговує рішення на базі європейських компонентів. Глибока адаптація під вимоги українських обленерго. Фахівці компанії часто самі допомагають з налаштуванням логіки взаємодії СМІР — СТАТКОМ.

Повірка та сертифікація (При виборі обов'язково вимагайте) сертифікат відповідності ДСТУ (для безпроблемного введення в експлуатацію) та протоколи випробувань на ЕМС (електромагнітну сумісність), щоб робота СТАТКОМ не створювала завад для Wi-Fi мереж ферми або систем GPS-навігації техніки.

Висновки по розділу 3

На підставі аналізу локальної компенсації реактивної потужності з урахуванням сумарної потужності нелінійних навантажень СТАТКОМ стає економічно та технічно вигіднішим за КРП та ПМІР у випадках, коли система має низьку інерцію (багато ВДЕ) або потребує миттєвої реакції. Тому вибір

СТАТКОМ є безальтернативним у випадках роботи в автономному режимі. Якщо підстанція підприємства або ферма від'єднується від мережі Обленерго і живиться лише від СЕС та BESS. Також при частому пуску двигунів. Якщо двигун 120 кВт (або інші АД) запускається частіше 5–10 разів на годину. При застосуванні ПМП/КРП тиристори ПМП та контакти КРП сильно перегріваються. Конденсаторам потрібен час на розряд (1-3 хв), інакше при повторному ввімкненні виникне вибухонебезпечний кидок струму. СТАТКОМ готовий до роботи 24/7 без пауз на розряд, оскільки не накопичує енергію в ємностях надовго. Наявність нелінійних навантажень (гармоніки). Якщо на фермі багато частотних перетворювачів, комп'ютерної техніки або сучасного LED-освітлення. При КРП конденсатори мають низький опір для високих частот. Вони вбирають у себе гармоніки, перегріваються і "роздуваються" (виходять з ладу). Перевага СТАТКОМ - він працює як активний фільтр, активно пригнічуючи гармоніки, що покращує якість напруги для чутливої електроніки СМПП та РЗА. Необхідність підтримки напруги (Voltage Support). Якщо ПС знаходиться в "слабкому" вузлі мережі, де напруга постійно просідає нижче 360 В. При КРП ефект від конденсаторів залежить від квадрата напруги. Якщо напруга впала, КРП видає значно менше потужності, ніж заявлено. Перевага СТАТКОМ- він здатен підтримувати номінальний струм навіть при глибоких просіданнях напруги, "витягуючи" мережу до норми.

ВИСНОВКИ

Проведено аналіз адаптивних систем управління потоками РП АПК. Природа виникнення аварій ГСЕ в АПК лежить на стику випадкового характеру відновлюваної енергії та жорстких технологічних вимог аграрного виробництва. 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 та СТАТКОМ гарантує стабільну

роботу РЗА і повну технологічну безпеку агровиробництва. Для розглянутої конфігурації надійність досягається через динамічний баланс. Система повинна проектуватися не як набір окремого обладнання, а як єдиний цифровий комплекс, де СТАТКОМ виступає швидким стабілізатором, який миттєво адаптує роботу потужної, але нестабільної СЕС під мінливі потреби підприємства АПК. Оскільки інверторна генерація позбавлена природної механічної інерції, усі методи спрямовані на штучне створення інерції, надшвидкісне регулювання балансу потужності (система пріоритезації навантаження) та оптимізацію пускових режимів споживачів. Для підвищення динамічної стійкості гібридних мереж електропостачання АПК (особливо у конфігурації «Мережа + СЕС 500 кВт+ BESS 300 кВт + СТАТКОМ та важким навантаженням 120 кВт» розглянуто застосування комплексу технологічних, структурних та алгоритмічних методів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 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
2. 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.

3. 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: 0,927Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 47 с.

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

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'янку. Особливості застосування систем гнучкої передачі змінного струму (FACTS) в сучасних електроенергетичних мережах/ С.П. Денисюк, Д.Г. Дерев'янку//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. Папайка, 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 МЕН 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).