

СОПЕЛЬ МИХАЙЛО ФЕДОРОВИЧ ✉ – доктор технічних наук, провідний науковий співробітник відділу автоматизації електричних систем, Інститут електродинаміки Національної академії наук України; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3438-5848>; e-mail: regina@regina.org.ua.

ДЕНИСЮК СЕРГІЙ ПЕТРОВИЧ – доктор технічних наук, професор, завідувач відділу автоматизації електричних систем, Інститут електродинаміки Національної академії наук України; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6299-3680>; e-mail: spdens@ukr.net.

СПОДИНСЬКИЙ ОЛЕКСАНДР ВОЛОДИМИРОВИЧ – провідний інженер відділу автоматизації електричних систем, Інститут електродинаміки Національної академії наук України; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3947-2534>; e-mail: a.spodynskiy@gmail.com.

МИХАЙЛЕВСЬКИЙ ОЛЕГ СТАНІСЛАВОВИЧ – провідний інженер відділу автоматизації електричних систем, Інститут електродинаміки Національної академії наук України; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9264-460X>; e-mail: mykhailev@gmail.com.

ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ ТА РЕАЛІЗАЦІЇ ВДОСКОНАЛЕНОЇ АДАПТИВНОЇ ПРОТИАВАРІЙНОЇ АВТОМАТИКИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

Показано, що в Україні існує очевидна потреба в розробці та застосуванні принципово нових пристроїв для аварійного керування режимами енергосистеми, зокрема, з використанням закордонного досвіду у сфері цифрової трансформації електроенергетичних систем на основі адаптивних алгоритмів. На основі аналізу еволюції побудови та застосування протиаварійної автоматики розглянуто особливості розробки сучасних засобів вдосконаленої адаптивної протиаварійної автоматики електроенергетичних систем, направленої на підвищення енергетичної стійкості енергетики у воєнний час та повоєнного відновлення економіки України. Запропоновано принципи побудови вдосконаленої адаптивної протиаварійної автоматики забезпечення стійкості електроенергетичних систем, яка контролює запас стійкості поточного режиму і визначає керівні дії, необхідні для задоволення нормативних вимог як щодо активної потужності у перетинах, так і щодо напруги у центрах споживання. Визначено, що важливе значення для розв'язання задач оцінювання та діагностування режимів електроенергетичних систем та Об'єднаної енергетичної системи України в цілому мають синхронізовані виміри фазних кутів напруги, практичне одержання та використання яких стало можливим із впровадженням апаратно-програмного комплексу «Регіна». Представлені результати побудови вперше в Україні вдосконаленої адаптивної протиаварійної автоматики Івано-Франківського енерговузла. Під час побудови протиаварійної автоматики та розрахунках режимів роботи системи враховувався вплив відновлювальних джерел енергії зі встановленою потужністю 1253 МВт. В модифікованому апаратно-програмному комплексі «Регіна» реалізовано інтелектуальні електронні датчики (виносні модулі) розподіленої інтелектуальної системи введення аналогових сигналів, завадостійкі модулі введення дискретних сигналів, покращені алгоритми обробки даних, у тому числі візуалізації даних.

Ключові слова: електроенергетична система; протиаварійна автоматика; системи моніторингу перехідних процесів; автоматика обмеження зниження напруги; автоматика обмеження перевантаження обладнання; обмеження навантаження.

Вступ. Парадигма розвитку електроенергетики у XXI ст. передбачає реалізацію концепції Smart Grid для забезпечення вимог сталого розвитку [1]. Зростання обсягів використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), лібералізовані енергетичні ринки та, найголовніше, інтеграція різних інфраструктур моніторингу, вимірювання і зв'язку в енергосистеми надають можливість побудувати стійку та ефективну електромережу. Вдосконалена автоматика є складовою побудови Smart Grid, зокрема, вирішення задач балансування попиту та пропозицій, використання гнучкості, залучення активної поведінки споживачів. Сучасні електроенергетичні системи висувають особливі вимоги до швидкості та точності керування перехідними та стаціонарними процесами [1]. Впровадження ВДЕ суттєво впливає на величину інерції та невизначеності перехідних електромагнітних та електромеханічних процесів, що відбуваються в енергетичних системах. Ці зміни призвели до необхідності уточнення існуючих принципів побудови та формування алгоритмів функціонування пристроїв для захисту енергосистем від втрати малосигнальної та перехідної стійкості [2].

В Україні розвиток енергетики на початку XXI ст. враховує сучасні світові тенденції [1, 2]. Однак розв'язання війни росією призвели до значного фізичного руйнування економіки нашої країни, зокрема, ракетно-дронові удари російського агресора суттєво пошкодили й українські енергооб'єкти. В Об'єднаній енергетичній системі (ОЕС) України зросла кількість аварійних режимів – екстрених та стабілізаційних відключень, регіональних блекаутів. Надійність роботи електричних мереж та електропостачання споживачів у таких умовах зумовлюється стійкістю енергосистеми, ефективністю її функціонування, можливістю швидко подолати значні руйнування. Як наслідок одна із актуальних задач полягає у забезпеченні ефективного протиаварійного керування стійкістю режимів роботи ОЕС України [1, 2]. На сьогодні важливим є формування нових вимог до алгоритмів функціонування засобів протиаварійної автоматики (ПА) із забезпечення живучості, стійкості, стабільності енергопостачання, швидкого повернення системи у попередній чи у новий нормальний стан, усунення потенційних каскадних аварій, відновлення

© М. Ф. Сопель, С. П. Денисюк, О. В. Сподинський, О. С. Михайлевський, 2026



Ця робота ліцензується відповідно до **Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)**
Конфлікт інтересів: Автори заявили про відсутність конфлікту

зруйнованої генерації. Крім того, зростаюча частка ВДЕ в обсягах генерації ОЕС України посилює впливу метеорологічних факторів. Зміна рівнів енергоспоживання та розподілені енергетичні ресурси обумовлюють наявність двосторонніх потоків енергії.

Тому актуальним залишається формування нових критеріїв побудови та функціонування засобів ПА з врахуванням системних принципів та системних ефектів, можливостей врахування внутрішніх факторів розвитку електроенергетичної системи, адаптаційних можливостей такого розвитку. Мають бути посилені вимоги до розгляду типів подій в енергосистемі, що виникають в системі, їх класифікації, критеріїв оцінки негативного впливу, зокрема:

- розподілення подій на комутаційні (нормальні), перед аварійні, аварійні тощо;
- оцінка технічних характеристик: часу спрацювання, часу контролю за перевищенням/зниженням контрольованих величин;
- формування уточненого переліку негативних факторів впливу.

Як наслідок вимоги до ПА стають жорсткішими, їх функціональні ознаки можуть значно розширюватися. До відомих і вже традиційних проблем налаштування та керування ПА додаються нові чинники, зокрема, фізичні руйнування через атаки росії, зміна обсягів енергоспоживання на регіональному рівні, мінливість генерації ВДЕ, кібератаки. Існує очевидна потреба в розробці та застосуванні в Україні принципово нових пристроїв для аварійного керування режимами енергосистеми, зокрема, з використанням закордонного досвіду у сфері цифрової трансформації електроенергетичних систем на основі адаптивних алгоритмів.

Метою роботи є підвищення енергетичної стійкості енергетики у воєнний час та повоєнного відновлення економіки України завдяки розробленню сучасних засобів вдосконаленої адаптивної протиаварійної автоматики електроенергетичних систем.

Еволюція розвитку протиаварійної автоматики. Системні аварії в електричних мережах розвиваються лавиноподібно і супроводжуються порушеннями стійкості і небезпечною розділення системи на несинхронно працюючі частини, що може привести до утворення значного дефіциту потужності в окремих вузлах електроенергетичної системи [2–5].

Швидкість розвитку системних аварій і висока інтенсивність аварійних збурень вимагають доповнення автоматики керування нормальними режимами протиаварійним керуванням, яке здійснюється засобами ПА, запобігаючи або локалізуючи наслідки аварій. З урахуванням швидкоплинності аварійних процесів, що виникають внаслідок порушення нормального функціонування електромереж, їх запобігання та своєчасна ліквідація практично неможлива силами оперативного персоналу. Основні функції застосування ПА передбачають в автоматичному режимі: підтримання стійкості енергосистеми загалом; усунення

асинхронного режиму; регулювання промислової частоти та напруги; введення відповідних обмежень щодо перевантаження електрообладнання [2–4].

Засоби і комплекси ПА – це технічні системи, що забезпечують стійкість електроенергетичних систем шляхом швидкого виявлення, аналізу та реагування на аварійні режими, (короткі замикання, перевантаження, втрату стійкості), щоб запобігти масштабним відключенням, зберегти цілісність системи та мінімізувати збитки. ПА включає підсистеми автоматичного запобігання порушенню стійкості (АЗПС), обмеження зниження/підвищення частоти та напруги (АОЗЧ, АОПЧ, АОЗН, АОПН), ліквідації асинхронних режимів (АЛАР), автоматичного обмеження перевантаження обладнання (АОПО), автоматичного частотного розвантаження (АЧР) [3–5].

Традиційні ПА функціонують згідно постійної програми, яка закладається в схему, а налаштування уставок здійснюється на основі попередніх розрахунків нормальних і аварійних режимів. При цьому пристрої ПА постійно контролюють необхідні параметри і фіксують моменти небезпечного відхилення або раптового порушення нормального режиму, визначають їх вплив і виробляють відповідні впливи на об'єкти керування. Чим більше чинників контролює ПА, тим ближче до оптимальних будуть її впливи.

Комплекс пристроїв ПА поділяється на наступні складові частини: пускові пристрої, дозуючі пристрої, виконавчі пристрої. У кожному конкретному випадку структура пристрою ПА визначається його призначенням і умовами роботи. У загальному випадку пристрої ПА складаються з трьох частин: моніторингової, логічної і виконавчої. Моніторингова частина включає в себе пускові органи (ПО), органи контролю електричного режиму. Сигнали, що виробляються у моніторинговій частині, поступають в логічну частину, що включає в себе логічні елементи і органи автоматичного дозування впливів (АДВ). Логічні елементи, з'їдаючи послідовність, тривалість і інтенсивність сигналів, що поступають від моніторингової частини, формують відповідні впливи. Нарешті, виконавча частина включає в себе органи або апарати керування, за допомогою яких виробляються розглянуті вище впливи, зокрема, відключення генераторів, розвантаження турбін, ділення енергосистем, відключення навантаження та ін. Пристрої ПА на своєму рівні задовольняти на-ступним технічним вимогам: швидкодії, селективності, чутливості, надійності.

У кінці ХХ ст. еволюція ПА здійснювалась у міру зростання одиничних потужностей, розвитку електроенергетичних систем і ускладнення схем зв'язуючих їх ліній електропередачі, йшла по шляху збільшення числа автономних пристроїв автоматики і кількості їх типів [4–6]. Проте всі пристрої ПА реагували на параметри електромеханічного перехідного процесу в електроенергетичних системах і керували його протіканням, що вимагає розглядати комплекс пристроїв ПА як єдину автоматичну систему. Використання мікропроцесорної цифрової апаратури створило можливість реалізації принципу Імітаційної

Динамічної Оптимізації (І-ДО), згідно з яким виконується постійне коригування об'ємів керівних дій ПА відповідно до поточного стану системи, завдяки чому надійно забезпечується стійкість енергосистеми та мінімізуються вимкнення споживачів, які використовуються як засіб керівної дії ПА [1].

Адаптивна протиаварійна автоматика забезпечення статичної стійкості енергосистеми. З розвитком електроенергетики на початку ХХІ ст. постала проблема зростання швидкості спрацювання ПА задля збереження цілісності системи, запобігання ланцюговим відключенням, стабільності її функціонування при широкому застосуванні розподілених енергетичних ресурсів та активних споживачів. Це зумовило розробку та впровадження адаптивних систем ПА, що використовують цифрові технології для точнішого та швидшого керування процесами [6, 7].

Стало загально визнаним, що адаптивна ПА – це керуюча система в енергетиці, яка динамічно коригує свою роботу, аналізуючи поточний стан енергосистеми, щоб запобігти аваріям, підтримувати її стійкість та швидко відновлювати роботу після збоїв, потенційно реалізує адаптивні алгоритми керування, розроблена на сучасній мікропроцесорній основі, забезпечуючи гнучкий захист [7–9].

Доведено, що ефективність і гнучкість системи протиаварійного керування можна суттєво підвищити застосуванням адаптивної автоматики [8–11].

В таких системах ПА параметри поточного режиму визначаються розрахунком оцінювання стану (електричного режиму) ОЕС на основі телевимірювань [8, 9]. Об'єми керівних дій для забезпечення нормативів стійкості визначаються на заданій множині зовнішніх збурень та для заданих траєкторій об'єднання режиму послідовними розрахунками об'єднаних режимів. Результати синхронізованих вимірювань та обробки інформації записуються та передаються на вищі рівні ієрархії керування (в диспетчерські центри регіональних енергосистем та ОЕС України) спеціально виділеними каналами. Аварійна експрес-інформація передається на верхні рівні ієрархії за ініціативою системи моніторингу, не чекаючи запиту.

З погляду застосування адаптивних алгоритмів можемо стверджувати, що в адаптивних ПА має бути реалізований принцип Інтелектуальної І-ДО (ІІ-ДО), який використовує завчасно виконані розрахунки об'ємів керівних дій відповідно до прогнозованих збурень і прогнозованого стану системи [7–9]. Принцип протиаварійної автоматики ІІ-ДО в енергосистемах – це застосування завчасно розрахованих об'ємів керуючих впливів, що ґрунтуються на прогнозуванні збурень та стану системи, для швидкого реагування на аварійні ситуації; використання мікропроцесорів, що дозволяє постійно коригувати ці дії та є розвитком принципу І-ДО [8, 9].

Згідно з принципом ІІ-ДО сформовано і обґрунтовано структуру мікропроцесорної протиаварійної автоматики з централізованим

формуванням дозованих керівних дій [7–9]. Використання створеного в Інституті електродинаміки НАН України і МПП «АНІГЕР» апаратно-програмного комплексу (АПК) «Регіна», який за своїми технічними характеристиками і функціональними можливостями не поступається кращим світовим зразкам, надав можливість для суттєвого удосконалення систем протиаварійного керування ОЕС України.

З використанням АПК «Регіна» параметри поточного режиму в побудованих системах ПА визначаються для оцінювання стану ОЕС, зокрема, на основі телевимірювань. Об'єми керівних дій для забезпечення нормативів стійкості визначаються на заданій множині зовнішніх збурень та для заданих траєкторій об'єднання режиму. Заданими є також послідовність (черга) вимикання навантаження та об'єми навантаження, яке вимикає конкретним вимикачем. Фактично виникнення аварійних ситуацій супроводжується перехідними процесами, параметри яких реєструються встановленими в ОЕС України АПК «Регіна», що утворюють систему моніторингу перехідних процесів Wide-Area Measurement Systems (WAMS). Зареєстрована інформація надає можливість верифікації динамічних моделей як елементів електроенергетичної системи, так і системи в цілому [8, 9].

Особливо важливе значення для розв'язання задач оцінювання та діагностування режимів електроенергетичних систем та ОЕС України в цілому мають синхронізовані виміри фазних кутів напруги, практичне одержання та використання яких стало можливим із впровадженням АПК «Регіна». Створення системи моніторингу ОЕС України на базі АПК «Регіна» надає можливість на якісно новому рівні вирішувати задачі автоматичного керування ОЕС України з метою забезпечення її стійкості і надійності шляхом розробки адаптивних цифрових систем ПА.

Пускові органи ПА фіксують аварійні вимкнення та увімкнення ліній у дії ПА. Централізовані системи ПА, які створюються відповідно до вимог стандарту ІЕС 61850 на відкриті комунікації, мають швидкодіючу систему збору і обробки доаварійної інформації, надлишковість вимірів, надійні комунікаційні канали передачі сигналів і команд, що зв'язують окремі керуючі й обчислювальні пристрої в єдину технологічну мережу. Програмно-технічний комплекс централізованої ПА є відкритим і дозволяє враховувати модифікації структури та зміни технологій керування в електроенергетичних системах.

Визначення потрібного об'єму керівних дій (вимикання навантаження) здійснюється поступовим дискретним збільшенням навантаження, яке вимикається, з перевіркою коефіцієнтів запасу з активної потужності K_p і за напругою K_u , поки нормативні вимоги не будуть задоволені [9, 10].

Показано, що функціонування автоматики забезпечується: ієрархічною структурою побудови; надійністю всіх компонентів системи; дублюванням програмно-технічних засобів; дублюванням каналів передачі аварійної і доаварійної інформації, забезпеченням у АДВ дубльованого вводу і виводу

інформації; зберіганням вихідних даних і програмного забезпечення в енергонезалежній пам'яті; резервуванням пристроїв зберігання даних; запобіганням несанкціонованого доступу; резервуванням живлення від незалежних джерел [9]. Можна стверджувати, що фахівцями Інституту електродинаміки НАН України та МПП «АНІГЕР» запропоновано побудову ефективної адаптивної ПА забезпечення стійкості енергосистем на мікропроцесорній основі з періодичним розрахунком об'ємів керівних дій автоматики, здійснюваним з використанням інформації про поточний режим, яку надає оцінювання стану на основі телевимірювань.

Запропоновані засоби адаптивної ПА у 2006–2015 роках широко впроваджені для забезпечення стійкості ОЕС України, яка реалізується на основі мікропроцесорної техніки, з використанням інформації про поточний електричний режим, яку дає оцінювання стану енергосистеми, завдяки чому мінімізується об'єм вимикання навантаження для підтримання нормативного рівня статичної стійкості ОЕС України у перетині. Власне АПК «Регіна» забезпечує суттєве удосконалення проти-аварійного керування завдяки використанню в оперативному і автоматичному керуванні ОЕС синхронізованих з високою точністю вимірювань векторів напруги у вузлах електричної мережі.

Вдосконалення адаптивна протиаварійна автоматика. Комплексне впровадження концепції Smart Grid 3.0, цифрова трансформація електроенергетичних систем з середини другого десятиліття XXI ст. зумовило розгортання робіт з вдосконалення адаптивної ПА [11, 12]. Так, цифровізація електроенергетики призвела до накопичення великих обсягів даних та можливості їх обробки за допомогою алгоритмів машинного навчання (МН) (Machine Learning, ML) [12]. Після посилення правил ринку електроенергії відбувається активне впровадження цифрових систем, що дозволяють збільшити перетікання міжсистемних потоків активної потужності [13, 14], що знижує запас стійкості та збільшує ймовірність розвитку аварії з

поділом електроенергетичних систем. Особливості параметрів та режимів маломасштабної генерації, недостатня спостережуваність та керованість у централізованому керуванні визначають необхідність використання децентралізованого багатоагентного контролю режимів таких мереж.

Визначено розширеного багатогранного впливу автоматизації на підвищення операційної ефективності, забезпечення надійності та сприяння екологічній стійкості та інтеграції ВДЕ [15]. Майбутня траєкторія електроавтоматизації – інтеграція алгоритмів штучного інтелекту (ШІ) (Artificial Intelligence, AI) та МН, розширення можливостей інтелектуальних мереж та зростання значення кібербезпеки на етапі цифровізації енергетичних систем із застосуванням ПА. Так, в роботі [15] показано доцільність використання децентралізованого керування аварійними ситуаціями та керування відновленням мережі, зокрема, із застосуванням методів машинного навчання, аварійного проактивного збалансованого розділення енергетичних районів мережі вздовж одного з апіорі фіксованих перерізів мережі у разі виникнення порушень з переходом до острівного режиму, децентралізовану синхронізацію активних частин на віддалених комутаторах мережі тощо. Важливо розробити методи аварійного керування на основі використання алгоритмів глибокого машинного навчання та отриманих даних від синхронізованих векторних вимірювальних приладів [13–16].

Ви рішення проблеми аварійного керування електроенергетичними системами, особливо при інтеграції ВДЕ, за допомогою алгоритмів машинного навчання передбачає використання методів для підтримки стабільності системи (перехідний процес, напруга, частота) в режимі реального часу, які забезпечують швидше прийняття рішень.

Найефективніші алгоритми МН для адаптивної ПА з розширеними функціональними можливостями для електроенергетичних систем, зокрема, для визначення типів збурень та вибору керувальних дій наведено в таблиці [15, 16].

Таблиця 1 – Алгоритми МН для ПА електроенергетичних систем

№	Назва алгоритму	Призначення алгоритму
1	Дерева рішень (Decision Tree, DT)	Використовуються для швидкої класифікації та регресії для відображення станів системи на керуючі дії
2	Випадковий ліс (Random Forest, RF)	Ефективний для класифікації складних, нелінійних системних збурень
3	Екстремальне градієнтне посилення (Extreme Gradient Boosting, XGBoost/LightGBM)	Переважно застосовується для високоточного вибору керуючих дій у режимі реального часу
4	На основі штучних нейронних мереж (Artificial Neural Networks, ANN)	Використовуються для моделювання складних, нелінійних зв'язків
5	Глибокого навчання (Deep Learning, DL)	Включають рекурентні нейронні мережі (RNN) та мережі з довгою короткочасною пам'яттю (LSTM), вони використовуються для аналізу часових рядів перехідних процесів
6	Опорних векторів (Support Vector Machines, SVM)	Використовуються для класифікації меж стійкості

Аналіз показав, що розвиток засобів протиаварійного керування у теперішній час зумовлює в ПА застосування нових можливостей, які можна ідентифікувати як реалізацію принципу Інтелектуальної Інтернет Інтегрованої Динамічної Оптимізації (ІІ-ДО) (Intelligent Internet Integrated Dynamic Optimization).

Створення вдосконаленої адаптивної ПА на основі принципу ІІ-ДО. Принцип ІІ-ДО при побудові вдосконаленої адаптивної ПА орієнтує на широке застосування інтегрованих архітектур, ефективну цифровізацію процесів керування та широке застосування Інтернет-технологій.

Можна стверджувати, що протиаварійна автоматика електроенергетичних систем в Україні повинна розглядатися на загальносистемному, регіональному чи об'єктному рівнях із розділенням зовнішніх та внутрішніх системних впливів на значимі чи незначимі, за складовими; електромагнітні, електромеханічні, інформаційні (кіберзагрози), механічні (фізичні пошкодження). Доцільно виділити множини параметрів впливів: електромагнітних (ПЕЛ), електромеханічних (ПЕМ), механічних (ПМ), інформаційних (ПІНФ). Також через широке застосування ВДЕ необхідно враховувати й метеорологічні впливи (множина параметрів ПМЕТ).

В окремих випадках важливо здійснювати формування типових графіків регулювання режимів системи за рахунок ПА, оцінку поширення збурень, визначення джерела збурення (адресності). Фактично має здійснюватися оптимізація можливих перехідних процесів при переході системи з одного стану в інший, зміни режимів роботи окремих генераторів та навантажень, які є значимими для системи. Для цього важливим є аналіз стану системи у векторному просторі – пошук оптимальних траєкторій переходу нормального в аварійний стан та навпаки. При впровадженні сучасних засобів ПА має здійснюватися поточний аналіз режимів роботи системи – обтяжені їх режими функціонування чи ні; допустимих рівнів обтяженості; прогнозування режимів, сценаріїв їх розвитку із використанням адаптованих розрахункових моделей із заданою точністю, які можуть бути безпосередньо задіяні у контурі керування.

Для ефективного функціонування вдосконаленої адаптивної ПА згідно принципу ІІ-ДО мають бути реалізовані вимоги останніх стандартів серії IEC 61850, зокрема: ДСТУ IEC TS 61850-1-2:2023 (IEC TS 61850-1-2:2020+ AMD1:2022, IDT) «Комунікаційні мережі та системи для автоматизації електроенергетичних підприємств. Частина 1-2. Настанови щодо розширення можливості використання IEC 61850 як базового стандарту» та ДСТУ IEC TR 61850-7-5:2023 (IEC TR 61850-7-5:2021, IDT) «Комунікаційні мережі та системи для автоматизації електроенергетичних підприємств. Частина 7—5. Настанови щодо моделювання згідно з IEC 61850 (IEC TR 61850-7-5:2021, IDT)». За необхідності враховуються вимоги ДСТУ IEC TR 62351-90-3:2023 (IEC TR 62351-90-3:2021, IDT) «Керування енергетичними системами та пов'язаний з

ним інформаційний обмін. Безпека даних та комунікацій. Частина 90-3. Настанови щодо керування мережею та системою».

При побудові структури вдосконаленої адаптивної ПА формуються критерії обмежень по зміні окремих елементів множин параметрів P_j у вигляді нерівностей:

$$P_{\text{МІН},j} < P_j < P_{\text{МАКС},j}. \quad (1)$$

Для конкретних застосувань таких ПА важливо здійснити наповнення зазначених множин ПЕЛ, ПЕМ, ПМ, ПІНФ, ПМЕТ конкретними елементами, які найбільш повно (адекватно) описують структуру та процеси системи. При необхідності у конкретному випадку має здійснюватися розширення чи уточнення елементів зазначених множин параметрів – вплив сезонності, непередбачуваних факторів (зокрема, зростання їх інтенсивності).

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:

$$A \rightarrow B \rightarrow A; \quad (2)$$

$$A \rightarrow B \rightarrow C; \quad (3)$$

$$A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A. \quad (4)$$

Стан В може складатися із кількох проміжних станів B_1, B_2, \dots , при переході через які система досягає нормального стану (початкового чи нового). При виборі алгоритмів використання проміжних сценаріїв визначаються параметри та їх характеристики для всіх можливих станів B_1, B_2, \dots .

Оцінка ефективності роботи вдосконаленої адаптивної ПА визначається за тривалістю станів В, С, а також кількістю та тривалістю проміжних станів B_i .

Алгоритм роботи вдосконаленої адаптивної ПА для електроенергетичних систем містить кроки:

Крок 1. Адаптація критеріїв спрацювання ПА до поточних умов функціонування електроенергетичної системи.

Крок 2. Аналіз поточного стану функціонування електроенергетичної системи та формування вимог до поточного значення вставок спрацювання керуючих органів ПА.

Крок 3. Моніторинг зміни контрольованих параметрів на заданому часовому проміжку T_T з використанням інформації від РМУ (Phasor Measurement Unit) та/чи WMU (Waveform Measurement Unit). При $T > T_T$ перехід на крок 9.

Крок 4. Якщо контрольовані параметри за абсолютними значеннями та часом дії (спрацювання) ПА не перевищують граничні (максимальні чи мінімальні) значення, то перехід на крок 3. У протилежному випадку, перехід на крок 5.

Крок 5. Спрацювання ПА (почергово) в залежності від значень відхилень параметрів.

Крок 6. Контроль аварійного режиму – значень параметрів та часу.

Крок 7. Переведення електроенергетичної системи у нормальний режим (згідно співвідношень (2–4)).

Крок 8. Перевірка допустимої тривалості часу робота ПА. Якщо тривалість менша T_T , то перехід на крок 3. Якщо ні, то перехід на крок 9.

Крок 9. Завершення функціонування ПА на інтервалі часу T_T .

Представлений алгоритм передбачає здійснення адаптації систем ПА до конкретних типів електроенергетичних систем. Так, реалізація вдосконаленої адаптивної ПА в локальних електроенергетичних системах, системах розподілу електроенергії має свої особливості, конкретні дії (алгоритми) для відновлення електроживлення з врахуванням типу генерації, накопичення енергії, типу навантажень, у тому числі наявності активних споживачів), передбачаючи застосування швидкодіючих пристроїв автоматичного повторного включення (АПВ) та автоматичного включення резерву (АВР).

У сучасних системах вдосконаленої адаптивної ПА має місце широке використання зв'язку обладнання протиаварійної автоматики з WAMS → PMU, WAMS → WMU, що фактично передбачає створення WAMPAC (Wide Area Monitoring, Protection, and Control) з розширеними функціями [1, 7, 17]. При побудові сучасних систем ПА доцільно розглядати базові архітектури, питання сумісності елементів і компонентів ПА, як на фізичному (силовому – енергетичні потоки), так і на інформаційному рівню.

Як приклад побудови вперше в Україні вдосконаленої адаптивної ПА розглянемо реконструкцію протиаварійної автоматики Івано-Франківського енерговузла.

На початку 2022 року ОЕС України разом з енергосистемою Молдови були приєднані на синхронну роботу до Європейської мережі операторів систем передачі електроенергії ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity). Відтоді раніше відокремлені Бурштинський острів та основна частина ОЕС України працюють паралельно, що суттєво вплинуло на електричні режими роботи західної частини ОЕС України. Це призвело до необхідності перевірки, оновлення та перегляду існуючого протиаварійного керування в цьому енергорайоні. У зв'язку з приєднанням ОЕС України на синхронну роботу до енергосистеми ENTSO-E, введенням в експлуатацію ПЛІ 330 кВ Західноукраїнська – Богородчани в 2022 році і можливим переводом живлення «Опорнянського енерговузла» з енергорайону Бурштинської ТЕС / ПС Калуш на роботу від ПС 330 кВ Івано-Франківська з'явилась необхідність до перегляду існуючої логіки роботи АОЗН.

Метою створення комплексу є підвищення надійності та ефективності роботи Івано-Франківського енерговузла; своєчасне надання оперативному персоналу енергосистеми та ОЕС достовірної інформації в режимі плинного часу про хід технологічного процесу, стан контрольованого енергорайону та комплексу ПА; забезпечення персоналу ретроспективною технологічною інформацією (реєстрація подій, розрахункових показників) для аналізу, оптимізації та планування роботи енергорайону та його ремонту; підвищення довговічності, ступеня експлуатаційної надійності обладнання; зменшення збитків від помилок персоналу при забезпеченні надійного електропостачання споживачів регіону в нормальних, аварійних та післяаварійних режимах засобами протиаварійного керування. Протиаварійне керування виконується за рахунок дозованого відключення менш відповідальних споживачів на об'єктах регіону.

При створенні вдосконаленої адаптивної ПА Івано-Франківського енерговузла з врахуванням принципу III-ДО 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 автоматику обмеження перевантаження обладнання (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.

Вдосконалена адаптивна ПА АОЗН в мережі 110 кВ енерговузла запобігає зниженню напруги на шинах 110 кВ підстанцій в аварійних ситуаціях, пов'язаних з відключенням транзитних ПЛ 330 кВ в транзиті Бурштинська ТЕС – Івано-Франківська – Чернівецька – Кам'янець-Подільська – Дністровська ГЕС, що може призвести до зниження напруги в мережі 110 кВ до рівня $0,9U_{ном}$ та нижче.

Розрахунки електричних режимів в вдосконаленій адаптивній ПА базуються на традиційних методах розрахунків ustalених режимів електричних мереж, сценарному підході, врахуванні нормальних (N-0), ремонтних або аварійних (N-1) та ремонтно-аварійних схем (N-2). Здійснено аналіз аварійних ситуацій з перевіркою можливого переобтяження ліній (магістральної та розподільчої мережі), трансформаторів та виявлення значного відхилення напруги у вузлах мережі у різних конфігураціях (в ремонтних N-1 та ремонтно-аварійних N-2 схемах).

При розв'язанні задач оцінювання та діагностування режимів Івано-Франківського енерговузла здійснюються синхронізовані виміри амплітуди та фазних кутів напруги з використанням модифікованої АПК «Регіна». В такій АПК «Регіна» реалізовано інтелектуальні електронні датчики (виносні модулі) розподіленої інтелектуальної системи введення аналогових сигналів, завадостійкі модулі введення дискретних сигналів, покращені алгоритми обробки даних, у тому числі візуалізації даних.

Під час побудови ПА та розрахунках режимів роботи системи ПА враховувався вплив ВДЕ з встановленою потужністю:

- ВЕС – 363 МВт;
- СЕС – 872 МВт;
- біоТЕС – 12,4 МВт;
- малі ГЕС – 5,5 МВт.

Варто зауважити, що генерацію ВЕС та СЕС враховано з урахуванням втрат потужності у внутрішній мережі електростанцій (3,5 %), тобто 0,965 від встановленої потужності для ВЕС та з урахуванням втрат (8 %), тобто в обсязі 0,92 від встановленої потужності для СЕС.

Проведені дослідження ustalених режимів роботи, оцінена надійність мережі при нормальних, ремонтних та аварійних схемах для режимів максимуму і мінімуму навантажень, визначені режими перевищення напруги і струмів, а також сформульовані рекомендації щодо технічного переоснащення ПА. Запропонована вдосконалена структура адаптивної ПА: АОЗН для обмеження споживання в умовах зниження напруги та АОПО для уникнення перевантаження автотрансформаторів, які з метою недопущення розвитку аварії та виникнення «лавини напруги» передбачають дозовані дії на обмеження споживання. Алгоритми функціонування створеної адаптивної ПА Івано-Франківського енерговузла базуються на дослідженні сценаріїв із урахуванням впливу ВДЕ, зміни топології мережі, перспективного зростання споживання та особливостей нових режимів роботи енерговузла з використанням вимог ENTSO-E.

Підвищення надійності електропостачання споживачів та ефективність роботи Івано-Франківського енерговузла забезпечується за рахунок дозованої дії на відключення навантаження при виникненні аварійних режимів в електромережі.

Реалізація принципу III-ДО в ПА Івано-Франківського енерговузла вже сьогодні забезпечує стійкість, гнучкість, розширені функціональні можливості ОЕС України на регіональному рівні.

Висновки. На основі аналізу еволюції побудови та застосування систем ПА розглянуто особливості розробки сучасних засобів вдосконаленої адаптивної ПА електроенергетичних систем, направленої на підвищення енергетичної стійкості енергетики у воєнний час та повоєнного відновлення економіки України.

Запропоновано принципи побудови вдосконаленої адаптивної ПА забезпечення стійкості електроенергетичних систем, яка контролює запас стійкості поточного режиму і визначає керівні дії, необхідні для задоволення нормативних вимог як щодо активної потужності у перетинах, так і щодо напруги у центрах споживання, а також визначено, що важливе значення для розв'язання задач оцінювання та діагностування режимів електроенергетичних систем та ОЕС України в цілому мають синхронізовані виміри фазних кутів напруги, практичне одержання та використання яких стало можливим із впровадженням АПК «Регіна».

Представлені результати побудованої вперше в Україні вдосконаленої адаптивної ПА на прикладі ПА Івано-Франківського енерговузла, де при побудові ПА та розрахунках режимів роботи системи враховувався вплив ВДЕ з встановленою потужністю 1253 МВт. При розв'язанні задач оцінювання та діагностування режимів в системі ПА здійснюються синхронізовані виміри амплітуди та фазних кутів напруги з використанням модифікованої АПК «Регіна». В модифікованій АПК «Регіна» реалізовано інтелектуальні електронні датчики (виносні модулі) розподіленої інтелектуальної системи введення аналогових сигналів, завадостійкі модулі введення дискретних сигналів, покращені алгоритми обробки даних, у тому числі візуалізації даних.

На сьогодні в нашій країні формується адаптивна, прогностична протиаварійна автоматика із аналізом поточних режимів та прогнозуванням можливих станів електроенергетичної системи згідно використання принципу III-ДО. В перспективі – це створення системи ПА на рівні ОЕС України.

Список літератури

1. Цифрова трансформація електроенергетики України. Реалізація в умовах воєнного стану та повоєнного відновлення: монографія / І. В. Блінов та ін. Одеса: Видавничий дім «Гельветика», 2025. 362 с.
2. Забезпечення стійкості енергосистем та їх об'єднань / О. А. Буткевич та ін. Київ: Інститут електродинаміки НАН України, 2018. 320 с.
3. Голота А. Д. Автоматика в електроенергетичних системах: навчальний посібник. Київ: Вища школа, 2006. 367 с.

4. Панченко С. В., Блиндюк В. С., Баженов В. М. Релейний захист і автоматика : навчальний посібник. Харків : УкрДУЗТ, 2020. Ч. 1. 250 с.
5. Рубаненко О. Є., Рубаненко О. О., Гунько І. О. Релейний захист та автоматика електричних станцій : електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання. Вінниця : ВНТУ, 2023. 125 с.
6. Створення технічних засобів системи моніторингу перехідних режимів енергосистем та їх метрологічне забезпечення / Б. С. Стогній та ін. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2007. № 1(16). С. 16–22.
7. Стогній Б. С., Сопель М. Ф. Основи моніторингу в електроенергетиці. Про поняття моніторингу. *Технічна електродинаміка*. 2013. № 1. С. 62–69.
8. Адаптивна протиаварійна автоматика забезпечення статичної стійкості енергосистеми / Б. С. Стогній та ін. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 4. С. 50–52.
9. Дослідження алгоритмів адаптивної протиаварійної автоматики південного регіону ОЕС України / Б. С. Стогній та ін. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 7. С. 70–75.
10. СОУ-Н МЕВ 40.1-00100227-68:2012. Стійкість енергосистем. Керівні вказівки. На заміну ГКД 34.20.575-2002 ; чинний від 2012-10-21. Вид. офіц. Київ : Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, 2012. 29 с.
11. Physics insight of the inertia of power system and methods to provide inertial response / Y. Huang et al. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*. 2022. Vol. 8, no. 2. P. 559–568. DOI: <https://doi.org/10.17775/cseejpes.2021.08670>.
12. Introduction and literature review of the application of machine learning/deep learning to control problems of power systems / S. Sadeghi et al. *Application of Machine Learning and Deep Learning Methods to Power System Problems*. Cham, 2021. P. 83–117. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-77696-1_5.
13. Cao J., Fan Z. Deep learning-based online small signal stability assessment of power systems with renewable generation. *2018 IEEE SmartWorld, Ubiquitous Intelligence & Computing, Advanced & Trusted Computing, Scalable Computing & Communications, Cloud & Big Data Computing, Internet of People and Smart City Innovation (SmartWorld/SCALCOM/UIC/ATC/CBDCOM/IOP/SCI)*, Guangzhou, China, 8–12 October 2018. 2018. P. 216–221. DOI: <https://doi.org/10.1109/smartworld.2018.00072>.
14. A unified online deep learning prediction model for small signal and transient stability / S. K. Azman et al. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2020. Vol. 35, no. 6. P. 4585–4598. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2020.2999102>.
15. Alimi O. A., Ouahada K., Abu-Mahfouz A. M. A review of machine learning approaches to power system security and stability. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 113512–113531. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2020.3003568>.
16. Zeng Y. Revolutionizing power systems through electrical automation: efficiency, reliability, and sustainability. *Academic Journal of Science and Technology*. 2024. Vol. 10, no. 1. P. 159–162. DOI: <https://doi.org/10.54097/mprf1047>.
17. Синхрофазори в сучасних енергосистемах: визначення, вимірювання та архітектура WAMS / С. П. Денисюк та ін. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2025. Т. 15, № 2. С. 181–187. DOI: <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-21>.
4. S. V. Panchenko, V. S. Blyndiuk, and V. M. Bazhenov, *Releyniy zakhyst i avtomatyka [Relay Protection and Automation]*, Part 1. Kharkiv: UkrSURT, 2020. (in Ukrainian)
5. O. Ye. Rubanenko, O. O. Rubanenko, and I. O. Hunko, *Releyniy zakhyst ta avtomatyka elektrichnykh stantsii [Relay Protection and Automation for Power Plants]*. Vinnytsia: VNTU, 2023. (in Ukrainian)
6. B. S. Stohnii et al., “Stvorennia tekhnichnykh zasobiv systemy monitorynhu perekhidnykh rezhymiv enerhosystem ta yikh metrolohichne zabezpechennia [Development of technical components for a monitoring system for transient states in power systems and their metrological support],” *Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*, no. 1(16), pp. 16–22, 2007. (in Ukrainian)
7. B. S. Stohnii and M. F. Sopol, “Fundamentals of monitoring process in electroenergy. About the concept of monitoring process,” *Tekhnichna elektrodynamika*, no. 1, pp. 62–69, 2013. (in Ukrainian)
8. B. S. Stohnii, V. M. Avramenko, M. F. Sopol, and V. L. Prikhno, “An adaptive emergency control automatics for maintenance of power system steady state stability,” *Tekhnichna elektrodynamika*, no. 4, pp. 50–52, 2014. (in Ukrainian)
9. B. S. Stohnii, V. M. Avramenko, M. F. Sopol, and V. L. Prikhno, “Research of algorithms of the adaptive emergency control system in the south region of the united power system of Ukraine,” *Tekhnichna elektrodynamika*, no. 7, pp. 70–75, 2014. (in Ukrainian)
10. *Stiikist enerhosystem. Kerivni vkazivky [Resilience of Power Systems: Guidelines]*, SOU-N MEB 00100227-68:2012 Obiednannia enerhetychnykh pidpriemstv «Haluzevyi rezervno-investytsiinyi fond rozvytku enerhetyky» [Association of Energy Companies “Sectoral”], Kyiv, 2012. (in Ukrainian)
11. Y. Huang, Y. Wang, C. Li, H. Zhao, and Q. Wu, “Physics insight of the inertia of power system and methods to provide inertial response,” *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 8, no. 2, pp. 559–568, 2022, doi: <https://doi.org/10.17775/cseejpes.2021.08670>
12. S. Sadeghi, A. Hesami Naghshbandy, P. Moradi, and N. Rezaei, “Introduction and literature review of the application of machine learning/deep learning to control problems of power systems,” in *Application of Machine Learning and Deep Learning Methods to Power System Problems*. Cham: Springer Int. Publishing, 2021, pp. 83–117, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-77696-1_5
13. J. Cao and Z. Fan, “Deep learning-based online small signal stability assessment of power systems with renewable generation,” in *2018 IEEE SmartWorld, Ubiquitous Intelligence & Computing, Advanced & Trusted Computing, Scalable Computing & Communications, Cloud & Big Data Computing, Internet of People and Smart City Innovation (SmartWorld/SCALCOM/UIC/ATC/CBDCOM/IOP/SCI)*, Guangzhou, China, Oct. 8–12, 2018. IEEE, 2018, pp. 216–221, doi: <https://doi.org/10.1109/smartworld.2018.00072>
14. S. K. Azman, Y. J. Isbeih, M. S. E. Moursi, and K. Elbassioni, “A unified online deep learning prediction model for small signal and transient stability,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 35, no. 6, pp. 4585–4598, Nov. 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2020.2999102>
15. O. A. Alimi, K. Ouahada, and A. M. Abu-Mahfouz, “A review of machine learning approaches to power system security and stability,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 113512–113531, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/access.2020.3003568>
16. Y. Zeng, “Revolutionizing power systems through electrical automation: Efficiency, reliability, and sustainability,” *Academic Journal of Science and Technology*, vol. 10, no. 1, pp. 159–162, Mar. 2024, doi: <https://doi.org/10.54097/mprf1047>
17. S. Denysiuk, M. Sopol, O. Spodynskyi, and Y. Dovgodko, “Synchronphasors in modern power systems: Definition, measurement, and WAMS architecture,” *Scientific Bulletin of the Tavria State Agrotechnological University*, vol. 15, no. 2, pp. 181–187, 2025, doi: <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-21> (in Ukrainian)

References

1. I. V. Blinov et al., *Tsyfrova transformatsiia elektroenerhetyky Ukrainy. Realizatsiia v umovakh voiennoho stanu ta povoiennoho vidnovlennia [The Digital Transformation of Ukraine's Electric Power Industry: Implementation Under Martial Law and Post-War Recovery]*. Odesa: Publ. House “Helvetica”, 2025. (in Ukrainian)
2. O. A. Butkevych et al., *Zabezpechennia stiikosti enerhosystem ta yikh obiednan [Ensuring the stability of power systems and their interconnections]*. Kyiv: Inst. Electrodyn. Nat. Acad. Sci. Ukraine, 2018. (in Ukrainian)
3. A. D. Holota, *Avtomatyka v elektroenerhetychnykh systemakh [Automation in Electric Power Systems]*. Kyiv: Vyshcha shk., 2006. (in Ukrainian)

Надійшла (Received) 06.03.2026

Прийнята (Accepted) 26.03.2026

Опублікована (Published) 29.05.2026

SOPEL MYKHAILO ✉ – Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher of the Department of Electrical Systems Automation, Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine; Kyiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3438-5848>; e-mail: regina@regina.org.ua.

DENYSIUK SERHII – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Electrical Systems Automation, Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine; Kyiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6299-3680>; e-mail: spdens@ukr.net.

SPODYNSKYI OLEKSANDR – Lead Engineer of the Department of Electrical Systems Automation, Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine; Kyiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3947-2534>; e-mail: a.spodynskyi@gmail.com.

MYKHAILEVSKYI OLEH – Lead Engineer of the Department of Electrical Systems Automation, Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine; Kyiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9264-460X>; e-mail: mykhailev@gmail.com.

FEATURES OF DESIGN AND IMPLEMENTATION OF ADVANCED ADAPTIVE EMERGENCY CONTROL SYSTEMS FOR POWER SYSTEMS

It is shown that there is an evident need in Ukraine for the development and application of fundamentally new devices for emergency control of power system modes, particularly by leveraging international experience in the field of digital transformation of power systems based on adaptive algorithms. Based on the analysis of the evolution of the design and application of Emergency Control systems, the features of developing modern advanced adaptive Emergency Control tools for power systems are considered, aimed at increasing energy resilience during wartime and the post-war economic recovery of Ukraine. Principles for constructing advanced adaptive Emergency Control to ensure power system stability are proposed; these monitor the stability margin of the current mode and determine the control actions required to meet regulatory requirements regarding both active power in tie-lines and voltage at load centers. It is determined that synchronized measurements of voltage phase angles are of vital importance for solving the tasks of assessment and diagnostics of power system modes and the Integrated Power System of Ukraine as a whole. The practical acquisition and use of these measurements became possible with the implementation of the “Regina” hardware and software complex. The results of constructing the first advanced adaptive Emergency Control in Ukraine for the Ivano-Frankivsk energy hub are presented. During the Emergency Control design and system mode calculations, the impact of Renewable Energy Sources with an installed capacity of 1,253 MW was taken into account. The modified “Regina” complex features intelligent electronic sensors (remote modules) of a distributed intelligent analog signal input system, noise-immune discrete signal input modules, and improved data processing algorithms, including data visualization.

Keywords: power system; emergency control; transient stability monitoring systems; undervoltage load shedding; equipment overload protection; load shedding.