

ОСОБЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ SMART-МОНІТОРИНГУ ПРИ ГЕНЕРАЦІЇ, ПЕРЕДАЧІ ТА РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Наукова теорія моніторингу в енергетиці потребує свого розвитку з урахуванням задач енергетичного переходу, реалізації концепції Smart Grid на місцевому рівні, зокрема, на локальному рівні енергозабезпечення з розподіленими джерелами енергії, які працюють на низькій та в окремих випадках на середній напрузі, де задачі моніторингу і керування досить глибоко взаємопов'язані і мають відображати різноманітну специфіку побудови та функціонування локальних електроенергетичних систем. Науково-технічне обґрунтування застосування Smart-моніторингу електроенергетичної системи середньої та низької напруги розглядається як нова якість у прийнятті управлінських рішень, тобто як комплексний та системний моніторинг, що на сучасному інноваційному рівні забезпечує спостереження поточної технологічної та економічної ефективності функціонування елементів системи та системи в цілому. Проведено аналіз глобального моніторингу WAMS, його різновидів та Smart-моніторингу. Системи WAMS та WAMPAC застосовуються на рівні високої та середньої напруги (оператори передачі електроенергії), тоді як сфера застосування Smart-моніторингу – середні та низькі напруги. Наведено взаємодія розглянутих технологій моніторингу та оптимізаційних задач з технологіями DSM. Для організації роботи системи Smart-моніторингу необхідно провести: комплексний моніторинг електроенергії, енергетичного балансу та моніторинг потреб різних користувачів локальних системи; моніторинг роботи джерел розподіленої енергії та якості електроенергії та моніторинг навантаження. Наведено узагальнений алгоритм застосування Smart-моніторингу для оцінки технічних показників та участь у формуванні тарифів для участі на локальних ринках.

Ключові слова: моніторинг, мікромережа, відновлювальні джерела енергії, локальна електроенергетична система, керування попитом.

Вступ.

Вимоги реалізації енергетичного переходу енергетики України, оптимального поєднання централізованої та децентралізованої складової вимагають цілісного підходу до організації взаємодії всіх складових системи: генеруючих активів, електромережі та навантажень, що має бути ефективно інтегровано з метою оптимізації виробництва електроенергії, зниження втрат при її передачі і розподілу та мінімізації викидів вуглецю [1 – 4].

Лібералізація ринку електроенергії, генерація з розподілених відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та постійне зростання енергоспоживання ставлять економічний прибуток перед технологічними вимогами як визначальний фактор у стратегічних рішеннях розвитку енергосистеми.

Актуальність сумісного вирішення задач моніторингу та керування як на рівні ОЕС України, так і на рівні систем передачі і розподілу, локальному рівні енергозабезпечення обумовлена необхідністю врахування тенденцій переходу в енергетиці від продукції і технологій до сервісу. Тому зростає потреба в модернізації систем передачі та розподілу електроенергії, у першу чергу, розгортання передових вимірювальних технологій за напрямками: інтеграція розподілених енергетичних ресурсів (ВДЕ електротранспорту та систем зберігання енергії, керування попитом); надійність та стійкість; якість електроенергії та якість енергопостачання; розвиток (еволюція) наявних технологій передачі та розподілу електроенергії (рис.1) [3].

Актуальність розвитку моніторингу, як в централізованих, так і в локальних електроенергетичних системах (ЛЕС), визначено у відповідних директивах ЄС. В 2019 р. Рада міністрів ЄС офіційно ухвалено чотири нові законодавчі акти ЄС, які переробляють ринок електроенергії ЄС, щоб зробити його придатним для майбутнього [5]. У травні 2022 р. Європейська Комісія представила план REPowerEU, в якому викладений курс впровадження та використання «зелених» джерел енергії [6].

На сьогодні в Україні є нагальним вирішення наукової проблеми побудови проблемно орієнтованого моніторингу ЛЕС із використанням додаткових опцій та ієрархічної побудови. Пропонується розвиток та поширення науково-технічних основ моніторингу в енергетиці, на ЛЕС з відновлюваними джерелами енергії низької напруги (до 35 кВ). Власне виділений клас систем набуває пріоритетного розвитку і саме там на сьогодні відбуваються найбільш революційні зміни щодо їх інтелектуалізації та сфер застосування.

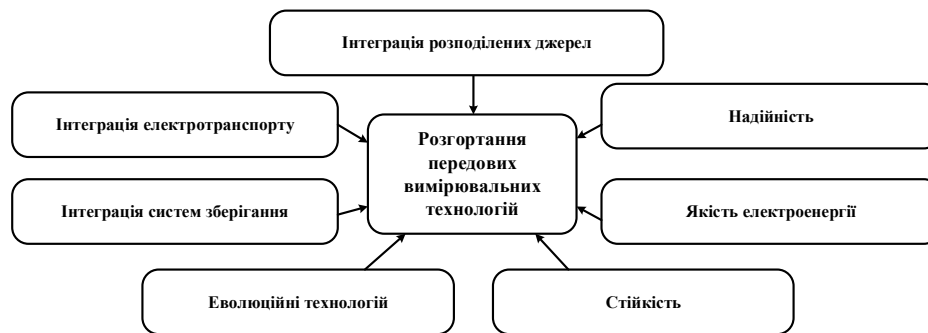


Рисунок 1 - Ключові напрямлення, що сприяють розгортанню передових вимірювальних технологій

В [7] запропоновано розширене поняття моніторингу в енергетиці: моніторинг в енергетиці – спеціально організоване систематичне автоматичне спостереження за технологічними процесами в енергетиці та оцінювання їх стану. На відміну від відомих класичних визначень, запропоновано моніторинг в електроенергетиці розглядати як спостереження та оцінювання стану, а під оцінюванням стану розуміти не тільки поточне оцінювання, а й ретроспективний аналіз та прогнозування стану.

У цьому визначенні моніторинг розглядається для електроенергетичних систем високої та середньої напруги, а також враховується, що будь-який технологічний процес – це не тільки власне процес, а різноманітне обладнання, за допомогою якого він реалізується, функціональні матеріали, зовнішнє середовище, що впливають на технологічний процес. При такому визначенні організаційна, управлінська, фінансово-економічна діяльність у галузі енергетики не є предметом моніторингу, оскільки безпосередньо не належить до технологічного процесу; до процедур моніторингу в електроенергетиці не включається розповсюджена в енергетиці інформаційна процедура, як комерційний облік енергії, що визначається її економічним, а не технологічним призначенням. Власне моніторинг зі спостереження і оцінкою стану передбачає контроль, діагностику та розпізнавання образів.

Однак запропонована наукова теорія моніторингу в енергетиці потребує свого розвитку з урахуванням задач енергетичного переходу, реалізації концепції Smart Grid на регіональному (місцевому) рівні, зокрема, на локальному рівні енергозабезпечення з ВДЕ, які працюють на низькій та в окремих випадках на середній напрузі, де задачі моніторингу і керування досить глибоко взаємопов'язані і мають відображати різноманітну специфіку побудови та функціонування виділених ЛЕС.

На сьогодні система глобального моніторингу (Wide-area monitoring/measurement system, WAMS) є комплексом систем, який відстежує стан централізованої енергосистеми та здатний реалізувати програми моніторингу та оцінки WAMS здатна працювати на значних територіях, охоплюючи електроенергетичну систему в цілому. Сучасні WAMS фактично є технологією не тільки моніторингу, але й керування та контролю динаміки електричних мереж високої напруги, які здійснюються в реальному часі [8].

Проблеми перевантаження електромережі та збоїв в усьому світі підкреслили необхідність удосконалення електромереж за допомогою систем глобального моніторингу, захисту та контролю (WAMPAC) як економічно ефективного рішення для покращення планування, експлуатації, обслуговування та торгівлі енергією. Системи WAMPAC використовують переваги останніх досягнень у сенсорних, комунікаційних, обчислювальних, візуалізаційних і алгоритмічних методах. Технологія синхронізованих вимірювань (SMT), включаючи одиниці вимірювання фазора (PMU) і її програми, є важливим елементом і чинником WAMPAC. Наявний досвід створення великомасштабних систем WAMPAC показав, що ключовим елементом у створенні системи WAMPAC є розробка відповідної стратегії та створення детального плану встановлення. Крім того, інвестиції в такі системи можуть бути оптимізовані, якщо належним чином розроблено проект, адаптований до конкретних потреб даної енергетичної системи.

Smart-моніторинг розглядається як нова якість у прийнятті управлінських рішень, як комплексний та системний моніторинг, що на сучасному інноваційному рівні забезпечує спостереження поточної технологічної та економічної ефективності функціонування елементів системи та системи в цілому [8].

Мета роботи розвиток теорії моніторингу сучасних локальних електроенергетичних систем та виділення особливостей реалізації Smart-моніторингу при генерації, передачі та розподілу електроенергії.

Матеріали досліджень.

Основа моніторингу – це інформаційні процедури, за допомогою яких отримується кількісна або якісна інформація про властивості об'єкта моніторингу та його стан. При цьому обробка інформації включає операції збирання, введення, записування, перетворення, зчитування, зберігання, реєстрація та потребує свого розвитку з урахуванням таких категорій як кількість та якість, їх взаємоперетворення [10].

Основні завдання традиційного моніторингу в електроенергетиці можна визначити наступним чином:

– негайне, в режимі on-line забезпечення інформацією в необхідному, інколи досить малому реальному часі автоматичного керування (автоматичного регулювання, автоматики, релейного захисту, стеження та ін.);

– негайне, в режимі on-line забезпечення інформацією автоматизованого та ручного оперативно-диспетчерського керування;

– накопичення даних, створення баз даних, баз знань, архівів;

– проведення ретроспективного (тенденції, напрями, оцінки розвитку) та поточного (спостереження, контроль, діагностика, розпізнавання образів) аналізу ситуацій з оцінкою стану об'єктів моніторингу;

– організація передачі, обміну моніторинговою інформацією між об'єктами та суб'єктами ієрархічної структури, що мають відношення до технологічних процесів в електроенергетиці.

Втілення принципу інтегральної організації моніторингу в традиційній (централізованій) електроенергетиці означає створення єдиного інформаційного поля на окремих електроенергетичних об'єктах моніторингу та єдиного інформаційного простору в об'єднаних чи єдиних енергосистемах країни чи декількох країн (глобальний моніторинг) [10, 11]. При цьому інформація розглядається як оброблені, організовані та пов'язані дані, що породжують зміст (значення) (згідно стандарту ISO 5127:2017). Ефективність використання інформації визначаються показниками її якості, зокрема:

– *точністю*, обумовлена ступенем її близькості до реального стану об'єкта, процесу, явища тощо;

– *актуальністю*, визначається ступенем збереження цінності інформації в момент її використання; цей показник стосується інформації, яка змінюється в часі;

– *достовірністю*, яка визначається її здатністю відображати існуючі об'єкти з необхідною точністю; одиницею вимірювання достовірності може служити довіра ймовірність необхідної точності;

– *доступністю* для сприйняття користувачем, що забезпечується виконанням відповідних процедур її отримання.

Застосування WAMS дозволяє оцінити загальну тенденцію щодо експлуатації електроенергетичних систем близько до їх меж стабільності з метою збільшення потужності передачі електроенергії, відповідно зменшуючи запаси безпеки та збільшуючи збурення та ризик знеструмлення. Було визначено наступні переваги WAMS для електроенергетичних систем 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.

Для побудови системи WAMPAC необхідно дуже детально розглянути питання, пов'язані з інфраструктурою, додатками, процедурами. У цьому сенсі критичні особливості та потреби даної енергосистеми. Вони визначають архітектуру системи та пріоритети додатків майбутньої системи WAMPAC.

З точки зору дизайну системи WAMPAC є оптимальним підходом застосування відповідного середовища моделювання для розробки та тестування функціональності WAMPAC.

Одним із конкретних проблем у найближчому майбутньому є ймовірність широкого розгортання PMU, інтегрованих в єдину систему WAMPAC. Очікується, що деякі дані, доступні з реальних PMU будуть оцінені за допомогою розроблених методів моделювання. Таким чином, перевірка існуючих мережевих моделей представлятиме особливий інтерес.

В [12] відмічається, що в блоках синхронних вимірювань SMT, які представляють інтерес для використання у системах розподілу окрім блоки вимірювання фази (PMU), які моделюють вхідні сигнали як синусоїди та забезпечують їх величину, фазу (синхронізовані вектори) і частоту є блоки вимірювання форми (Waveform measurement units WMU), також відомі як датчики "точка на хвилі". Вони включають цифрові реєстратори несправностей, динамічні реєстратори збоїв і вимірювачі якості електроенергії. Вони є альтернативою в програмах, де потрібні дані про форму сигналу (наприклад, для аналізу перехідних процесів системи).

Ключовим фактором для сучасних систем широкомасштабного моніторингу (Wide-Area Monitoring Systems, WAMS) є впровадження кількох PMU, розміщених у кількох місцях мережі, як доповнення до звичайних вимірювань. PMU забезпечують доступність синхронізованих у часі знімків мережі, включаючи кути фази напруги та струму. Було запропоновано різноманітні додатки WAMS з використанням цих масштабних вимірювань.

На сьогодні система глобального моніторингу (Wide-area Monitoring System, WAMS) є комплексом систем, який відстежує стан централізованої енергосистеми та здатний реалізувати програми моніторингу та оцінки WAMS здатна працювати на значних територіях, охоплюючи електроенергетичну систему в

цілому. Визначено, що сучасні WAMS фактично є технологією не тільки моніторингу, але й керування та контролю динаміки електричних мереж високої напруги, які здійснюються в реальному часі.

Запропонована WAMS «Регіна-Ч» [13] є прикладом успішної розробки WAMS в Україні, яка призначена для: реєстрації миттєвих значень струмів і напруги перехідних процесів; вимірювання сили, напруги, потужності, фази і частоти змінного струму; зберігання в пам'яті результатів вимірювань; програмної обробки вимірювальної інформації, виведення її у вигляді цифрових масивів і текстових повідомлень, а також передачі її на будь-які рівні з прив'язкою до сигналів точного часу, отриманих від GPS приймача.

WAMS «Регіна-Ч» розроблялася як комплексна система, яка відстежує стан електроенергетичної системи на основі приладу синхронізованих векторних вимірювань (Phasor Measurement Units, PMU). Застосування технології синхрофазора сприяло новим розробкам, які можна класифікувати за трьома категоріями: широкомасштабний моніторинг енергетичної системи (WAMPS), широкомасштабний захист енергетичної системи (WAPPS) і широкомасштабний контроль енергетичної системи (WAPSC) у режимі реального часу та офлайн-ситуаціях [13].

Проблеми перевантаження електромережі та збоїв в усьому світі підкреслили необхідність удосконалити електромережі за допомогою інтелектуальних програм (SmartGrids, Flexnet і Intelligrig), що забезпечують підтримку прийняття рішень операторами та автоматизацію для забезпечення оптимального використання активів, зберігаючи при цьому безпеку системи та теплові обмеження для установок і контурів.

Використання систем моніторингу представлено на рис.2 [12].

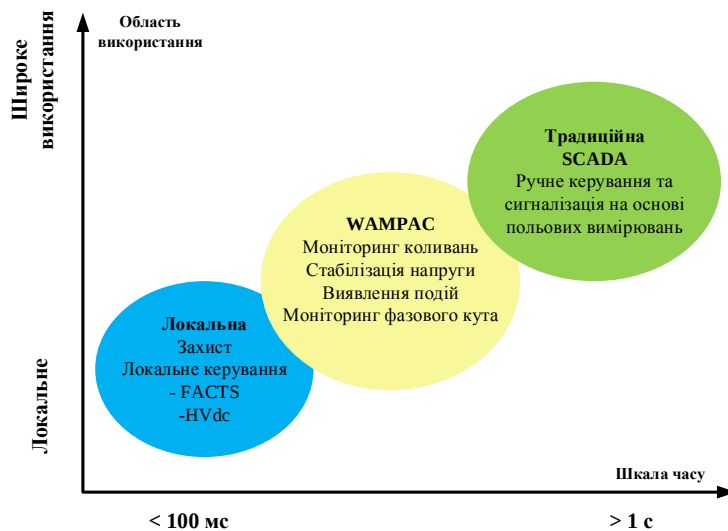


Рисунок 2 - Використання систем моніторингу

Застосування технології синхрофазора сприяло новим розробкам, які можна класифікувати за трьома категоріями: широкомасштабний моніторинг енергетичної системи (WAMPS), широкомасштабний захист енергетичної системи (WAPPS) і широкомасштабний контроль енергетичної системи (WAPSC) тощо у режимі реального часу та офлайн-ситуації [11, 14 – 18].

Wide area моніторинг енергосистеми (Wide area Power system monitoring, WAMPS)

Стан енергосистеми визначається як сукупність напруг прямої послідовності на всіх мережевих шинах, отриманих одночасно. Оцінка стану відіграє ключову роль у моніторингу та управлінні енергосистемами в режимі реального часу. Технологія оцінки стану, яка зараз використовується, була розроблена в 1970-х роках і базується на несинхронізованих вимірюваннях. Через низьку швидкість сканування та відносно повільні обчислення сучасна технологія не здатна надати інформацію про динамічний стан енергосистеми. Синхронізовані векторні вимірювання надають абсолютно нову можливість повторно відобразити весь процес оцінки стану.

Широкомасштабний захист енергосистеми (Wide area Power system protection, WAPSP)

Синхронізовані векторні вимірювання пропонують вирішення низки складних проблем захисту. Загалом вимірювання фазора є особливо ефективними для покращення функцій захисту, які мають відносно малий час відгуку. Перспективним застосуванням PMU є точне вимірювання імпедансу лінії, що є ключовим входним сигналом для визначення місця пошкодження.

Широкомасштабний контроль енергосистеми (Wide area Power system Control, WAPSC)

До запровадження фазорних вимірювань все управління в енергосистемі використовувало локальні вимірювання та математичну модель більшої системи. Було визнано, що такі контролери рідко були

оптимальними і могли виробляти абсолютно неприйнятні відповіді на системні явища, коли моделі були неточними. Типовими застосуваннями були проблеми, де цілі управління були глобальними за своєю природою: наприклад, контролер постійного струму високої напруги (HVDC) може бути використаний для гасіння електромеханічних коливань між двома широко розділеними областями енергосистеми.

Широкомасштабний контроль (Wide Area Controller, WAC)

Wide area контролер є централізованою частиною, яка є основним органом усієї архітектури розумної мережі широкої зони, яка отримала розумне керування завдяки своєму обчислювальному механізму та визначеним користувачем випадкам інформації. Завдяки цим ситуаціям WAC ідеально контролює електроенергетичну систему у виділеному регіоні через двосторонній зв'язок. Можуть бути розгорнуті Системи wide area контролю (Wide-area control systems, WACS), які перевищують функціональні можливості локального контролю та реагують швидше, ніж ручне керування з центру контролю. Окрім переваги швидкого контролю в надзвичайних ситуаціях, динамічний контроль набуває все більшого значення разом із розвитком швидкого контрольованого обладнання, такого як HVDC та FACTS.

Широкомасштабний захист (Wide-Area Protection, WAP)

Швидка еволюція систем широкомасштабного моніторингу (WAMS) дозволяє обробляти в режимі реального часу дані глобальних вимірювань для використання в програмах захисту системи. Виконуються всебічні дослідження Систем широкомасштабного захисту (Wide-Area Protection Systems, WAPS) з упором на розробку універсальних повністю автоматичних систем захисту, здатних справлятися з великими перешкодами та запобігати значним відключенням електроенергії у великих енергосистемах.

У всіх таких випадках існує потреба в захисті, яка складається з наступних факторів: класифікація завад; локалізація завад; ідентифікація та прогнозування порушень.

Моніторинг фазового кута (Phase Angle Monitoring, PAM)

Через PMU у реальному часі Фазовий кут різних вузлів відстежується точно, оскільки він синхронізований у часі, і точний PAM є дуже важливим для енергосистеми [18]. PAM забезпечує доступ у реальному часі до точної різниці фазових кутів між будь-якою парою шин. PAM дозволяє прогнозувати потенційні проблеми як на місцевому, так і на регіональному рівнях.

Моніторинг частот і швидкості зміни частоти

Частоту та швидкість зміни частоти можна виміряти за допомогою PMU. Зміна частоти може відображати зміну опору компонента системи живлення. Швидкість зміни частоти забезпечує стабільність вимірів [17].

WAMPAC пропонує численні переваги, такі як стабільність, надійність і безпека постачання. Крім того, це має економічний ефект, якщо система працює ближче до меж стабільності та потужності мережі, що призводить до збільшення передачі енергії. Дані вимірювань WAMPAC дозволяють здійснювати моніторинг у режимі реального часу, і його можна використовувати як систему раннього попередження для забезпечення стабільності системи, щоб обмежити діапазон і вплив збурень і запобігти знеструмленню системи енергопостачання.

Очікується, що системи WAMPAC в Україні покращать безпеку та надійність роботи енергосистеми на додаток до зниження завад та запобіганню знеструмлення.

Технології мікромережі (Microgrid) створюються шляхом інтеграції таких розподілених джерел енергії в комунальну мережу. Концепція мікромережі пропонується для створення автономної системи, що складається з розподілених енергетичних ресурсів, здатних працювати в ізолюваному режимі.

Незважаючи на те, що впровадження ЛЕС або мікромереж пов'язане з багатьма проблемами. Ці виклики можна структурувати наступним чином:

- Двонаправлений потік електроенергії – розподільний фідер був розроблений для потоку електроенергії в одному напрямку. Але ЛЕС які включають розосереджені генератори малої потужності, потужність перетікає в обох напрямках, що може призвести до ускладнення координації захисту, небажаної схеми потоку електроенергії.

- Проблеми з якістю електроенергії в системах змінного/постійного струму. Гармоніки, коливання напруги та частоти в мікромережі змінного струму, а також такі проблеми, як пусковий струм, циркуляційний струм, несправності шини постійного струму, пов'язані з мікромережею постійного струму, є основними проблемами в роботі системи.

- Низька інерційність. Мікромережа демонструє низьку інерційність, оскільки в основному містить розосереджені генератори з електронним інтерфейсом, які можуть покращити динамічну продуктивність системи. Але коли якщо вона працює в ізолюваному режимі, ця низька інерція може спричинити високу швидкість девіації частоти, якщо не вжити належних заходів контролю.

- Ізолюваний режим роботи - через несправності або падіння напруги робота ЛЕС змінюється з режиму підключення до мережі до роботи в ізолюваному режимі. У цій ситуації керування потоком електроенергії та керування напругою і частотою стає проблемою для надійної та ефективної роботи. Крім

того, проблеми з перевантаженням і низькою якістю електроенергії стають поширеними в автономному режимі роботи.

– Скоординоване керування декількома розподіленими джерелами живлення (РДЖ), які мають різні характеристики роботи та керування є складним. Тому належний контроль координації РДЖ також викликає велике занепокоєння.

– Варіанти накопичення енергії. ЛЕС, що має кілька РДЖ, в основному складається з відновлюваних джерел, які за своєю природою дуже переривчасті, тому для продовження електропостачання потрібні ефективні системи накопичення енергії. Крім того, це стабілізує дисбаланс навантаження та генерації та сприяє безпечній та надійній роботі Microgrid.

– Економічна та надійна робота - Економічна робота Microgrid разом із постійним значенням напруги та частоти є серйозною проблемою.

– Виклики технології та кібербезпеки. Наявність недорогих технологій для безпечної та надійної роботи, а також необхідність належного контролю та технології для інтеграції відновлюваних джерел є ключовим викликом. Потреба в швидкісних і точних обчислювальних пристроях і системі зв'язку є наступним викликом для надійної роботи Microgrid.

– Регуляторні бар'єри. Навіть сьогодні більшість органів регулювання ще не знайомі з концепцією Microgrid, а також не знають, як слід розвивати політику, пов'язану з Microgrid. Також деякі органи регулювання забороняють громадам здійснювати розвиток інфраструктури.

Технічні вимоги до роботи систем керування та систем моніторингу Microgrid зведені в стандартах. Так стандарт IEC TS 62898-3-2:2024 [19] описує надання технічних вимог до роботи систем керування мікромережею (СМК), а IEC TS 62898-3-4 [20] описує надання технічних вимог щодо моніторингу та керування мікромережами. Обидва стандарти поширюються на неізолювані або ізолювані мікромережі інтегровані з розподіленими енергетичними ресурсами для мікромереж низької і середньої напруги.

В IEC TS 62898-3-2:2024 відзначається основні функції систем керування [19]:

- керування потужністю та енергією серед різних ресурсів у мікромережі, включаючи потоки активної та реактивної потужності з різними часовими масштабами,
- потужність та енергетичні прогнози мікромережі,
- енергетичний баланс між енергетичними ресурсами вихідної мережі та мікромережі відповідно до прогнозу потужності та енергії, а також передових і місцевих обмежень,
- економічна та екологічна оптимізація,
- можливі сервісні потужності, такі як аукціони на ринку потужностей і прогноз стійкості: нові бізнес-моделі,
- архівація даних, звітування та оцінка продуктивності в різних режимах роботи.

СМК може мати деякі інші додаткові функції відповідно до розміру мікромережі та реальних випадків застосування, наприклад, управління тарифами та ринковою торгівлею та допоміжні послуги, такі як регулювання частоти, регулювання напруги, покращення якості та надійності електроенергії, можливості реагування на попит, зміна пов'язаних режимів роботи до систем моніторингу та керування мікромережею.

IEC TS 62898-3-4 присвячений стандартизації архітектури, функцій і роботи систем моніторингу та керування мікромережами (СМКМ). Основні функції [20]:

- Збір і обробка даних, включаючи збір даних у реальному часі з розподіленої генерації, навантаження, вимикачів, трансформаторів і пристроїв компенсації реактивної потужності, а також обчислення та аналіз отриманих даних.
- Керування базою даних, включаючи підтримку, синхронізацію, резервне копіювання, відновлення отриманих даних і забезпечення інтерфейсу даних з іншими внутрішніми та зовнішніми програмами.
- Людино-машинний інтерфейс, включаючи екран монітора в режимі реального часу та інтерфейс, який підтримує дистанційне керування, перемикання режимів, ручне введення даних тощо.
- Блокування та сигналізація для запобігання неправильній роботі, щоб заблокувати неправильну роботу на основі попередньо визначеного правила та логіки.
- Синхронізація часу, включаючи отримання сигналу синхронізації часу від Глобальної навігаційної супутникової системи або мережевого протоколу часу і синхронізацію часу кожного пристрою в межах мікромережі.
- Локальна оцінка якості електроенергії та можливість контролю за можливістю збору інформації про напругу поза межами, коефіцієнт потужності, гармоніку тощо та здійснення контролю для відповідного покращення якості електроенергії.
- Регулювання частоти/напруги під час стабільної роботи ізолюваної мікромережі для забезпечення напруги та частоти в прийнятному робочому діапазоні.
- Послідовність операцій або постійний перехід від вимкнення до запуску та від запуску до вимкнення.

- Комутаційне керування пристроями в мікромережах, включаючи вмикання та вимикання навантажень, генераційних установок, трансформаторів, пристроїв компенсації реактивної потужності тощо.

- Виявлення оточення, включаючи виявлення в режимі реального часу при відключенні електроенергії в системі розподілу вище за течією.

- Перехід режиму роботи, включаючи перехід з мережевого режиму в острівний режим і перехід з острівного режиму в мережевий режим.

- Контроль активної та реактивної потужності, включаючи відключення навантаження (якщо потрібно), розподіл навантаження та керування активною та реактивною потужністю в режимі реального часу відповідно до СМКМ або ручної команди.

- Здатність організації роботи джерел живлення та навантаження для підключення мікромереж з невідключеного стану.

- Інтерфейс із системою захисту або системою заземлення, коли необхідні адаптації відповідно до режимів роботи Мікромережі.

Для мікромережі, потужністю більше 100 кВт, система управління енергією та система моніторингу зазвичай розділені. Система моніторинг містить сервери даних, сервери додатків, робочі станції, маршрутизатори, пристрої захисту інформації, SCADA, система зв'язку, контролер розподіленої генерації, центральний контролер, контролер навантаження, пристрій інтерфейсу підключення до мережі та інше допоміжне обладнання. Для Microgrid менше 100 кВт на стороні споживача СКМ і СМКМ зазвичай об'єднуються в один вбудований пристрій із системою на кристалі, який називається контролером Мікромережі.

У загальному випадку Smart-моніторинг вирішує завдання як аналізу (оптимізації), так синтезу (проектування, планування, керування).

З точки зору «керуючих функцій» системи Smart-моніторингу мають враховувати, що сьогодні електроенергетична система є ієрархічною багаторівневою структурою, яка повинна діяти за принципом: підвищення інтелектуальності та зниження вимог до точності з підвищенням рангу ієрархії. Здійснюється двосторонній зв'язок з об'єктами, прогнозування управлінської технічної та фінансово-економічної діяльності, інтегрована інформаційно-аналітична підтримка, ідентифікація інформації.

Функції систем моніторингу:

- збір і обробка даних, включаючи збір даних у реальному часі щодо розподіленої генерації, навантаження, трансформаторів і пристроїв компенсації реактивної потужності, а також розрахунок і аналіз отриманих даних.

- керування базами даних, включаючи безпосередню обробку, синхронізацію, резервне копіювання та відновлення отриманих даних, а також забезпечення інтеграції даних з іншими внутрішніми та зовнішніми програмами.

- оцінка та контроль якості електроенергії (збір інформації про вихід за діапазон показників напруги, коефіцієнта потужності, гармонік тощо; відповідний контроль якості електроенергії).

- регулювання активної та реактивної потужності, включаючи відключення навантаження (в разі потреби), розподіл навантаження та контроль активної та реактивної потужності в режимі реального часу в автоматичному або ручному режимі.

При організації систем моніторингу ефективності роботи необхідно приділити увагу вирішенню наступних задач:

- балансування попиту та пропозиції;
- впровадження сучасних програм (механізмів) керування попитом (Demand Side Management);
- оцінка нерівномірності графіків енергоспоживання при електроживленні елементів ЛЕС як на змінному, так і постійному струмі.

На сьогодні розроблено два основні підходи до залучення споживачів до керування навантаженням: неявне керування попитом (implicit demand response, price-based demand response), засноване на застосуванні різних видів диференційованих за часом тарифів на електроенергію або поведінкових стимулів; явне керування попитом (explicit demand response, incentive-based demand response, event-based demand response), що передбачає безпосереднє керування навантаженням споживача [21 – 24].

Для організації роботи системи Smart-моніторингу необхідно провести:

- комплексний моніторинг електроенергії, енергетичного балансу та моніторинг потреб різних користувачів локальних системи.

- моніторинг роботи джерел розподіленої енергії та якості електроенергії, наприклад напруги, струму, потужності, частоти тощо (дані моніторингу можуть бути вибіркові, відповідно до умов роботи кожного джерела енергії).

- моніторинг навантаження: включаючи розподіл навантаження по окремим категоріям, наприклад, навантаження важливих користувачів, чутливих користувачів, великих користувачів тощо.

Науково-технічне обґрунтування застосування Smart-моніторингу електроенергетичної системи

середньої та низької напруги розглядається як нова якість у прийнятті управлінських рішень, тобто як комплексний та системний моніторинг, що на сучасному інноваційному рівні забезпечує спостереження поточної технологічної та економічної ефективності функціонування елементів системи та системи в цілому. Нова якість та цінність такого моніторингу – це необхідність використання кількісної та якісної інформації, її систематизація.

Взаємодія розглянутих технологій моніторингу та оптимізаційних задач з технологіями DSM наведені на графіку (рис.3). Показано, що якщо системи WAMS та WAMPAC застосовуються на рівні високої та середньої напруги (оператори передачі електроенергії – Electricity Transmission Operators (TSO)), то сфера застосування Smart-моніторингу – середні та низькі напруги (оператори розподілу електроенергії – Electricity Distribution Operators (DSO)). Вирішена важлива задача організації ефективної взаємодії WAMS та WAMPAC (наприклад, з WAMS «РЕГІОН-Ч») з системами Smart-моніторингу на рівні середньої напруги. На горизонтальному (базовому) рівні Smart-моніторинг взаємодіє з такими системами (або є їх елементом) як систем керування розподіленням (DMS), розподілених системи керування енергетичними ресурсами (DERMS), систем керування енергоспоживанням (EMS), розширених систем керування розподілом (ADMS). Операційними складовими нижнього рівня для Smart-моніторингу є, зокрема, інтелектуальні електронні пристрої (Intelligent Electronic Devices, IED) та Smart лічильники.

Моніторинг і керування споживанням має дві різні мети. По-перше, з точки зору споживача або мешканця, наявність інформації про рівень використання приладів може призвести до зниження витрат через зменшення споживання енергії або можливих допоміжних послуг (запити на дисбаланс, регулювання навантаження або коливання цін на електроенергію тощо). По-друге, з точки зору інтелектуальної мережі або менеджера (агрегатора) мережі керованість більшою кількістю навантажень надає більше можливостей дій для підтримки стабільності мережі, тобто більшої гнучкості та надійності (зменшення пікового попиту шляхом усунення використання електроенергії, або шляхом перенесення його на непіковий час тощо) шляхом ідентифікації навантаження та прогнозування споживання енергії навантаженням.

Методологія Smart моніторингу передбачає застосування системи неінтрузивний моніторинг навантаження пристрою (Non-Intrusive Appliance Load Monitoring, NIALM) або неінтрузивний моніторинг навантаження (Non-Intrusive Load Monitoring, NILM) та складається з простішої апаратної частини та складнішого дезагрегування навантаження. Smart моніторинг передбачає розробку методів інтрузивного моніторингу та методів неінтрузивного моніторингу навантаження, необхідних для вирішення проблеми дезагрегування навантаження [22].

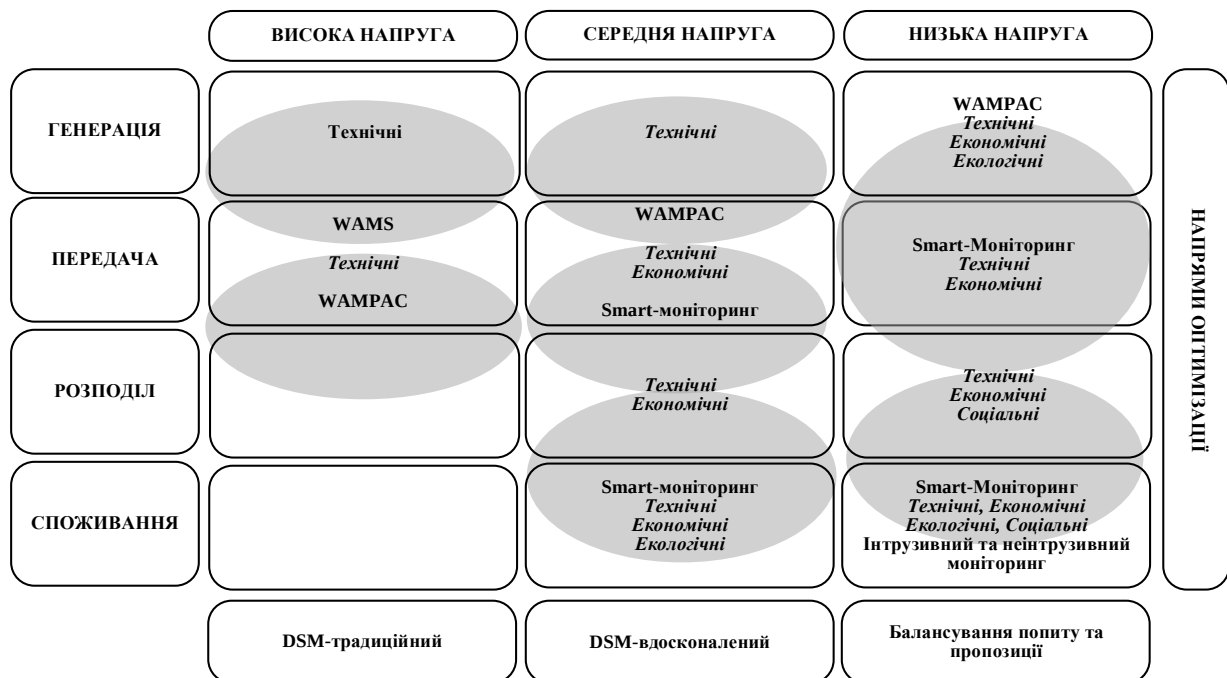


Рисунок 3 - Взаємодія технологій моніторингу та оптимізаційних задач з технологіями DSM

Розглянуті особливості та сфери застосування Smart-моніторингу, дало змогу скласти узагальний алгоритм Smart-моніторингу для оцінки технічних показників та участь у формуванні тарифів для участі на локальних ринках містить основні операції моніторингу, представлено на рис. 4.

Як додаткову складову Smart-моніторингу запропоновано здійснювати оцінку поточної економічної ефективності елементів ЛЕС, тобто Smart-моніторинг передбачатиме оцінку ефективності витрат первинного палива, економічної ефективності роботи альтернативних джерел енергії, систем акумулювання та навантажень, у тому числі й прогнозування генерації ними обсягів електроенергії та оцінки їх оптимальних рівнів.

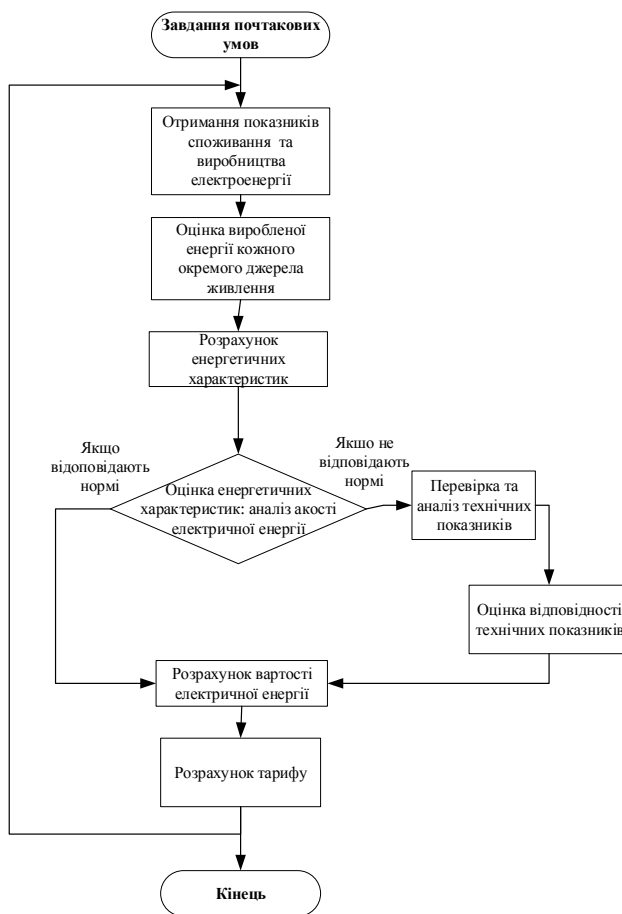


Рисунок 4

Алгоритм має наступні кроки:

1. Давачі в вузлах мікромережі/локальної електроенергетичної системи записують показники споживання та виробництва електроенергії, отримані дані зберігаються на серверах ЛЕС.
2. В системі моніторингу проводиться оцінка виробленої енергії кожного окремого джерела живлення з графіками залежностей витрат від генерованої потужності з урахуванням часу доби, пори року.
3. Розраховуються сумарні витрати на генерацію та енергетичні характеристики.
4. Виконується порівняння генерованої потужності та потужностей споживачів. Визначають показники якості електричної енергії та перевіряється відповідність стандартам. Проводиться оцінка витрат палива дизель-генераторів. При невідповідності нормам та стандартам проводиться аналіз технічних показників та їх оцінка, що впливатиме на формування тарифів.
5. Розрахунок вартості вироблення електроенергії загальної та по окремим генераторам.
6. Формування тарифної політики (динамічна тарифікація, тарифікація на добу наперед тощо) при функціонуванні системи на локальному ринку електроенергії.

Висновки.

WAMPAC має численні переваги, такі як стабільність, надійність і безпека постачання. Крім того, це має економічний ефект, якщо система працює ближче до меж стабільності та потужності мережі, що призводить до збільшення передачі енергії. Впровадження систем Smart-моніторингу сприяє оптимізації енергетичних процесів в ЛЕС, побудові децентралізованих систем енергозабезпечення, підвищенню їхньої енергоефективності, зокрема, розширенню стратегії технічного обслуговування на основі оцінки поточного стану об'єктів системи.

В рамках розвитку теорії моніторингу електроенергетичних систем запропоновано нову систему

принципів та процедур, покладених в основу побудови систем Smart-моніторингу сучасних електроенергетичних систем, зокрема, принципів побудови та реалізації Smart-моніторингу з поєднанням технічної (технологічної) та економічної ефективності.

Визначено, що Smart-моніторинг для ЛЕС з активними споживачами необхідно розглядати як комплексний системний Smart-моніторинг з розширеним функціоналом процедур, що на сучасному інноваційному рівні забезпечує спостереження поточної технологічної та економічної ефективності функціонування елементів ЛЕС, а при оцінюванні стану – виконання ідентифікації типу процесів.

Розроблено узагальнений алгоритм Smart-моніторингу для оцінки технічних показників та участь у формуванні тарифів, з урахуванням оцінки ефективності витрат первинного палива, економічної ефективності роботи відновлюваних джерел енергії, систем зберігання енергії та навантажень.

Список використаної літератури

1. Кириленко, О., С. Денисюк, і І. Білов. Цифрова трансформація енергетики: сучасні тенденції та завдання. Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України, вип. 65, Серпень 2023, с. 005, <https://doi.org/10.15407/publishing2023.65.005>.
2. Wójcik, W.; Lezhniuk, P.; Kaczmarek, C.; Komar, V.; Hunko, I.; Sobchuk, N.; Yesmakhanova, L.; Shermantayeva, Z. Integrated Assessment of the Quality of Functioning of Local Electric Energy Systems. *Energies* 2025, 18, 137. <https://doi.org/10.3390/en18010137>
- 3 C. Kim, H. Kim, S. Lee, J. Noh, E. Ghahremani and Y. Kim, "Enhancing Synchrophasor Reliability Through Network-Based Time Synchronization: KEPCO's Practical Approach," in *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 23, no. 1, pp. 81-89, Jan.-Feb. 2025, <https://doi.org/10.1109/MPE.2024.3430888>.
- 4 H. Mohsenian-Rad, M. Kezunovic and F. Rahmatian, "Synchro-Waveforms in Wide-Area Monitoring, Control, and Protection: Real-World Examples and Future Opportunities," in *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 23, no. 1, pp. 69-80, Jan.-Feb. 2025, <https://doi.org/10.1109/MPE.2024.3403800>
5. https://ec.europa.eu/info/news/clean-energy-all-europeans-package-completed-good-consumers-good-growth-and-jobs-and-good-planet-2019-may-22_en
6. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A230%3AFIN&qid=>
7. Стогній Б.С., Сопель М.Ф. Основи моніторингу в електроенергетиці. Про поняття моніторингу // Техн. електродинаміка. – 2013. – № 1. – С. 62–69
8. A. Chakraborty and P. P. Khargonekar, "Introduction to wide-area control of power systems," 2013 American Control Conference, Washington, DC, USA, 2013, pp. 6758-6770, <https://doi.org/10.1109/ACC.2013.6580901>.
9. Kyrylenko, O.V. & Stognii, B.S. & Denysiuk, S.P. & Sopel, M.F.. (2024). SMART-MONITORING OF ELECTRICAL POWER SYSTEMS. *Tekhnichna Elektrodyamika*. 2024. 48-62. <https://doi.org/10.15407/techned2024.05.048>
10. A. Chakraborty and P. P. Khargonekar. Introduction to wide-area control of power systems. 2013 American Control Conference, Washington, DC, USA, 2013. Pp. 6758-6770. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACC.2013.6580901>.
11. Xuemei Chen, Yang Jiang, Vladimir Terzija, Chao Lu. Review on measurement-based frequency dynamics monitoring and analyzing in renewable energy dominated power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2024. Vol. 155. Part B. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109520>.
12. J. R. Agüero, D. Novosel, D. Hart, A. B. Nassif, B. Enayati and C. R. Black, "Applications of Synchronized Measurement Technologies in Power Distribution Systems: Helping to Speed Up Technology Deployment," in *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 23, no. 1, pp. 18-34, Jan.-Feb. 2025, <https://doi.org/10.1109/MPE.2024.3422975>
13. <https://www.regina.org.ua/Pages/WAMS.html>
14. N. Mira-Gebauer, C. Rahmann, R. Álvarez-Malebrán and V. Vittal, "Review of Wide-Area Controllers for Supporting Power System Stability," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 8073-8095, 2023, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3237576>.
15. E. Rebello, L. Vanfretti and M. Shoaib Almas, "PMU-based real-time damping control system software and hardware architecture synthesis and evaluation," 2015 *IEEE Power & Energy Society General Meeting, Denver, CO, USA*, 2015, pp. 1-5, <https://doi.org/10.1109/PESGM.2015.7285812>.
16. Terzija, Vladimir & Valverde, Gustavo & Cai, Deyu & Regulski, Pawel & Madani, Vahid & Fitch, John & Skok, Srdjan & Begovic, M.M. & Phadke, Arun. (2011). Wide-Area Monitoring, Protection, and Control of Future Electric Power Networks. *Proceedings of the IEEE*. 99. 80 - 93. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2060450>.
17. C. Martinez, M. Parashar, J. Dyer, and J. Corrao, "Phasor Data Requirements for Real Time Wide-Area Monitoring, Control and Protection Application," EIPP White Paper, Jan. 26, 2005, p. 8

18. M. S. Almas and L. Vanfretti, "Impact of time-synchronization signal loss on PMU-based WAMPAC applications," 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), Boston, MA, USA, 2016, pp. 1-5, <https://doi.org/10.1109/PESGM.2016.7741313>.

19. IEC TS 62898-3-2:2024 - Microgrids - Part 3-2: Technical requirements - Energy management systems Released: 9. 01. 2024 English language. 70 pages

20. IEC TS 62898-3-4:2023 - Microgrids - Part 3-4: Technical requirements - Microgrid monitoring and control systems Released: 8/25/2023. English language. 40 pages

21. Денисюк С.П., Белоха Г.С., Чернечук І.С. Оптимізація енергопроцесів в системах енергозабезпечення з неінтрузивним моніторингом. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2024. № 3(90). С. 38–44. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.3.5>

22. Денисюк С.П., Белоха Г.С., Гілевич К.М., Чернечук І.С.. Моніторинг ефективності роботи в локальних електроенергетичних системах. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2024. Вип. 69. С. 46–56. <https://doi.org/10.15407/publishing2024.69.046>

23. Денисюк С.П., Белоха Г.С., Чернечук І.С. Балансування навантажень в локальних електроенергетичних системах. *Електротехнічні та інформаційні системи*. 2024. № 106. С.

S. Denysiuk¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0002-6299-3680

M. Sopol², Dr. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0002-3438-5848

H. Bielokha¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-4277-367X

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

²Small Private Enterprise "ANIGER"

FEATURES OF IMPLEMENTATION OF SMART-MONITORING IN ELECTRICITY GENERATION, TRANSMISSION AND DISTRIBUTION

The scientific theory of monitoring in the energy sector needs to be developed taking into account the tasks of energy transition, the implementation of the Smart Grid concept at the local level, in particular, at the local level of energy supply with distributed energy sources operating at low and, in some cases, medium voltage, where the tasks of monitoring and control are quite deeply interconnected and should reflect the various specifics of the construction and operation of dedicated LES. The scientific and technical justification for the use of Smart monitoring of the medium and low voltage electric power system is considered as a new quality in making management decisions, that is, as a comprehensive and systemic monitoring, which at the modern innovative level provides monitoring of the current technological and economic efficiency of the functioning of the system elements and the system as a whole. An analysis of global WAMS monitoring, its varieties and Smart monitoring is carried out. WAMS and WAMPAC systems are used at high and medium voltage levels (electricity transmission operators), while the scope of Smart monitoring is medium and low voltage. The interaction of the considered monitoring technologies and optimization tasks with DSM technologies is presented. To organize the operation of the Smart-monitoring system, it is necessary to carry out: comprehensive monitoring of electricity, energy balance and monitoring of the needs of various users of the local system; monitoring of the operation of distributed energy sources and electricity quality and load monitoring. A generalized algorithm for using Smart-monitoring to assess technical indicators and participate in the formation of tariffs for participation in local markets is presented.

Keywords: monitoring, microgrid, renewable energy sources, local electric power system, demand side management.

References

1. Kyrylenko, O., S. Denysiuk, and I. Blinov. Digital Transformation of Energy: Current Trends and Challenges. *Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*, vol. 65, August 2023, p. 005, <https://doi.org/10.15407/publishing2023.65.005>.

2. Wójcik, W.; Lezniuk, P.; Kaczmarek, C.; Komar, V.; Hunko, I.; Sobchuk, N.; Yesmakhanova, L.; Shermantayeva, Z. Integrated Assessment of the Quality of Functioning of Local Electric Energy Systems. *Energies* 2025, 18, 137. <https://doi.org/10.3390/en18010137>

3 C. Kim, H. Kim, S. Lee, J. Noh, E. Ghahremani and Y. Kim, "Enhancing Synchrophasor Reliability Through Network-Based Time Synchronization: KEPCO's Practical Approach," in *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 23, no. 1, pp. 81-89, Jan.-Feb. 2025, <https://doi.org/10.1109/MPE.2024.3430888>.

4 H. Mohsenian-Rad, M. Kezunovic and F. Rahmatian, "Synchro-Waveforms in Wide-Area Monitoring, Control, and Protection: Real-World Examples and Future Opportunities," in *IEEE Power and Energy Magazine*, ISSN 2308-7382 (Online)

vol. 23, no. 1, pp. 69-80, Jan.-Feb. 2025, <https://doi.org/10.1109/MPE.2024.3403800>

5. https://ec.europa.eu/info/news/clean-energy-all-europeans-package-completed-good-consumers-good-growth-and-jobs-and-good-planet-2019-may-22_en

6. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A230%3AFIN&qid=>

7. Stogniy B.S., Sopel M.F. Fundamentals of monitoring in the electric power industry. On the concept of monitoring // *Tech. Electrodynamics*. – 2013. – No. 1. – P. 62–69

8. A. Chakraborty and P. P. Khargonekar, "Introduction to wide-area control of power systems," 2013 American Control Conference, Washington, DC, USA, 2013, pp. 6758-6770, <https://doi.org/10.1109/ACC.2013.6580901>.

9. Kyrylenko, O.V. & Stognii, B.S. & Denysiuk, S.P. & Sopel, M.F.. (2024). SMART-MONITORING OF ELECTRICAL POWER SYSTEMS. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2024. 48-62. <https://doi.org/10.15407/techned2024.05.048>.

10. A. Chakraborty and P. P. Khargonekar. Introduction to wide-area control of power systems. 2013 American Control Conference, Washington, DC, USA, 2013. Pp. 6758-6770. <https://doi.org/10.1109/ACC.2013.6580901>

11. Xuemei Chen, Yang Jiang, Vladimir Terzija, Chao Lu. Review on measurement-based frequency dynamics monitoring and analyzing in renewable energy dominated power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2024. Vol. 155. Part B. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109520>.

12. J. R. Agüero, D. Novosel, D. Hart, A. B. Nassif, B. Enayati and C. R. Black, "Applications of Synchronized Measurement Technologies in Power Distribution Systems: Helping to Speed Up Technology Deployment," in *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 23, no. 1, pp. 18-34, Jan.-Feb. 2025, <https://doi.org/10.1109/MPE.2024.3422975>

13. <https://www.regina.org.ua/Pages/WAMS.html>

14. N. Mira-Gebauer, C. Rahmann, R. Álvarez-Malebrán and V. Vittal, "Review of Wide-Area Controllers for Supporting Power System Stability," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 8073-8095, 2023, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3237576>.

15. E. Rebello, L. Vanfretti and M. Shoaib Almas, "PMU-based real-time damping control system software and hardware architecture synthesis and evaluation," 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Denver, CO, USA, 2015, pp. 1-5, <https://doi.org/10.1109/PESGM.2015.7285812>.

16. Terzija, Vladimir & Valverde, Gustavo & Cai, Deyu & Regulski, Pawel & Madani, Vahid & Fitch, John & Skok, Srdjan & Begovic, M.M. & Phadke, Arun. (2011). Wide-Area Monitoring, Protection, and Control of Future Electric Power Networks. *Proceedings of the IEEE*. 99. 80 - 93. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2060450>.

17. C. Martinez, M. Parashar, J. Dyer, and J. Coroas, "Phasor Data Requirements for Real Time Wide-Area Monitoring, Control and Protection Application," *EIPP White Paper*, Jan. 26, 2005, p. 8

18. M. S. Almas and L. Vanfretti, "Impact of time-synchronization signal loss on PMU-based WAMPAC applications," 2016 *IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*, Boston, MA, USA, 2016, pp. 1-5, <https://doi.org/10.1109/PESGM.2016.7741313>.

19. IEC TS 62898-3-2:2024 - Microgrids - Part 3-2: Technical requirements - Energy management systems Released:9. 01. 2024 English language. 70 pages

20. IEC TS 62898-3-4:2023 - Microgrids - Part 3-4: Technical requirements - Microgrid monitoring and control systems Released:8/25/2023. English language. 40 pages

21. Denisyuk S.P., Bielokha H.S., Cherneschuk I.S. Optimization of energy processes in energy supply systems with non-intrusive monitoring. *Bulletin of the Kherson National Technical University*. 2024. No. 3(90). P. 38–44. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.3.5>

22. Denisyuk S.P., Bielokha G.S., Gilevich K.M., Cherneschuk I.S.. Monitoring of work efficiency in local electric power systems. *Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*. 2024. Issue 69. P. 46–56. <https://doi.org/10.15407/publishing2024.69.046>

23. Denisyuk S.P., Bielokha G.S., Cherneschuk I.S. Load balancing in local electric power systems. *Electrical and information systems*. 2024. No. 106. P.

Надійшла: 10.03.2025

Received: 10.03.2025