



Національна академія наук України

Інститут
електродинаміки



Вінницький Національний Технічний
Університет

ЦИФРОВА ТРАНСФОРМАЦІЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ ТА ЇЇ ІНТЕГРАЦІЯ В ЄВРОПЕЙСЬКИЙ ЕНЕРГОПРОСТІР

РОБОТА

на здобуття Національної премії України імені Бориса Патона

Київ – 2026

БЛІНОВ Ігор Вікторович – член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор, заступник директора з наукової роботи Інституту електродинаміки НАН України.

ДЕНИСЮК Сергій Петрович – доктор технічних наук, професор, завідувач відділу Інституту електродинаміки НАН України.

ЛЕЖНЮК Петро Дем'янович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри електричних станцій і систем Вінницького національного технічного університету.

УЩАПОВСЬКИЙ Костянтин Валерійович – доктор економічних наук, член Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг.

СЛОБОДЯН Руслан Олександрович – доктор філософії, член Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг.

КОЗАЧУК Олег Іванович – доктор філософії, віце-президент ГС «Асоціація з енергоефективності та енергозбереження».

МІРОШНИК Володимир Олександрович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту електродинаміки НАН України.

СПОДИНСЬКИЙ Олександр Володимирович – провідний інженер Інституту електродинаміки НАН України.

Українська енергетика сьогодні опинилася у складних умовах війни (погіршення безпекової ситуації в нашій країні та постійні ризики порушення роботи критичної енергетичної інфраструктури) та водночас переживає процеси модернізації й поглибленої інтеграції з енергетичною системою Європи.

Особливої актуальності на державному рівні набуває забезпечення стійкої та безперебійної роботи ОЕС України на основі застосування передових технологій цифрової трансформації електромереж. Для стратегічної перебудови енергосистеми України важливим є розширення енергетичної співпраці з ЄС, формування стійкої, гнучкої та адаптивної електроенергетичної системи, яка б враховувала пріоритети трансформації енергетики провідних країн ЄС, реальний баланс генерації та споживання, структуру генеруючих потужностей в Україні.

Повноцінна інтеграція енергетичних ринків України та країн ЄС підвищує рівень енергетичної безпеки у Європі. Однак така інтеграція вимагає вдосконалення технічної та експлуатаційної відповідності ОЕС України новим вимогам Європейської мережі операторів систем передачі електроенергії (ENTSO-E), повної технологічної сумісності нормативно-правової бази, розвиток взаємопов'язаних ринків електроенергії та потужностей.

Цифрова трансформація електроенергетики, базуючись на впровадженні сучасних ІТ-технологій (зокрема, моніторингу та керуванні) у виробництво, передачу та розподіл електроенергії з метою створення «розумних мереж» (Smart Grid)), для України перетворюється з інструмента оптимізації на стратегічний засіб фізичного виживання енергосистеми, підтримки соціальної стабільності й довіри суспільства.

Згідно Плану дій ЄС «Цифровізація енергетичної системи» (COM(2022) 552), прийнятого Єврокомісією 18 жовтня 2022 р., цифровізація дозволяє суттєво покращити доступність, сталість та стійкість енергетичної системи. Цифровізація стає центральним елементом сучасного розвитку енергетики, зокрема, за напрямками моніторингу та керування потоками енергії, оптимізації енергетичного балансу, побудови цифрових інтелектуальних мереж, координації діяльності операторів системи передачі та розподілу електроенергії, забезпечення проактивної поведінки споживачів.

В українських реаліях застосування цифрових технологій у вітчизняній енергосистемі, як критичної інфраструктурної складової енергетичної безпеки, доцільно реалізувати на поєднанні механізмів стійкості, живучості та відновлюваності електроенергетичної системи згідно вимог ENTSO-E.

На сьогодні актуальність забезпечення стійкого розвитку електромережевого комплексу України визначає енергетичну безпеку як одну із пріоритетних частин національної безпеки.



Завданням роботи є вирішення критичної науково-технічної проблеми забезпечення стійкості, живучості та відновлюваності ОЕС України, у тому числі в умовах безпрецедентних воєнних загроз і фізичного дефіциту потужності. Це досягається через розробку програмних та апаратних засобів протистояння системним аваріям (блекаутам), забезпечення синхронної роботи з ENTSO-E.

Метою роботи є розроблення та реалізація на сучасному світовому рівні науково-технологічної платформи цифрової трансформації електроенергетики України, складові якої забезпечують повну синхронізацію ОЕС України з ENTSO-E, підвищення стійкості та живучості енергосистеми в умовах воєнних дій, усунення системних аварій, швидке відновлення та забезпечення гнучкості, балансування локальних електроенергетичних систем (ЛЕС) відповідно до директив та безпекових стандартів ЄС і НАТО. Інтеграцію енергосистеми України в європейський енергопростір досягнуто створенням і впровадженням унікальних систем моніторингу та керування на рівнях передачі (750 – 220 кВ) та розподілу (110 – 0,4 кВ) електроенергії, реалізацією сучасної технічної політики, складовою якої є розроблення Концепції «розумних» мереж (Smart Grid) з впровадженням цілісної системи міжнародних стандартів.

Цифрова трансформація електроенергетичного сектора визначається як розвиток сучасних електроенергетичних систем і мереж, зміна звичних бізнес-моделей завдяки використанню цифрових технологій та забезпеченню нових можливостей щодо організації взаємодії та підвищення економічної ефективності участі у нових чи існуючих сегментах ринку електричної енергії та послуг за умов досягнення безперебійності електропостачання споживачів та надійності функціонування електричних мереж і систем, їх стійкості, забезпечення балансування та гнучкості систем і мереж. Цифрова трансформація може бути визначена як нове використання цифрових технологій для прискорення впровадження нових бізнес-стратегій.

Цифрова трансформація електроенергетики на основі запропонованих напрямків стає технологічною платформою побудови енергетики України нового покоління.

- розроблено та реалізовано цілісну науково-технологічну платформу цифрової трансформації електроенергетики України, яка забезпечила успішну підготовку та синхронізацію ОЕС України з ENTSO-E з точки зору її технічної та експлуатаційної відповідності;
- розроблені унікальні цифрові пристрої синхронізованих векторних вимірювань (PMU, Phasor Measurement Units) «Регіна-Ч» як базовий елемент системи широкомасштабного моніторингу (WAMS, Wide Area Monitoring System) ОЕС України;
- здійснено розвиток цифрових технологій при побудові автоматизованих систем керування технологічними процесами (АСК ТП) електроенергетичних підстанцій (ПС) 750 кВ нового покоління, технологічно сумісних з моніторинговими системами ENTSO-E;
- розроблено сучасні засоби вдосконаленої адаптивної протиаварійної автоматики електроенергетичних систем, направленої на підвищення енергетичної стійкості енергетики у воєнний час та повоєнного відновлення економіки України;
- розроблено методи і засоби балансування режимів електроенергетичних систем з відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ) з використанням цифрових Smart Grid технологій з прогнозуванням графіків погодинного генерування (відпуску) і споживання електроенергії на добу наперед;
- запропоновано нові механізми стимулювання розвитку та підвищення економічної ефективності роботи виробників електроенергії з ВДЕ на основі створення оптимальних балансуючих груп;
- сформовано основи побудови в Україні взаємопов'язаних ринків електроенергії та потужностей з аналогічними ринками в Європі;
- визначено пріоритетні напрямки розвитку національної нормативно-технічної бази, необхідної для практичної реалізації цифрової трансформації електроенергетики України, розроблено систему національних стандартів у сфері Smart Grid, яка є технологічно сумісною з стандартами та директивами ЄС і НАТО;
- в рамках реалізації державної технічної політики у сфері цифрової трансформації електроенергетики розроблено принципи та основні складові Концепції впровадження «розумних» мереж в Україні до 2035 року.

Комплексний розгляд процесів спостережуваності (моніторингу) та керованості (керування) на системному рівні із залученням цифрових технологій на рівні як міждержавних зав'язків (інтеграції з ENTSO-E), так і за рівнями напруги (надвисока та висока, середня, низька) забезпечив успішне вирішення критичної науково-технічної проблеми забезпечення стійкості, живучості ОЕС України, у тому числі в умовах безпрецедентних воєнних загроз і фізичного дефіциту потужності.

ТИП ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ОБЛАДНАННЯ ЗА НАПРЯМКАМИ спостережуваності (моніторингу) та керованості (керування) з сферами застосування

Предметна сфера застосування	Спостережуваність (моніторинг)	Керованість (керування)
Інтеграція з ENTSO-E	Спільна модель спостережуваності (застосування систем WAMS)	Диспетчерське керування, робота на європейських платформах обміну балансуючою енергією, керування на міждержавних ринках процесами експорту/імпорту електроенергії
Мережі надвисокої та високої напруги (750 – 220 кВ)	Системи WAMS	Оперативне та дистанційне (диспетчерське) керування, системи протиаварійної автоматика
Мережі середньої напруги (110 – 10 кВ)	Адаптовані системи WAMS та PMU, моніторинг стану підстанцій, Smart-моніторинг	Керування технологічними процесами підстанцій, балансування режимів систем з ВДЕ (керування гнучкістю), керування на локальних ринках електроенергії з ВДЕ
Мережі низької напруги (1,0 – 0,4 кВ)	Системи μWAMS та μPMU, Smart-моніторинг, динамічна тарифікація	Системи енергетичного менеджменту ЛЕС / Microgrid, керування попитом (DSM)

Вплив процесу цифровізації на стадії розвитку Smart Grid

Процес цифровізації	Стадія розвитку Smart Grid		
	Smart Grid 1.0	Smart Grid 2.0	Smart Grid 3.0
Оцифровування	++	+++	+++
Цифровізація	+	++	+++
Цифрова трансформація		+	++



Комплексні дослідження авторів в межах роботи

Тип	Системи передачі	Системи розподілу	Локальні електроенергетичні системи	Споживач	Виробник з ВДЕ
Моніторинг	+	+	+	+	
Керування		+	+	+	+
Стандартизація, нормативна база	+	+	+		+
Ринок	+	+	+	+	+



Пристрої PMU «Регіна-Ч» та системи WAMS в ОЕС України відіграли роль «цифрового зору» енергосистеми під час ізольованого режиму з 24 лютого 2022 р. та синхронізації з ENTSO-E з 16 березня 2022 році, забезпечуючи висока точність моніторингу, доказ стабільності для ENTSO-E, виявлення перетоків у реальному часі, синхронізація в реальному часі.

- підтвердити ENTSO-E здатність України гасити коливання без зовнішньої допомоги;
- забезпечити дистанційний контроль над фазовими кутами напруги, що необхідно для безпечного замикання ліній із Європою;
- запобігти каскадним аваріям у перші дні війни завдяки високій швидкості оновлення даних.

ТОЧКИ З'ЄДНАННЯ ОЕС УКРАЇНИ З ENTSO-E, де були розміщені PMU «Регіна-Ч», які були під час процесів інтеграції ОЕС України в європейський енергопростір з підключенням до WAMS континентальної енергомережі ENTSO-E:

- підстанція 750 кВ «Західноукраїнська»;
- підстанція 400 кВ «Мукачєво»;
- Бурштинська ТЕС.



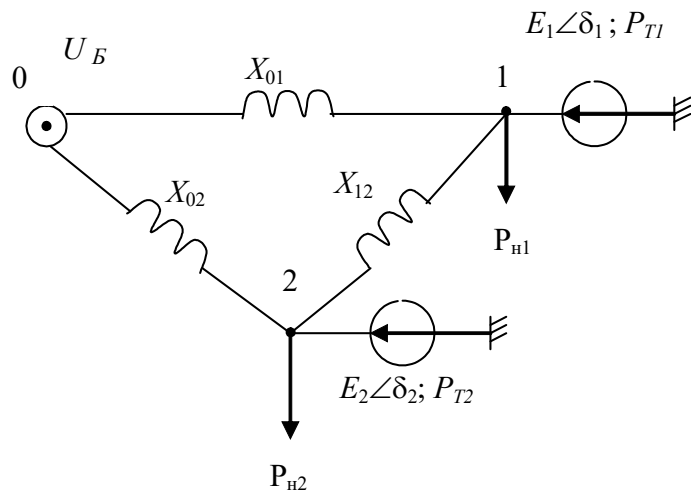
Підтвердженням ролі цифровізації та систем моніторингу (WAMS/PMU) у процесі синхронізації є офіційні документи, що описують технічну підготовку НЕК «Укренерго»:

- без цифрового контролю за стабільністю системи європейські оператори не дали б згоди на об'єднання;
- саме наявність даних у реальному часі дозволила ENTSO-E переконатися, що українська система не «завалить» європейську;
- встановлення пристроїв PMU на ключових вузлах, що було прямою вимогою ENTSO-E для верифікації динамічних моделей енергосистеми;
- цифровізація була визначена як можливість бачити стан мережі з дискретністю в мілісекунди, що було критично під час випробувань в ізолюваному режимі з 24 лютого 2022 року, коли дані PMU «Регіна-Ч» передавалися в онлайн-режимі європейським партнерам для підтвердження того, що ми тримаємо частоту самостійно.

WAMS та PMU «Регіна-Ч» забезпечила синхронізацію української мережі з європейською. Застосування WAMS та PMU «Регіна-Ч» для підвищення стійкості енергосистеми України: запобігання каскадним аваріям (блекаутам); синхронізація з енергосистемою ЄС (ENTSO-E); моніторинг низькочастотних коливань; швидке відновлення після блекаутів (Black Start); аналіз «цифрових слідів» після атак.

Саме WAMS на базі PMU «Регіна-Ч» тривалий час забезпечували моніторинг межі між «Бурштинським островом» з ENTSO-E та основною частиною ОЕС України ще до їх повної синхронізації. Алгоритми WAMS та PMU «Регіна-Ч» налаштовані під специфічні перехідні процеси, характерні для довгих ліній 750 кВ, якими володіє Україна.

Синхронізовані виміри векторів напруги в контрольованих перетинах та їх інформативність

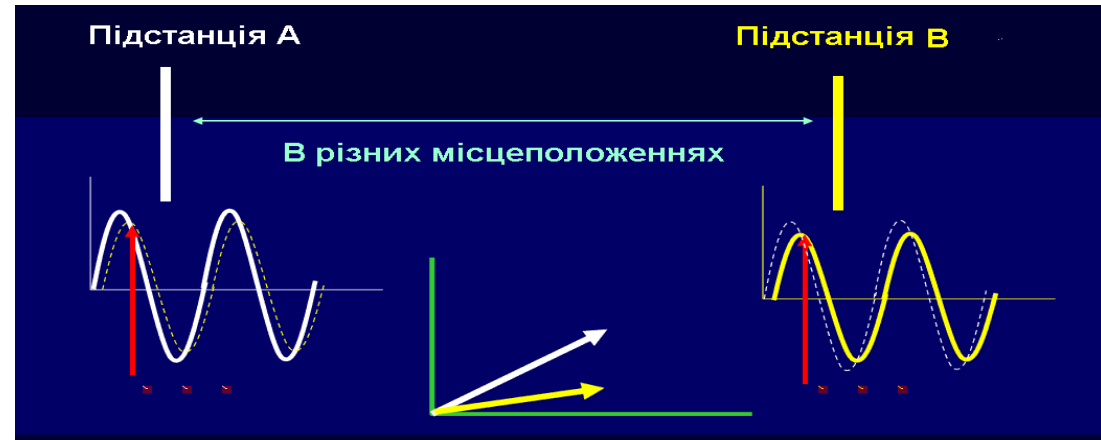


Здійснюється аналіз електромагнітних процесів у контрольованих перетинах:

$$P_1 = P_{T1} = \frac{E_1 U_B}{X_{01}} \sin(\delta_1 - \delta_0) + \frac{E_1 E_2}{X_{12}} \sin(\delta_1 - \delta_2) + P_{H1}$$

$$P_2 = P_{T2} = \frac{E_2 U_B}{X_{02}} \sin(\delta_2 - \delta_0) + \frac{E_2 E_1}{X_{12}} \sin(\delta_2 - \delta_1) + P_{H2},$$

Оцінка електричних зв'язків в контрольованих перетинах ЛЕП, де взаємні кути між векторами напруги на початку і в кінці ЛЕП, є досить інформативними в аспекті визначення допустимості завантаження кожної, окремо взятої ЛЕП.



Задача оцінювання стану з використанням синхронізованих вимірів кутів напруги є комплексною й включає декілька взаємозалежних підзадач, до яких, насамперед, належать наступні: перевірки стану топології мережі; перевірки можливості спостереження режиму й усунення дефіциту телеметричної інформації; відбраковування грубих помилок у вимірах; розрахунок режиму відповідно до прийнятого критерію оцінювання.

Основою алгоритму оцінювання стану, реалізованого в РМУ «Регіна-Ч», є метод зважених найменших квадратів. Збалансований електричний режим визначається в результаті мінімізації наступної цільової функції:

$$f = \sum_{i=1}^n r_i \cdot [z_i - \bar{z}_i(u)]^2$$

де n – число вимірів; z_i – значення i -го виміру; $\bar{z}_i(u)$ – функція, що відображає залежність між i -м виміром і незалежними параметрами – модулями й фазами вузлових напруг; r_i – ваговий коефіцієнт, що характеризує точність i -го виміру.

PMU «Регіна-Ч» забезпечує прецизійне вимірювання струму, напруги, потужності, фази і частоти та реєстрацію до 32 аналогових сигналів в кільцевому буфері протягом 240 год., їх обробку, надання інформації у вигляді цифрових масивів, текстових повідомлень, графіків і таблиць і передачу її на будь-які рівні з прив'язкою до сигналів точного часу, одержуваних від GPS-приймача.

Призначення PMU «Регіна-Ч»:

– моніторинг в реальному часі режимних параметрів роботи енергосистем, стійкості, коливань, поточних значень кутів та частоти, режимів роботи основних механізмів АЕС, в тому числі ГЦН, при пуску, роботі та гальмуванні агрегатів, стану засобів регулювання напруги;

- вимірювання сили, напруги, потужності, фази та частоти змінного струму;
- автоматична реєстрація ненормальних режимів роботи;
- зберігання в пам'яті результатів вимірювання;
- програмна обробка вимірювальної інформації, а також передачі її на будь-які рівні з прив'язкою до сигналів точного часу, які отримують від GPS приймача.

PMU «Регіна-Ч» пройшла державну метрологічну атестацію в органах ДП «Укрметртестстандарт».

Технічні характеристики PMU «Регіна-Ч»

Всього на об'єктах електрогенерації та магістральних електричних мереж впроваджено 30 PMU «Регіна-Ч», що стали основою побудови першої черги WAMS України.



№ п/п	Назва	Кількість контро-льованих приєднань	Похибка визначення частоти, Гц	Похибка визначення кута напруги, град	Похибка синхронізації часу, мкс	Похибка визначення діючого значення напруги, %	Похибка визначення діючого значення струму, %
1	«Регіна-Ч» (Україна)	5	0,0008	0,08	4*	0,2	0,2
2	BEN6000 (США)	1	—	0,05	40	0,1	0,2
3	SEL 487 (США)	1	0,005	0,125	10	0,1	1,0
4	RES 670 (Швеція)	2	0,005	0,1	1	0,1	0,1

● PMU «Регіна-Ч» автоматично формує аварійні файли інформації при досягненні вхідними сигналами уставок запуску: зміна частоти в діапазоні 0,001 – 2 Гц з кроком 0,001 Гц; зміну вхідної напруги в діапазоні 0 – 120% $U_{ном}$.

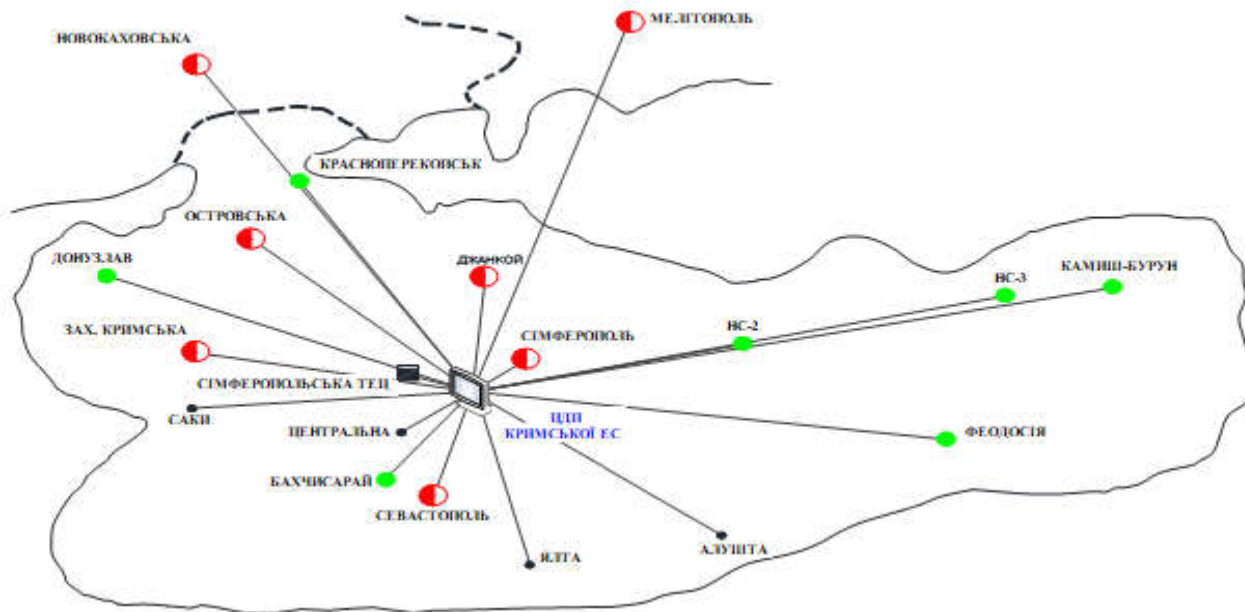
● Точності вимірювання: струму і напруги 0,2%; потужності 0,5%; частоти 0,001 Гц; кута вектора 0,1°; похибка синхронізації часу 1 мкс.

Функції PMU «Регіна-Ч» у складі WAMS України:

- виконання синхронізованих векторних вимірювань параметрів поточного режиму роботи енергосистеми в різних перетинах, збір, обробка та зберігання цих даних, подання інформації диспетчерам енергосистеми;
- розрахунок параметрів поточного режиму роботи енергосистеми в режимі реального часу;
- контроль параметрів стабільності енергосистеми в режимі реального часу (виявлення коливань частоти, потужності, різниці кутів і т.п.);
- видача черговим (диспетчерам) та в SCADA-системи сигналів попередження і тривоги у разі виявлення відхилень від заданих параметрів енергосистеми;
- надання даних для післяаварійного аналізу процесів в енергосистемі;
- обмін даними з SCADA-системами.

ПЕРША ЧЕРГА WAMS В ОЕС УКРАЇНИ

Схема розміщення обладнання WAMS Кримської ЕС



Побудова перших в Україні PMU «Регіна-Ч» дозволила не тільки забезпечити пооб'єктний моніторинг, а й на рівні ОЕС України реалізувати систему широкомасштабного моніторингу WAMS, зокрема створити WAMS Кримської ЕС. Розроблені за участі авторів WAMS ОЕС України забезпечили операційну ефективність роботи ОЕС України в острівному режимі, при її синхронізації з ENTSO-E та роботі в структурі ENTSO-E у 2022–2025 роках, значне скорочення тривалості системних аварій в 2022–2025 рр. Українські розробки PMU «Регіна-Ч» є повністю технологічно сумісними з аналогічними системами країн ЄС, забезпечуючи систематичний моніторинг в лініях передачі електроенергії та можливість підвищення рівня цифровізації загальноєвропейської системи моніторингу та регулювання, покращуючи їх керованість та спостережуваність.

ЗАВДЯКИ СТВОРЕНІЙ СИСТЕМІ WAMS ЕНЕРГЕТИКА УКРАЇНИ СЬОГОДНІ ВЖЕ В ЄС.

Розміщення PMU «Регіна-Ч» в ОЕС України

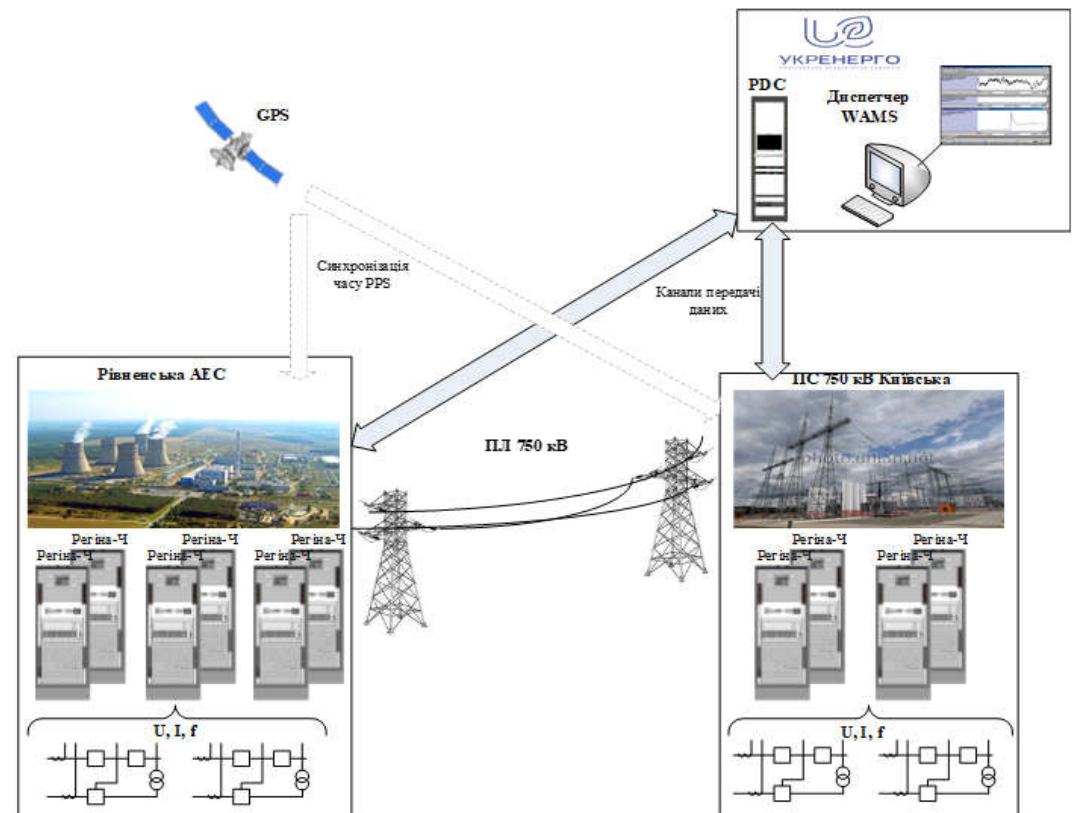


Результати вимірювання PMU «Регіна-Ч» в WAMS Кримської ЕС

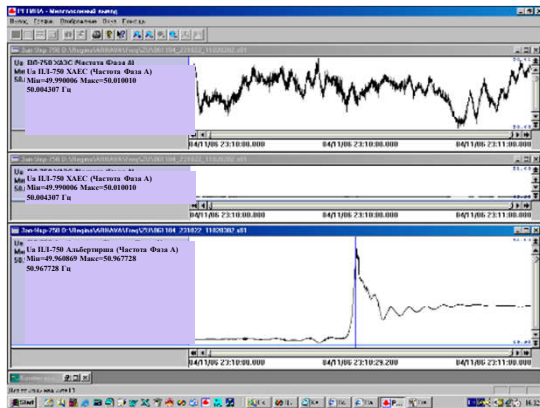
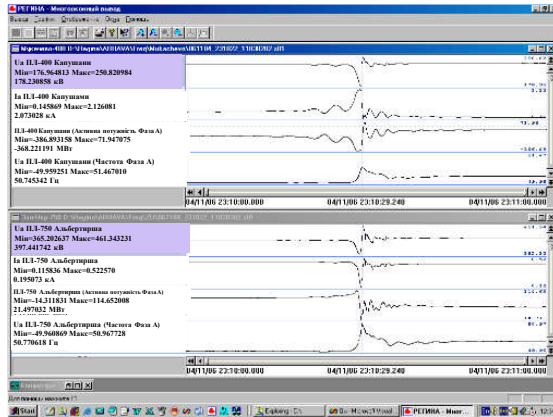


Переваги WAMS для ЕЕС нового покоління:

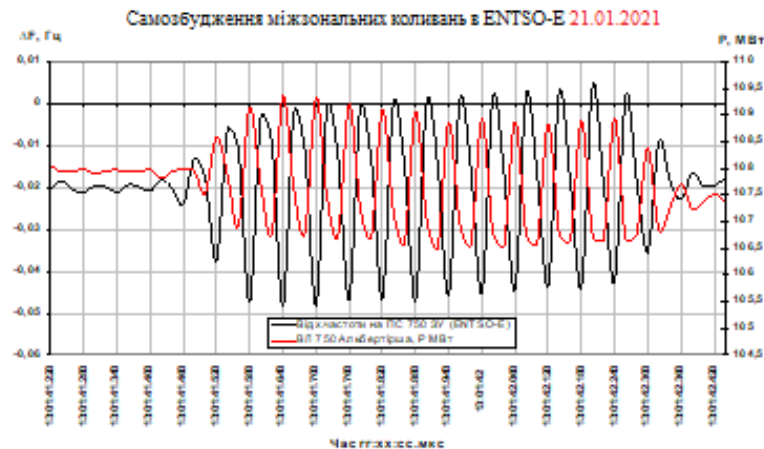
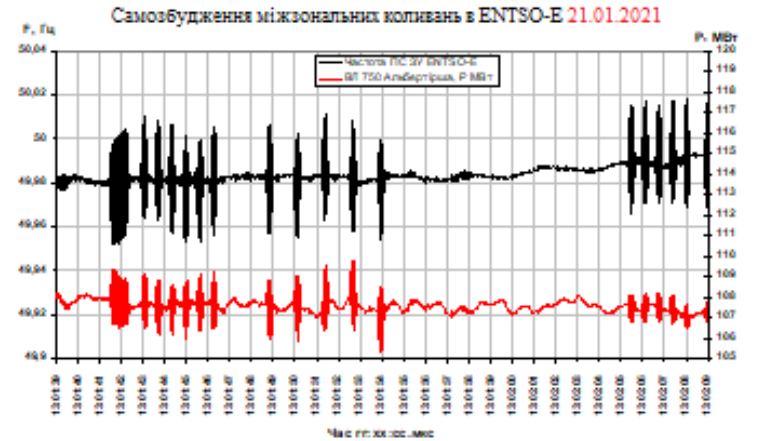
- моніторинг та контроль електромережі в режимі реального часу;
- синхронізація та архівування всіх даних;
- наявність у доступі всієї інформації про параметри режиму (значення струмів, напруги, фазових кутів, активної та реактивної потужності) та мережі (потужність навантаження);
- можливість відстежування динаміки всієї системи із запобіганням, по можливості, небажаним порушенням у системі;
- наявність на підстанціях можливості розрахунку рівнів відхилення високої напруги.



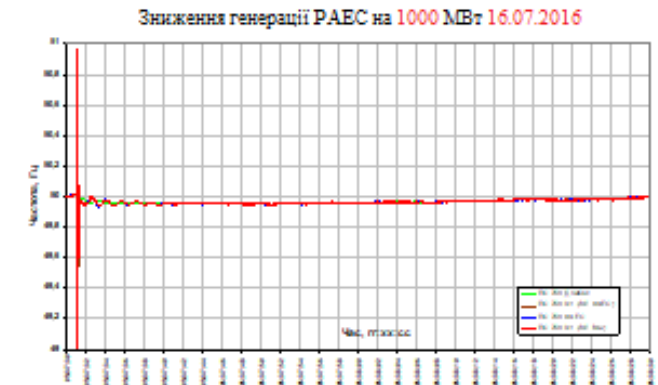
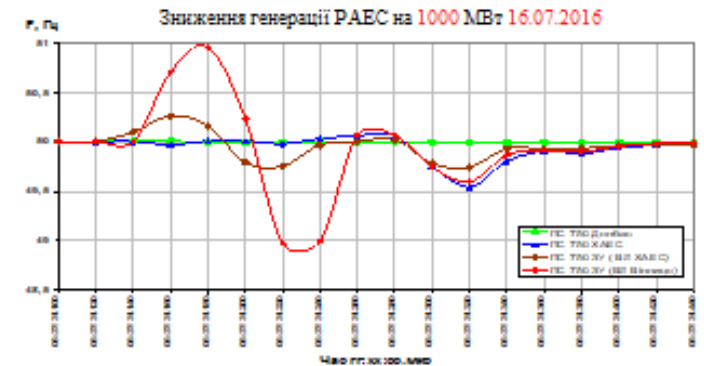
Фіксація системних параметрів на міждержавних перетоках ПЛ 750 кВ та 400 кВ при аварії в європейській енергомережі
04.11.2016



Фіксація коливань частоти в перетині ПЛ 750 кВ ПС 750 кВ ЗУ – ПС 750 кВ Альбертирша
21.01.2021



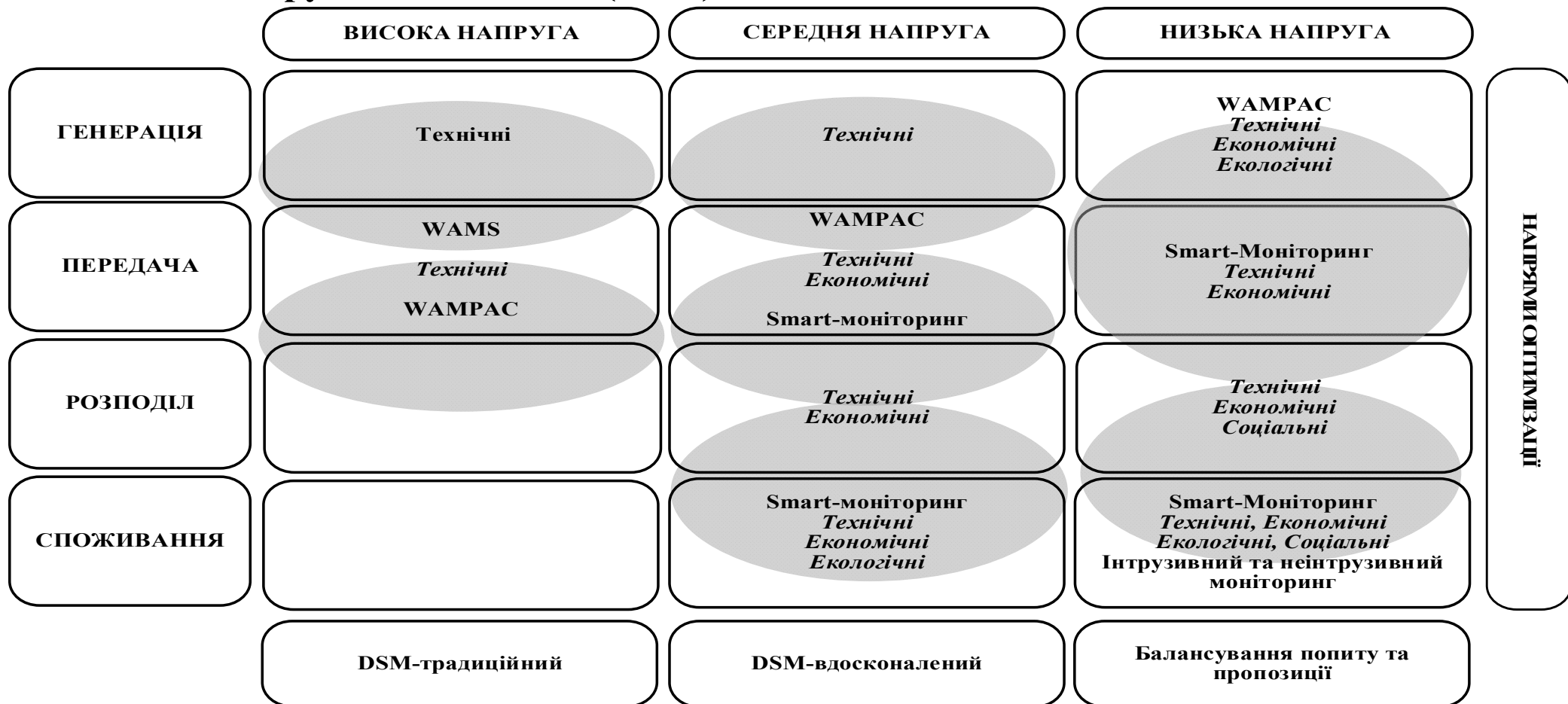
Фіксація коливань частоти в ОЕС України при аварійному відключенні блоку 1000 МВт на РАЕС 16.07.2016



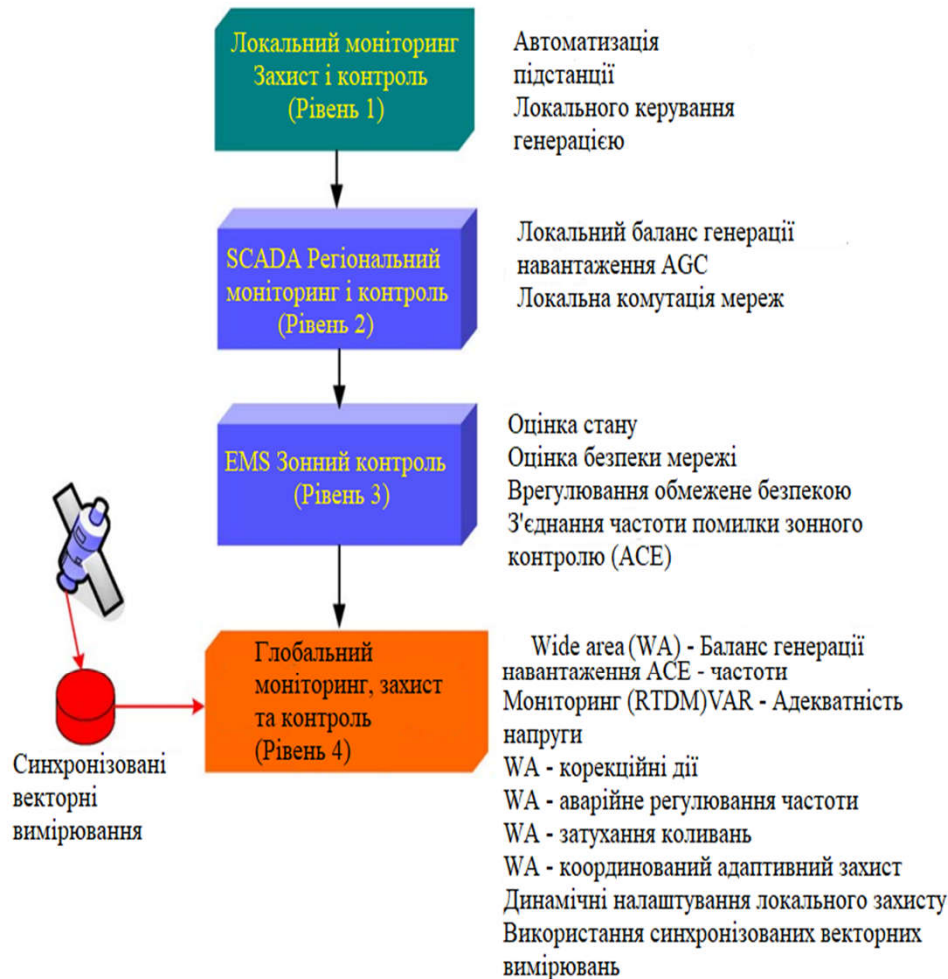
WAMS дозволяє вийти на новий рівень керування енергосистемами, забезпечуючи стабільність, прогнозованість і адаптивність навіть у критичних ситуаціях.

Розвинуто методологію Smart-моніторингу в електроенергетиці як спеціально організованого, систематичного автоматичного спостереження за технологічними процесами та бізнес-процесами з аналізом ретроспективної і поточної оцінки та прогнозуванням стану. Розроблено алгоритми Smart-моніторингу.

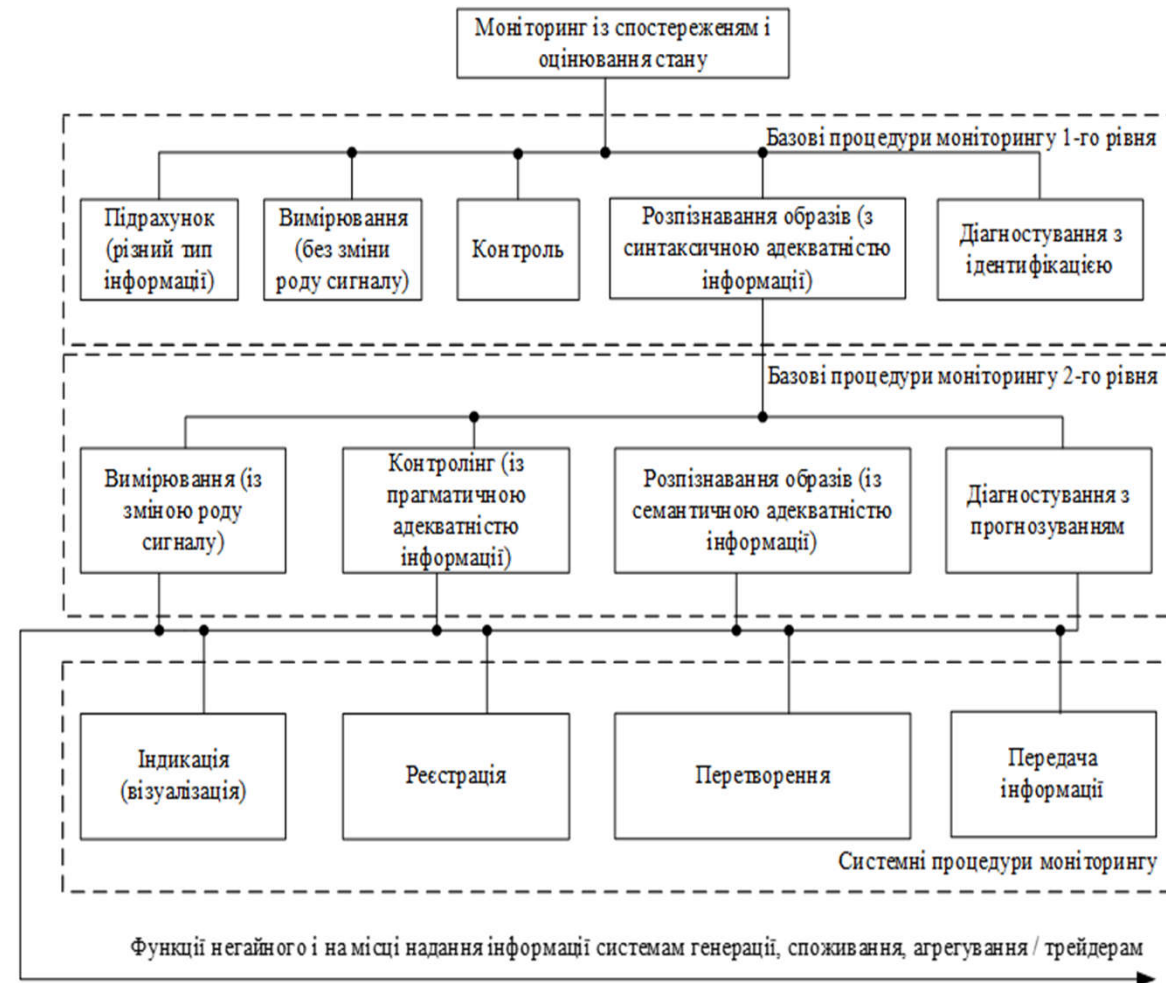
Smart-моніторинг – взаємодія технологій моніторингу та оптимізаційних задач з технологіями керування попитом (DSM).



Інтегрована система реального часу WAMPAC



Функціональна структура Smart-моніторингу

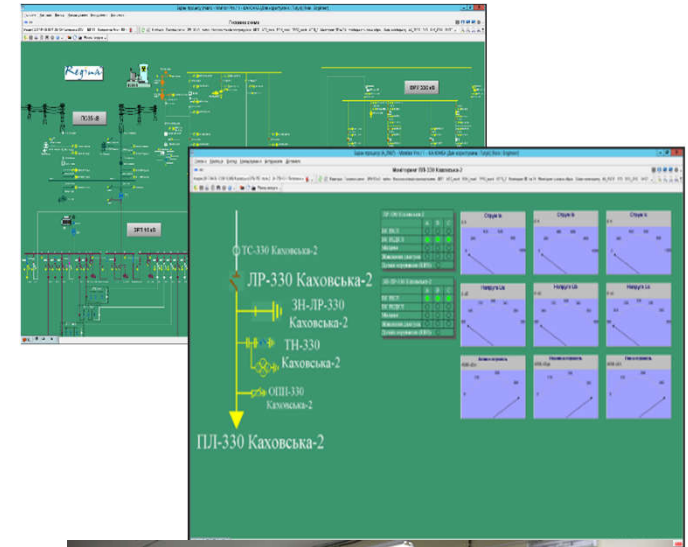


Для забезпечення процесів керованості на рівні систем передачі електроенергії теоретично обґрунтовано та реалізовано в оригінальному програмно-алгоритмічному забезпеченні АСК ТП на підстанціях 750 кВ «Київська» та 750 кВ «Каховська», цифровій системі протиаварійної автоматики (ПА) для Івано-Франківського енерговузла. Впровадження АСК ТП, цифрової системи ПА стало важливим кроком у підвищенні ефективності та технологічності роботи цих енергетичних об'єктів.

АСК ТП ПС 750 кВ «Каховська» поєднує сучасні підходи до автоматизації, інноваційні рішення, є функціонально насиченою та водночас зручною в експлуатації.

Завдяки впровадженню АСК ТП вдалося суттєво підвищити надійність роботи підстанції, забезпечити безперервний контроль за ключовими параметрами та мінімізувати ризики аварійних ситуацій. Система дозволяє оперативно реагувати на зміни в роботі обладнання та приймати обґрунтовані управлінські рішення. Запропоновані та реалізовані в роботі АСК ТП ПС 750–220 кВ є більш функціонально наповненими (у порівнянні із світовими зразками), за рахунок системного цифрового контролю технологічних параметрів (елегазове обладнання, високовольтні вимикачі, високовольтні вводи).

У запропонованих АСК ТП підстанцій 750 кВ дані передаються в НЕК «Укренерго», що може забезпечити віддалену керованість (керованість з вищого рівня). Ця опція в довоєнний час не використовувалась. Однак вона була успішно задіяна під час війни з росією – **безпосереднє успішне керування з НЕК «Укренерго» підстанціями 750 кВ «Київська» та 330 кВ «Новокиївська», стійкість електроенергетичної системи, що забезпечило живучість та безперебійність електроживлення Київського регіону, недопущення системних аварій протягом 2022–2025 років.**



У 2025 році завершено проєкт реконструкції ПА для Івано-Франківського енерговузла. Впровадження автоматики обмеження зниження напруги (АОЗН) та обмеження перевантаження обладнання (АОПО) в Івано-Франківській області стало важливим кроком у підвищенні надійності та стійкості роботи електроенергетичної системи регіону.

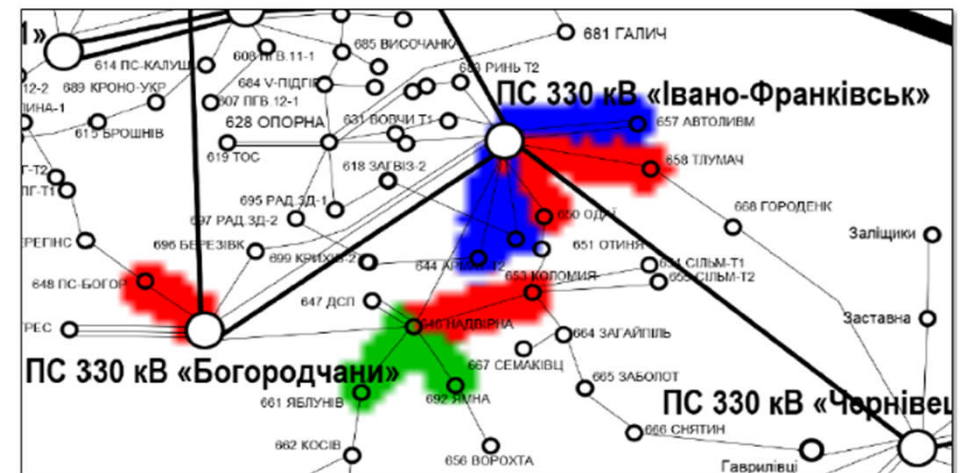
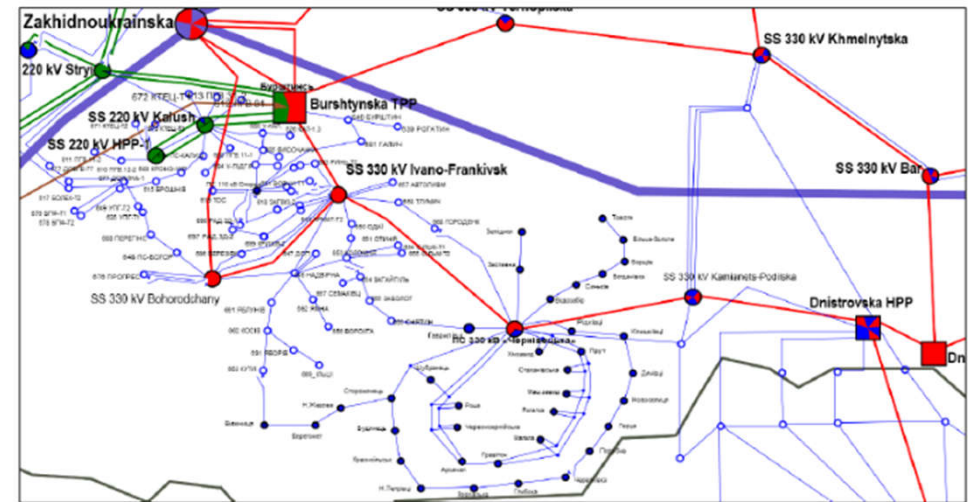
Виділено множини параметрів впливів: електромагнітних ($P_{\text{ЕЛ}}$), електромеханічних ($P_{\text{ЕМ}}$), механічних ($P_{\text{М}}$), інформаційних ($P_{\text{ІНФ}}$), метеорологічних ($P_{\text{МЕТ}}$).

Для конкретних застосувань таких ПА важливо здійснити наповнення зазначених множин $P_{\text{ЕЛ}}$, $P_{\text{ЕМ}}$, $P_{\text{М}}$, $P_{\text{ІНФ}}$, $P_{\text{МЕТ}}$ конкретними елементами, які найбільш повно (адекватно) описують структуру та процеси системи. Можливі шляхи функціонування вдосконаленої адаптивної ПА згідно наступних типів зміни станів системи з переходом у нормальний стан, де А – нормальний початковий стан; В – аварійний, аномальний чи «квазіаварійний» стан; С – новий нормальний стан:

- 1) $A \rightarrow B \rightarrow A$;
- 2) $A \rightarrow B \rightarrow C$;
- 3) $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$.

Стани В може складатися із кількох проміжних станів $B_1, B_2, \dots$, при переході через які система досягає нормального стану (початкового чи нового).

Завдяки впровадженню цифрових технологій ПА значно підвищено надійність та безперебійність електропостачання споживачів регіону. Системи АОЗН та АОПО дозволяють своєчасно виявляти та локалізувати аварійні ситуації, мінімізувати їх наслідки, а також запобігати розвитку системних порушень і масштабних відключень. ПА Івано-Франківського енерговузла розроблена з урахуванням особливостей роботи ВДЕ із сумарною встановленою потужністю 473 МВт, що забезпечує коректну роботу енергосистеми в умовах змінної генерації, підвищує її гнучкість і стійкість.



При створенні вдосконаленої адаптивної ПА Івано-Франківського енерговузла з врахуванням принципу ІІ-ДО (Інтелектуальна Інтернет Інтегрована Динамічна Оптимізація) вперше:

1. Розроблено та обґрунтовано оновлені принципи побудови комплексу ПА Івано-Франківського енерговузла, адаптовані до умов синхронної роботи ОЕС України з ENTSO-E, що враховують зміну електричних режимів, топології мережі та перерозподіл потоків потужності після об'єднання енергосистем.

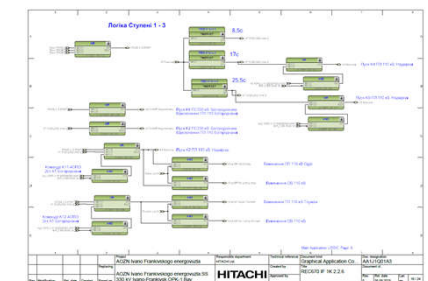
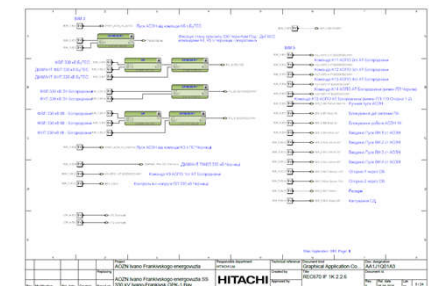
2. Запропоновано інтегровану структуру протиаварійної автоматики, яка поєднує АОЗН та АОПО з координованими багатоступеневими алгоритмами дії, що забезпечують запобігання розвитку аварійних режимів та виникненню лавини напруги шляхом дозованого обмеження навантаження.

3. Удосконалено алгоритми спрацювання АОЗН, які базуються на багаторівневому контролі напруги у вузлах 110 кВ з різними витримками часу, реалізацією міжпідстанційної взаємодії та селективною дією на навантаження з урахуванням подальшого автоматичного відновлення живлення.

4. Запропоновано алгоритмічні рішення АОПО з контролем напрямку перетоку потужності, що дозволяє забезпечити селективний захист автотрансформаторів 330/110 кВ від тривалих перевантажень у післяаварійних режимах без надмірного відключення споживачів.

5. Вперше в Україні для даного енерговузла виконано синтез алгоритмів ПА на основі сценарного аналізу режимів N-0, N-1 та N-2, з урахуванням реального впливу ВДЕ, перспективного зростання споживання та температурних умов експлуатації елементів мережі.

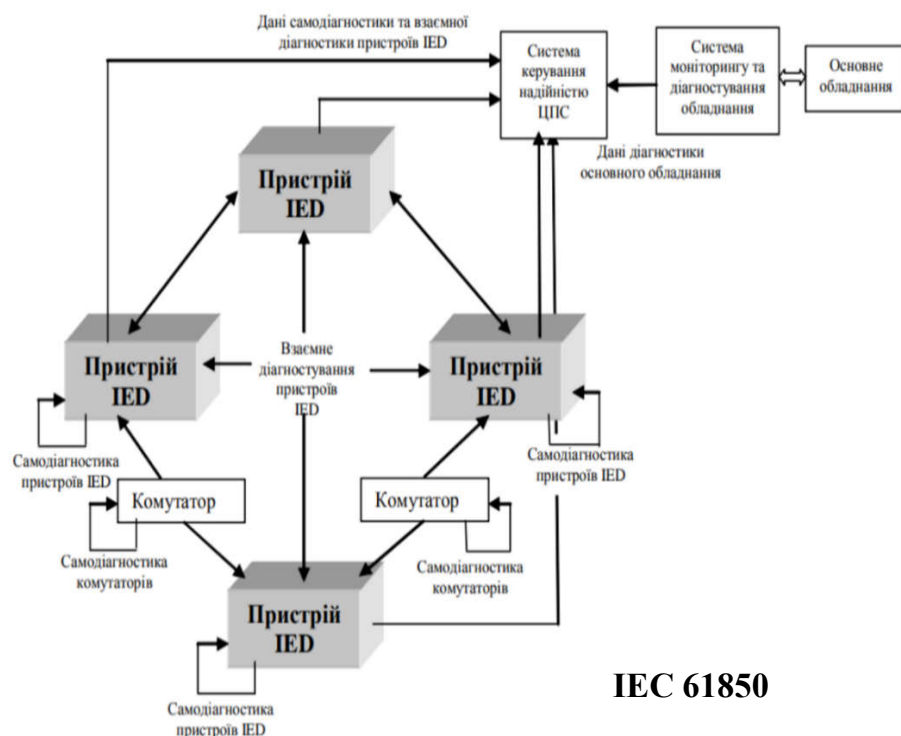
6. Запропоновано ієрархічну мікропроцесорну архітектуру комплексу ПА з розподіленими периферійними пристроями та централізованою логікою керування, що забезпечує автоматичну обробку аварійної інформації в реальному часі без участі оперативного персоналу та підвищує швидкодію і надійність протиаварійного керування.



Вперше в Україні забезпечено науковий супровід створення цифрових підстанцій.

Цифровізація, стандартизація та впровадження сучасних інформаційних технологій та на електроенергетичних об'єктах призвели до утворення інформатизованої та інтелектуалізованої енергетики з єдиним загально енергетичним середовищем та інформаційною інфраструктурою, створили передумови для створення автоматизованої системи керування технологічними процесами (АСК ТП), тобто цифрової підстанції.

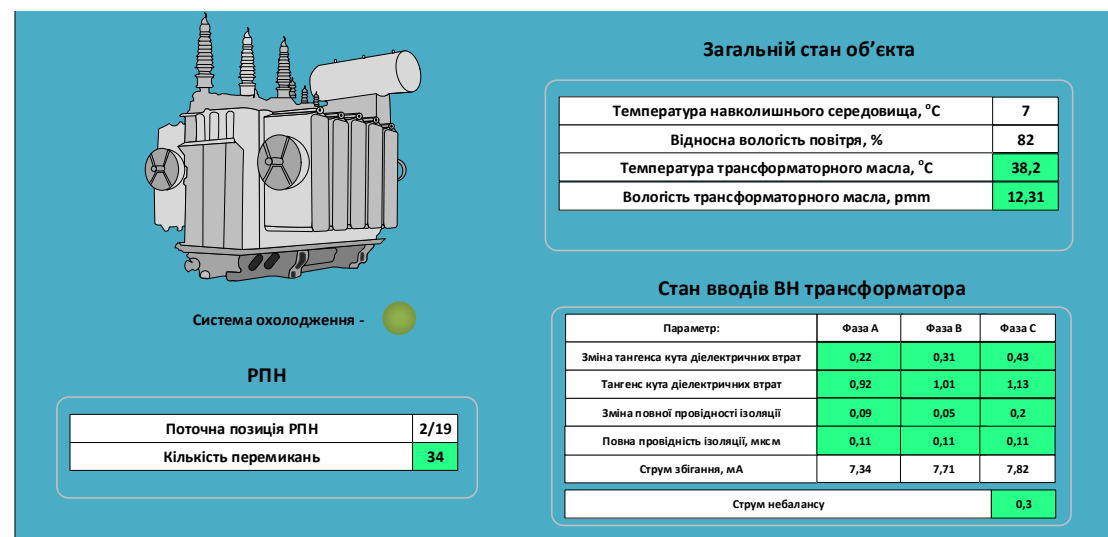
Впровадження Smart-технологій в обладнанні ЦПС



IEC 61850

Процедури інтелектуального моніторингу реалізовані у створеній системі моніторингу елегазових вимикачів в процесі їх функціонування (розроблена на замовлення компанії ABB). В ОЕС України встановлено 144 таких систем моніторингу.

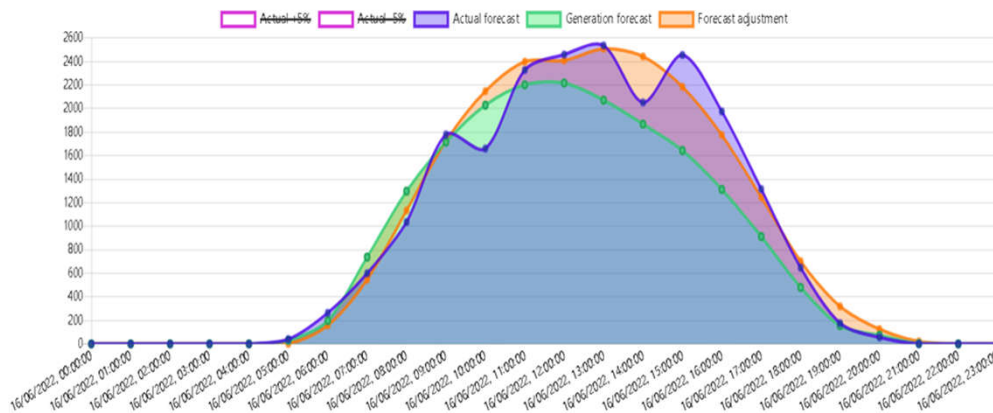
Візуалізація інформації для користувача системи ЦПС для Smart-моніторингу силового трансформатора (на основі PMU «Регіна-Ч»), яка забезпечує оперативний контроль стану та режимів роботи трансформатора. Система здійснює реєстрацію та аналіз перехідних аварійних та неаварійних процесів, а також моніторинг електричних, теплових та механічних параметрів основних вузлів конструкції трансформатора. Під час моніторингу система на основі PMU «Регіна-Ч» формує діагностичні, попереджувальні та аварійні повідомлення щодо роботи трансформатора, а також формує бази даних.



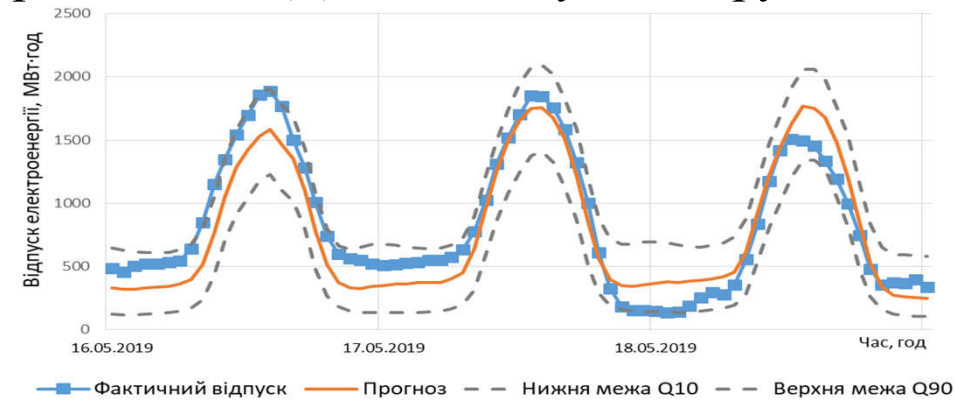
Розвинуто методи та засоби оптимізації сумісної роботи ЛЕС з ВДЕ та систем централізованого електропостачання, теорію чутливості для оцінювання генерування СЕС з врахуванням їхньої деградації, теорії подібності та принципу найменшої дії задля аналізу способів резервування нерівномірності графіків генерування ВДЕ.

$$P_{AEC}(t) + P_{TEC}(t) + P_{TEC}(t) \pm P_{GAEC}(t) + P_{ВДЕ}(t) \pm P_{рез}(t) - P_n(t) - \Delta P(t) = 0$$

Автоматизовано процес прогнозування СЕС в складі балансуючої групи



Розвинуто моделі прогнозування відпуску електроенергії з ВДЕ з використанням засобів штучного інтелекту на основі ретроспективної інформації, які забезпечили точність та якість прогнозування, зокрема, за умов участі виробників з ВДЕ в балансуючих групах.



Зниження похибки короткострокових прогнозів відпуску електроенергії з ВДЕ

Модель	RMSE		MAX	
	% від P_{ins}	МВт·год	% від P_{ins}	МВт·год
LinReg	4,56	158	15,22	527
ε -SVR	4,58	159	15,51	536
MLP	4,59	160	15,35	539
SARIMA	4,87	169	16,2	559
GEN	4,78	166	21,18	732
eResNet*	4,46	155	12,81	466

Запропонована методологія оцінки вартості похибки прогнозу обсягів генерації з ВДЕ дозволила розробити методи зниження витрат виробників, пов'язаних з похибкою прогнозу в умовах оптового ринку електричної енергії України.

$$Cost_{error} = Cost_{pred} + Cost_{imb} - Cost_{fact}$$

$Cost_{error}$ – вартість похибки прогнозу;

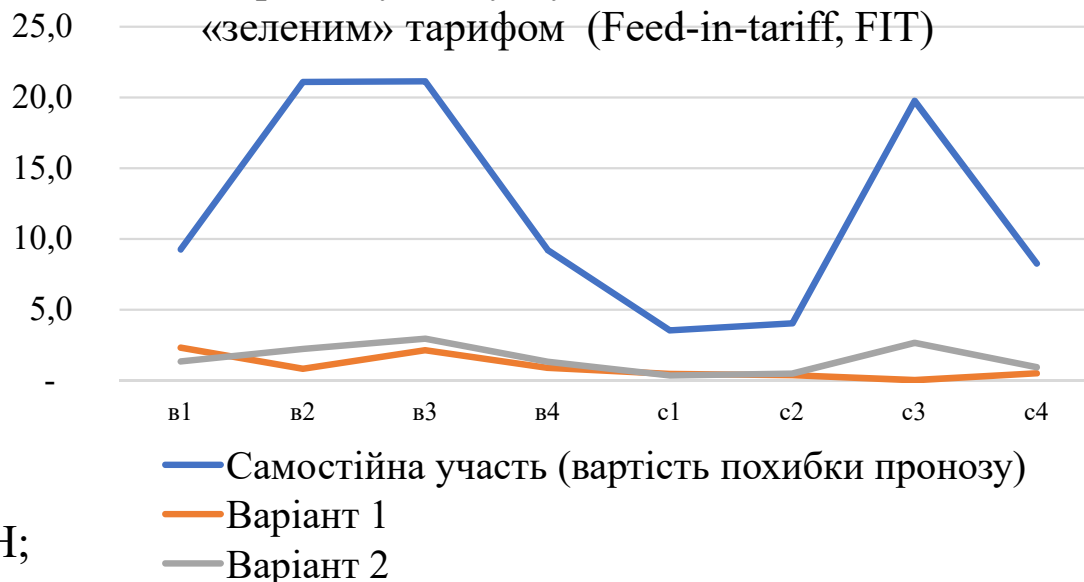
$Cost_{pred}$ – вартість прогнозного графіку на РДН;

$Cost_{fact}$ – вартість фактичного графіку на РДН;

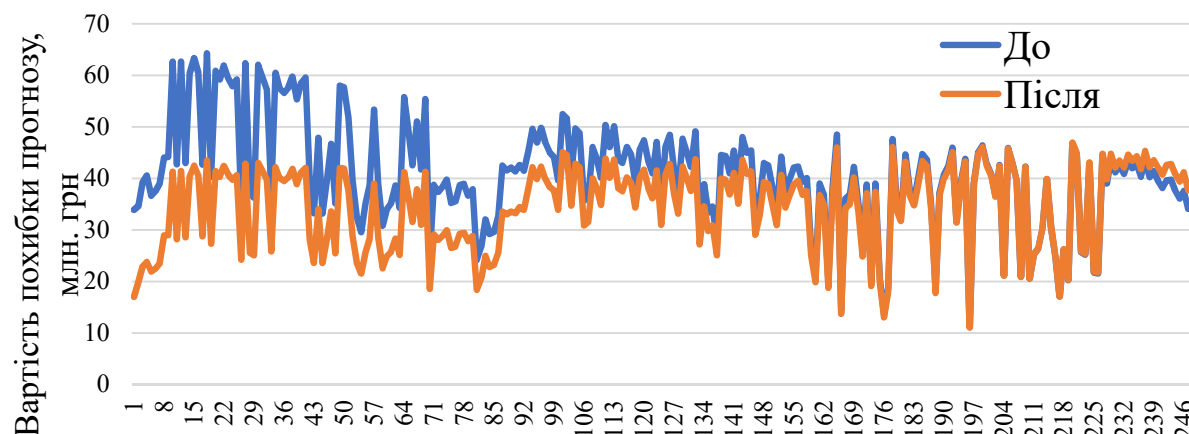
$Cost_{imb}$ – вартість небалансів (може приймати від'ємні значення).

Розроблено алгоритмічно-програмні засоби до зниження вартості небалансів виробників з ВДЕ на основі створення оптимальних балансуючих груп та коригування прогнозів їх учасників.

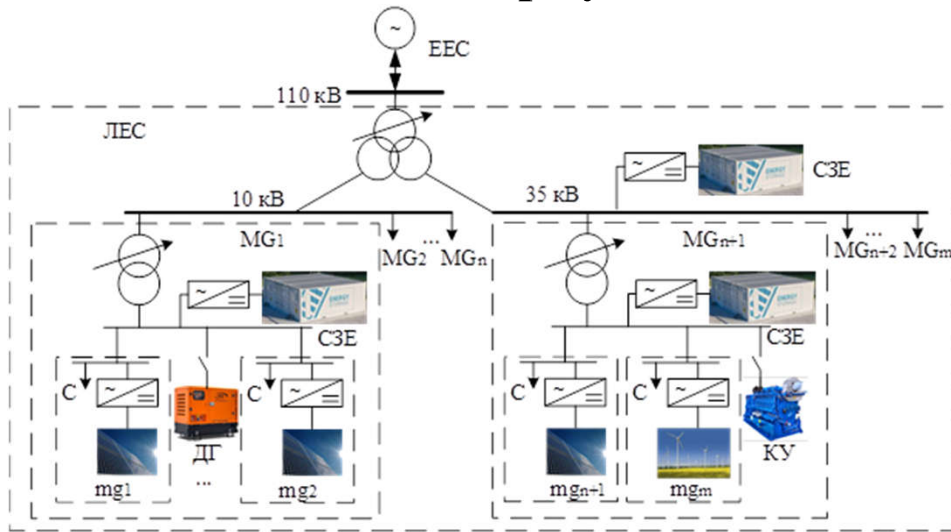
Відношення витрат, пов'язаних з похибкою прогнозу відпуску до надходжень за «зеленим» тарифом (Feed-in-tariff, FIT)



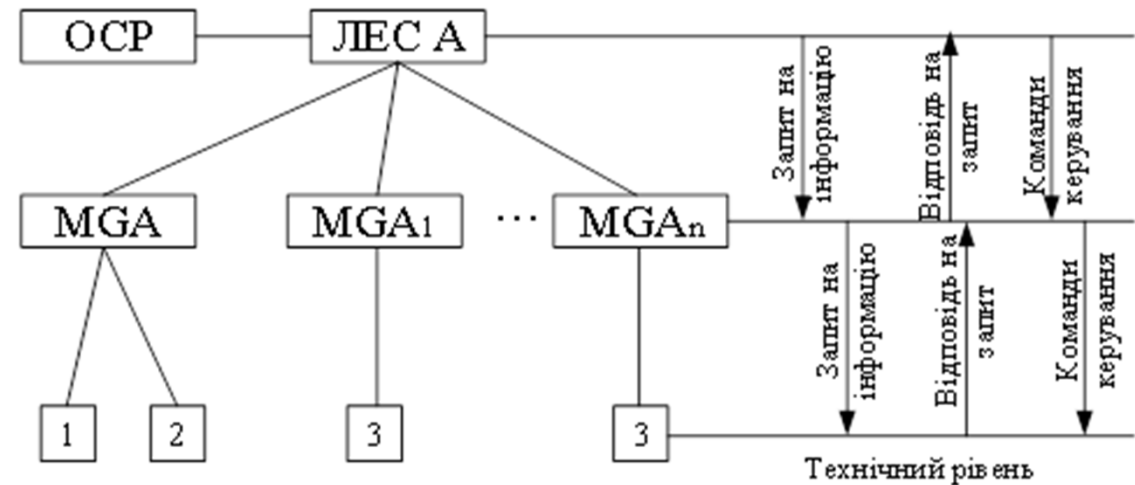
Вартість похибки прогнозу до та після оптимізації



Формування локальних електроенергетичних систем



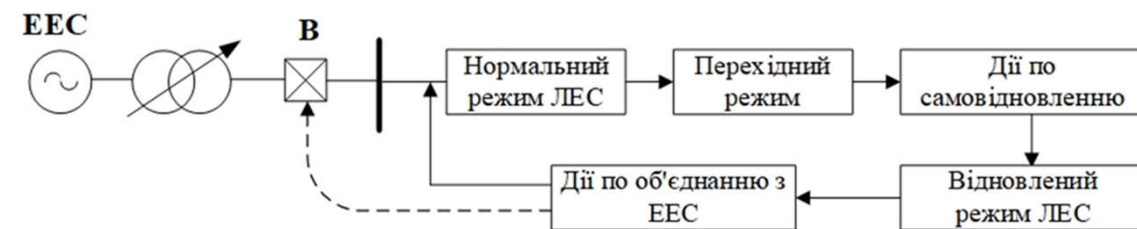
Локальна електроенергетична система з Microgrid



Ієрархічна структура інтелектуальної системи ЛЕС.
Реалізована для підприємств різної потужності



ЛЕС 10 кВ 2000 кВт, сформована з Microgrid



Самовідновлення електропостачання в ЛЕС
при втраті зв'язку з ЕЕС Smart Grid технологіями

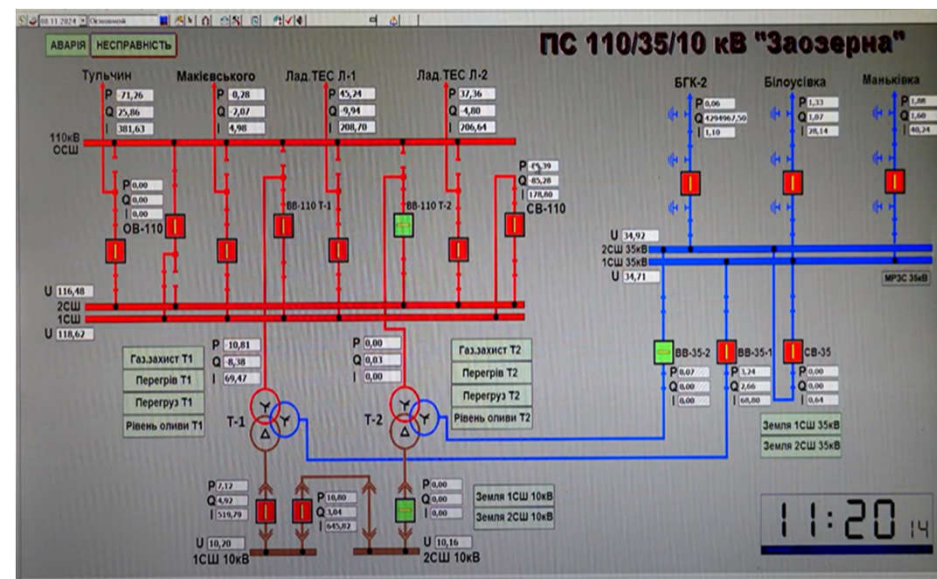
Баланс потужності у відновленому режимі ЛЕС має вигляд:

$$P_{ВДЕ}(t) + P_{C3E}(t) + P_f(t) - P'_{cn}(t) - P_{cnf}(t) - P_{ac}(t) - \Delta P(t) \approx 0$$

Розроблені моделі та методи балансування використано під час створення ЛЕС

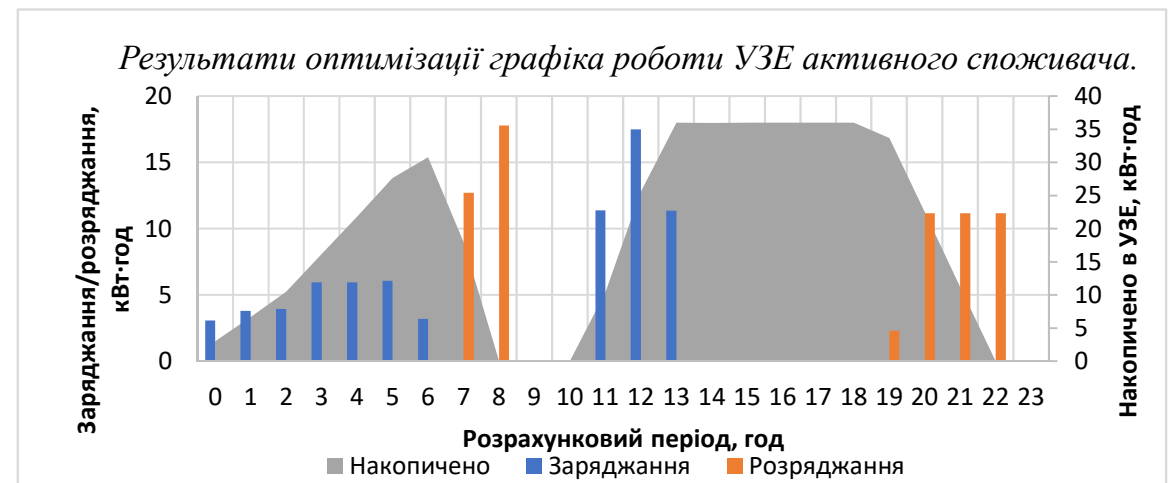
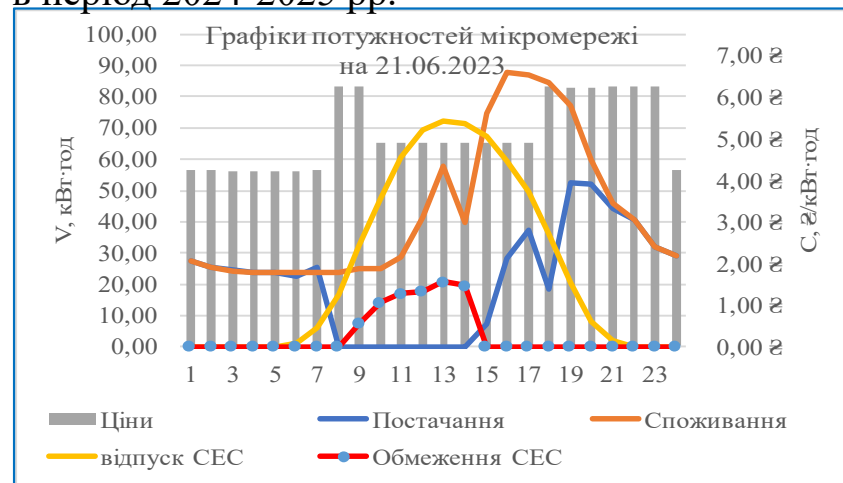
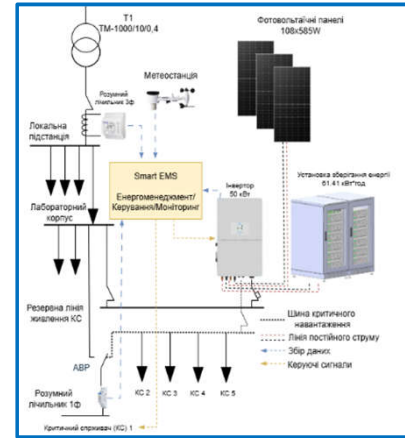
Одним із прикладів успішної реалізації проведених досліджень є розроблення автоматизованої системи контролю і керування по балансуванню виробництва, споживання та накопичення електричної енергії в ЛЕС 35/10кВ ТОВ «Вінницька птахофабрика», без видачі потужності в мережу 110 кВ АТ «Вінницяобленерго». Характеристики локальної мережі: (1) потужність власної генерації (59,4 МВт) в структурі: когенераційні установки 1 черги – 12 МВт; когенераційні установки 2 черги – 13,2 МВт; СЕС 1–4 – 9,6 МВт; СЕС 5 – 19,6 МВт; дизель-генераторна установка (ККЗ) – 5 МВт; (2) споживання: в максимальному режимі 850 тис. кВт/на добу; в мінімальному режимі 580 тис. кВт/на добу; (3) – установки зберігання енергії (УЗЕ): 2 МВт / 4 МВт·год.

На сьогодні здійснюється взаємодія ЛЕС МХП-Вінницька птахофабрика та оператора системи розподілу електроенергії з метою оптимізації споживання/генерування електроенергії та перетоків потужності в ЛЕП. Впровадження Smart Grid технологій в ЛЕС з СЕС, газопоршневими когенераційними установками, УЗЕ та формування окремих multi Microgrid, пов'язаних інтелектуальною системою керування, дозволяє зменшити SAIFI і SAIDI за рахунок самовідновлення практично до нуля.



Досліджено механізми впливу на добовий графік електроспоживання як основу керування попитом. Розроблені моделі активного споживача у довоєнний період набули використання у воєнний період та стали основою подальшого розвитку ринкових відносин в сфері електроенергетики.

Розроблено моделі оптимізації функціонування мікромереж за критерієм мінімізації вартості закупівлі електроенергії на роздрібному ринку та сформовано вимоги до побудови систем енергетичного менеджменту мікромереж, розроблено систему моніторингу параметрів мікромереж, які практично реалізовані в межах пілотного проєкту на базі Інституту електродинаміки НАН України, який виконано в межах програми Innovate Ukraine, що фінансується урядом Великої Британії, «Інноваційна Україна – підтримка енергетичного відновлення України» в період 2024-2025 рр.



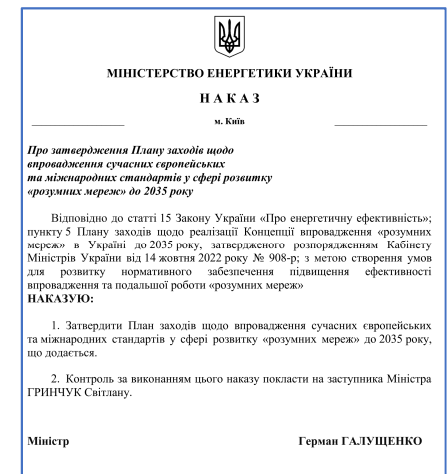
Створення нормативно-методичного забезпечення:

Основа плану заходів з впровадження міжнародних та європейських стандартів для розвитку ОЕС України згідно концепції Smart Grid спрямовано на нормативно-технічне забезпечення сталого розвитку української енергетики в напрямку підвищення ефективності роботи системи електропостачання, покращенню умов інтеграції розподіленої генерації, інтеграцію ринку електричної енергії з ринками країн ЄС та ОЕС України до ENTSO-E.

Основними напрямками реалізації плану заходів з впровадження міжнародних та європейських стандартів, що виконані в роботі є:

- впровадження базових (core standards) та пріоритетних нормативних документів, що формують групи стандартів, які є необхідними для функціонування більшості компонентів архітектури Smart Grid;
- впровадження стандартів для забезпечення функціонування систем Smart Grid, які є найбільш актуальними для розвитку електроенергетичної системи України;
- впровадження серії стандартів з комплексного формування загальних вимог до «розумних мереж» та мікромереж.

В межах технічного комітету стандартизації ТК 162 за участі авторів забезпечено прийняття понад 200 міжнародних та європейських стандартів в сфері керування електроенергетичними системами, що склало близько 80% базових та пріоритетних стандартів в сфері Smart Grid та забезпечило створення необхідного нормативний бази цифрової трансформації в в сфері електроенергетики України.



Авторами з 2010 р. закладено наукові основи цифрової трансформації в межах концепції Smart Grid в Україні.

Розроблена основа Концепції впровадження «розумних мереж» в Україні до 2035 року визначає термінологію поняття «розумних мереж», основні напрямки впровадження і використання технологій «розумних мереж» в енергетичному секторі України, пріоритети і ключові механізми реалізації, передбачуваних етапів впровадження технологій і ключових учасників впровадження.

Основні заходи Концепції, розвинуті в роботі:

- продовження впровадження системи безперервного вимірювання та реєстрації параметрів роботи енергосистеми (WAMS);
- цифровізація підстанцій 35–750 кВ;
- впровадження «розумного обліку» та керування попитом (Demand Response);
- застосування установок зберігання енергії;
- впровадження системи управління розподіленою генерацією (DERMS);
- реалізація пілотних проєктів з впровадження мікромереж (Microgrid).
- аналіз та розроблення нормативно-правової бази;
- підтримка впровадження сучасних європейських та міжнародних стандартів.

За розрахунками авторів очікувана ефективність впроваджуваних технологій «розумних мереж» на основі загальноприйнятої методики «витрат і вигод», зокрема за рахунок зниження витрат електричної енергії, покращення надійності електропостачання (SAIDI), зниження витрат на експлуатаційне обслуговування електромереж складає **60-80 млрд. грн. до 2030 року.**



1. Розроблена цілісна науково-технологічну платформа цифрової трансформації електроенергетики України, яка стала основою роботи ОЕС України в ізолюваному режимі, її успішної синхронізації з ENTSO-E і роботи в європейському енергопросторі в 2022–2025 роках, забезпечуючи виконання вимог спостережуваності та стійкої роботи європейської енергосистеми та інтеграцію ринків електроенергії.

2. Спільно з МПП «АНІГЕР» налагоджено серійне виробництво РМУ «Регіна-Ч», який здійснює вимірювання кута напруги та частоти у вузлах ОЕС України з синхронізацією по часу з точністю, яка відповідає кращім світовим зразкам, а по частоті – перевищує досягнутий у світі рівень.

Розроблення концепції побудови системи цифрового моніторингу WAMS та створення її першої черги постали інформаційно-метрологічною основою функціонування ОЕС України в автономному режимі з початком повномасштабного вторгнення росії (24 лютого 2022 р.) та її приєднання до ENTSO-E (з 17 березня 2022 р.). Завдяки створеній за участі авторів роботи системі WAMS енергетика України вже в ЄС.

3. Впровадження АСК ТП ПС 750-220 кВ є важливим кроком у напрямку цифровізації енергосистеми України, підвищення її керованості, прозорості та стійкості до сучасних викликів; результатом впровадження стало забезпечення стабільної роботи підстанції 750 кВ «Каховська» в умовах високих навантажень у 2010–2022 рр.

У запропонованих АСК ТП ПС 750–220 кВ дані передаються в НЕК «Укренерго» (можливість забезпечити віддалену керованість). Ця опція була успішно задіяна під час війни з росією – безпосереднє успішне керування з НЕК «Укренерго» підстанціями 330 кВ «Новокиївська» та 750 кВ «Київська», що забезпечило живучість та безперебійність електроживлення Київського регіону, недопущення системним аваріям в енергетиці (блекауту) протягом 2022–2025 років.

4. Запропоновано вдосконалену цифрову адаптивну ПА забезпечення стійкості електроенергетичних систем, яка контролює запас стійкості поточного режиму і визначає керівні дії щодо рівнів активної потужності та напруги. Введено в експлуатацію побудованої (згідно використання принципу Ш-ДО) вперше в Україні ПА Івано-Франківського енерговузла з врахування впливу ВДЕ сумарною встановленою потужністю 473 МВт.

5. Розроблені моделі та засоби прогнозування обсягів відпуску електричної енергії виробниками з ВДЕ та її впливу на ринкову вартість електричної енергії в Україні, які дозволили сформулювати рекомендації для прийняття управлінських рішень під час внесення змін до правил купівлі електричної енергії ДП «Гарантований покупець» щодо розрахунку обсягів та вартості небалансів.

6. Із врахування зміни структури генерації та споживання електроенергії, пріоритетності створення ЛЕС завдяки цифровізації забезпечено інтегрування ВДЕ в ОЕС України на основі створення балансуючих груп з ВДЕ з врахуванням попиту з боку споживачів, ринкових умов та нової ролі ВДЕ як повноправного елемента формування балансу генеруючих потужностей в ОЕС України, що на рівні ОЕС України призвело до стимулювання зниження небалансів виробників з ВДЕ.

7. Розроблені моделі розрахунку вартості електричної енергії для споживачів та оцінювання доцільності зміни їх форми участі на роздрібному ринку електричної енергії дозволяють підвищити економічну ефективність роботи споживачів в нових ринкових умовах.

8. Підготовлено стратегію та розроблено план заходів з впровадження міжнародних та європейських стандартів для розвитку електроенергетичної системи згідно концепції Smart Grid, де реалізовано пропозиції ENTSO-E щодо гармонізації українських стандартів з операційними правилами європейських операторів.

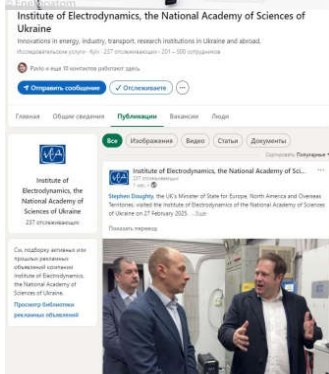
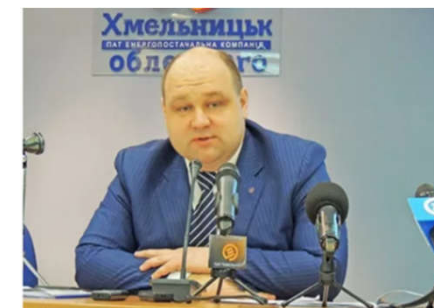
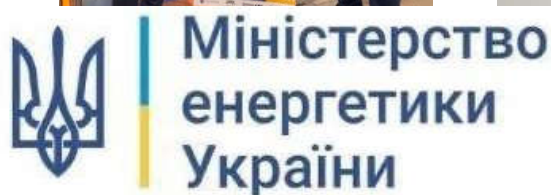
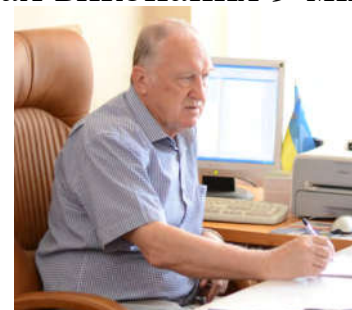
9. Розроблено науково-технічне обґрунтування та Концепції впровадження «розумних мереж» в Україні до 2035 року та середньостроковий План заходів з впровадження «розумних мереж» в Україні (введена в дію постановою КМУ № 908 від 14.10.2022 р.), як основи практичної реалізації процесів цифрової трансформації електроенергетики України.

Обговорення та представлення результатів роботи



Науково-практичні результати роботи широко представлені та обговорені на всеукраїнських та міжнародних форумах, конференціях, семінарах, виставках, спеціалізованих платформах фахівців енергетики, робочих групах Міністерства енергетики, соціальних мережах та ЗМІ.

Лише за період 2010-2025 років відбулося понад 300 інформаційних заходів як на рівні нашої держави, так і міжнародних організацій, у тому числі в рамках виконання 9 міжнародних проєктів.



УКРЕНЕРГО
Національна енергетична компанія

IEEE
UKRAINE SECTION



Розвинуто наукову базу освітньо-методологічного забезпечення цифрової трансформації, розвитку ринкових відносин в електроенергетиці України та впровадження сучасних Smart Grid технологій.

Розроблено та введено в навчальному процесі для спеціальностей G3 – Електрична інженерія (141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка); G4 – Енерговиробництво (144 Теплоенергетика / 141 Електроенергетика) нові дисципліни:

- **бакалаври** – Інтелектуальні електричні мережі;
- **магістри** – Сучасні проблеми електроенергетичних систем, Системи ринків електричної енергії, Оптовий та роздрібний ринок електричної енергії, Цифрова трансформація електроенергетичних систем та комплексів, Енергоефективні Smart Grid технології, Перспективні Smart енергосистеми, Інтелектуальні системи в енергетиці;
- **аспіранти** – Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії в електроенергетичних системах та електротехнічних комплексах, Методи та засоби забезпечення балансової та операційної надійності електроенергетичних систем.

Захищено 7 докторських та 19 кандидатських дисертацій (під керівництвом та безпосередньо авторами)

Наукові результати роботи відображено в 52 монографіях/розділах монографій (з яких 19 – у зарубіжних виданнях) та 259 наукових публікаціях, серед яких 107 включені до наукометричних баз Scopus та WoS (з яких 65 – у англomовних виданнях).

Загальна кількість цитувань публікацій авторів складає відповідно:

Web of Science 68/5, Scopus 799/14, Google Scholar 2228/25;

26 авторських свідоцтв, 6 патентів на корисну модель.



Узагальнені дані від впровадження систем WAMS та PMU в Україні (2010–2025 рр.) – 14,5 млрд. грн., у тому числі від впровадження систем WAMS та PMU (2010–2021 рр.) – 4,5 млрд. грн.; при усуненні системних аварій (2022–2025 рр.) – 8,5 млрд. грн., від синхронізації ОЕС України з ENTSO-E (2022–2025 рр.) – 1,5 млрд. грн.

Економічна ефективність за рахунок оптимального функціонування ЛЕС МХП-Вінницька птахофабрика, м. Ладижин (ефект через зменшення збитків і погіршення якості продукції завдяки зменшенню SAIFI і SAIDI) за 2024–2025 рр. – 900 млн. грн.

Економічний ефект від впровадження розроблених моделей прогнозування та децентралізованого механізму стимулювання розвитку ВДЕ за 2022–2025 рр. сягає понад 800 млн. грн.

Досягнутий економічний ефект складає понад 16,2 млрд. грн.

Функціонування ОЕС України в європейському енергопросторі забезпечить значне зростання експортно-імпортних потужностей, підвищення стійкості системи, розвиток «зеленої» енергетики та впровадження європейських ринкових механізмів, що суттєво зміцнить енергетичну безпеку.

Впровадження сучасних систем WAMS / PMU, АСК ТП та комплексів ПА при створенні інтегрованих систем є стратегічним пріоритетом для підвищення надійності та керованості ОЕС України в умовах її інтеграції з ENTSO-E. Поетапне масштабування згідно вимог ENTSO-E та централізоване керування інфраструктурою даних забезпечить економічно ефективне та технічно обґрунтоване розгортання зазначених систем в масштабах усієї ОЕС України. Сумарний річний ефект (прямий та опосередкований) при їх впровадженні перевищує **10–12 млрд грн.**

За результатами масштабування ЛЕС МХП-Вінницька птахофабрика для 10 аналогічних об'єктів у наступні 5 років щорічний економічний ефект може перевищити **5,0 млрд. грн.** та ще зрости при уточненні показників декарбонізації від застосування ВДЕ. При цьому економічний ефект від впровадження розроблених моделей прогнозування та децентралізованого механізму стимулювання розвитку ВДЕ може скласти понад **1,0 млрд. грн.**

Науково-практичні результати роботи впроваджено в НЕК «Укренерго», АТ «Хмельницькобленерго», Міністерстві енергетики України, НКРЕКП, ДП «Гарантований покупець», Національному електротехнічному комітеті Міжнародної електротехнічної комісії, МПП «Анігер», в компаніях операторів систем розподілу та постачальниках електричної енергії в Україні.



1. Застосування в ОЕС України розроблених авторами пристрою синхронізованих векторних вимірювань РМУ «Регіна-Ч» та першої черги системи широкомасштабного моніторингу WAMS забезпечило успішну інтеграцію ОЕС України в європейський енергoprостір (ENTSO-E), оцінку спостережуваності та керованості вітчизняної енергосистеми, підвищення її стійкості, живучості та відновлюваності, зокрема, зменшення тривалості системних аварій у 2022–2025 роках.

2. На основі розвитку теоретичних основ керованості електричних мереж високої напруги вперше в Україні створено АСК ТП для ПС 750 кВ «Київська» та «Каховська», які на основі предиктивного керування, розширення функціональних можливостей та прогнозування стану дають змогу забезпечувати інфраструктурну стійкість системи відповідно до стандартів ЄС.

3. Вперше в Україні запропоновано та реалізовано в Івано-Франківському енерговузлі вдосконалену цифрову адаптивну протиаварійну автоматику забезпечення стійкості електроенергетичних систем в умовах змінної генерації, яка контролює запас стійкості поточного режиму і визначає керівні дії, дозволяє своєчасно виявляти та локалізувати аварійні ситуації, та запобігати розвитку системних порушень і масштабних відключень.

4. Розроблена методологія побудови та реалізована на рівні систем розподілу електроенергії створення балансуючих груп з ВДЕ з врахуванням рівнів їх гнучкості та попиту з боку споживачів, ринкових умов та нової ролі ВДЕ як повноправного елемента формування балансу генеруючих потужностей в ОЕС України. Розроблені моделі та засоби прогнозування, методи оцінки похибки прогнозу обсягів відпуску електричної енергії виробниками з ВДЕ та її впливу на ринкову вартість електричної енергії в Україні, розрахунок обсягів та вартості небалансів, які створюються виробниками з ВДЕ в Україні.

5. Вперше розроблено рольові моделі та виконано формалізацію бізнес-інформаційних процесів організації взаємодії між учасниками ринку електричної енергії України в частині впровадження сучасного ринку електричної енергії України, гармонізованої з вимогами ENTSO-E. Для підвищення економічної ефективності роботи споживачів у нових ринкових умовах розроблено моделі розрахунку вартості електричної енергії для споживачів та оцінювання доцільності зміни їх форми участі на роздрібному ринку електричної енергії на основі даних обліку електричної енергії.

6. Для успішної реалізації державної технічної політики сформована оригінальна методологія формування стратегії та визначення пріоритетності розробки і впровадження в Україні системи національних стандартів у сфері цифрової трансформації електроенергетики, синхронізованих із міжнародними стандартами. За результатами формування наукових основ підвищення рівня інтелектуалізації електроенергетики України розроблена Концепція впровадження «розумних мереж» в Україні до 2035 року та середньостроковий План заходів з впровадження «розумних мереж» в Україні (введена в дію постановою КМУ № 908 від 14.10.2022 р.).