

## SMART-МОНІТОРИНГ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

О.В. Кириленко<sup>1\*</sup>, академік НАН України, Б.С. Стогній<sup>1\*\*</sup>, академік НАН України,  
С.П. Денисюк<sup>2\*\*\*</sup>, докт. техн. наук, М.Ф. Сопель<sup>1\*\*\*\*</sup>, докт. техн. наук

<sup>1</sup> Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна.

<sup>2</sup> НТУ України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
пр. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна,  
e-mail: [spdens@ukr.net](mailto:spdens@ukr.net)

*Показано, що трансформація енергетичного сектора на основі побудови нових архітектур енергетичних систем потребує сумісного розгляду трьох шарів двостороннього енергоінформаційного обміну: економічного, інформаційно-керуючого та фізичного (енергетичного), а функціонування сучасних електроенергетичних систем зумовлює застосування моніторингу процесів з розширеними функціональними можливостями. Для такого інтелектуального моніторингу, визначеного як Smart-моніторинг, охарактеризовано процедури моніторингу першого та другого рівня, зокрема з врахуванням вимірювання із зміною роду сигналу, оперування з інформацією з синтаксичною, семантичною та прагматичною адекватністю, здійснення діагностування з ідентифікацією та прогнозуванням. Показано, що Smart-моніторинг в електроенергетиці на рівні середніх та низьких напруг (систем розподілу та споживання) має формуватися як технологічна платформа діагностування, аудиту, керування, диспетчерування, енергоменеджменту електроенергетичних систем, формування сучасних енергетичних ринків. Бібл. 32, рис. 2.*

**Ключові слова:** електроенергетична система, інтелектуальний моніторинг, енергоінформаційний обмін, процедури моніторингу, технічні та економічні показники.

**Вступ.** Глобальний перехід від енергетичних систем на основі викопного палива до низьковуглецевих і відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), проголошений як енергетичний перехід, визначається трьома складовими, так званими 3D: декарбонізацією (переходом до вуглецево-нейтральної енергетики); децентралізацією (переходом до розподіленої енергетики); диджиталізацією/цифровізацією (переходом до цифрових технологій в енергетиці) [1]. Науково-інноваційною базою такого переходу на початку ХХ ст. стала концепція Smart Grid [2, 3] та розроблена в Національному інституті стандартів і технології США (NIST) Архітектурна Модель Smart Grid (Smart Grid Architecture Model, SGAM) з виділенням функціональних зон, доменів та шарів взаємодії [4].

На сьогодні інтеграція диспетчеризованих та недиспетчеризованих ВДЕ в енергосистему, широке застосування накопичувачів електроенергії, електромобілів та механізмів керування попитом на електроенергію у споживача, який вже став активним, зумовлює поєднання на системному рівні трансформації способів виробництва, розподілу та споживання енергії з цифровою трансформацією [5, 6]. Поєднання технологій Інтернету речей (IoT) з розподіленими енергетичними системами дозволило сформувати концепцію Інтернет енергії (IoE), що є значною еволюцією в керуванні генерацією, розподілом та споживанням енергії, їх балансуванні за рахунок створення оцифрованої та динамічної гнучкої енергетичної системи [7, 8, 9]. Фактично IoE є системою систем (System of Systems, SoS), архітектура якої будується на особливому об'єднанні трьох систем: системи формування, контролю виконання та оплати

© Кириленко О.В., Стогній Б.С., Денисюк С.П., Сопель М.Ф., 2024

ORCID: \* <https://orcid.org/0000-0003-3610-7670> , \*\* <https://orcid.org/0000-0001-9651-4177> ,

\*\*\* <https://orcid.org/0000-0002-6299-3680> , \*\*\*\* <https://orcid.org/0000-0002-3438-5848>

© Видавець Інститут електродинаміки НАН України, 2024



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

смарт-контрактів Transactive energy (TE); системи міжмашинної взаємодії та обміну керуючими впливами між енергетичними комірками та енергетичним обладнанням Internet of Things (IoT); системи режимного керування, підтримання балансу потужності та забезпечення статичної і динамічної стійкості енергосистеми Neural Grid (NG) [8].

Реалізація інтелектуального керування двосторонніми потоками електроенергії в IoE має здійснюватися за рахунок однорангових енергетичних транзакцій між її користувачами, де енергетична транзакція – акт взаємодії двох і більше суб'єктів мікроенергосистеми – Microgrid (наприклад, енергетичних комірок) [7, 8]. Така взаємодія складається з трьох шарів енергоінформаційного обміну: економічного (фінансово-договірного), інформаційно-керуючого та фізичного (електричного) [7, 8]. Перспективною архітектурою реалізації IoE є створення нових цифрових енергетичних хмарних платформ, коли задачі системної оптимізації енергетичних процесів та інформаційної взаємодії переносяться у хмарне середовище з використання паралельних обчислень та штучного інтелекту [7].

Як інноваційне рішення формування нової архітектури енергетичних систем запропоновано концепцію Energy Cloud – отримання цінності для бізнесу за допомогою революційних енергетичних платформ [11]. Комбінація фізичного обладнання та активів, програмного забезпечення, продуктів та послуг, а також мережевих акторів визначили наступні складові платформи Energy Cloud: Integrated DER, Building2Grid, Transportation2Grid, Internet of Energy, Transactive Energy, Neural Grid та Smart Cities. Ці складові формуються на злитті сучасних проривних технологій та створюють нові бізнес-моделі, які підтримують багатосторонній обмін цінностями. Щоб успішно керувати потужністю розподільної мережі та оптимізувати використання існуючої мережевої інфраструктури, запропоновано створити платформу «оркестрування» електромережі (Grid Orchestration), що означає активну диспетчеризацію місцевих ресурсів, від зарядних пристроїв для електромобілів і інтелектуальних термостатів до акумуляторів на підстанціях і промислових навантажень [12, 13]. Платформа «оркестрування мережі» поєднує чотири ключові можливості в одному інтерфейсі: поінформованість про електромережу, прогнозування, керування розподіленими енергетичними ресурсами (PER), аналіз планування [12–14].

Звичайно, що застосування широкого спектру технологій IoT, а також їхній розвиток під час оцінки двонаправлених потоків енергоінформаційної взаємодії IoE в новій архітектурі енергетичних систем зумовлює необхідність розвитку теорії моніторингу в енергетиці, зокрема, формування моніторингових процедур з розширеними функціональними можливостями [7, 8, 11, 13, 15, 16].

Такий моніторинг має стосуватися як технологічних процесів, так і бізнес-процесів, враховувати властивості емерджентності систем (неможливості зведення властивостей системи до суми властивостей її компонентів). Особливо він є актуальним під час реалізації задач енергетичної трансформації згідно сучасних концепцій Smart Grid, IoE та Energy Cloud на регіональному (децентралізованому) рівні, зокрема, на локальному рівні енергозабезпечення, що працюють на середній та низькій напрузі, де задачі моніторингу та керування мають найбільш повно відображати різноманітну специфіку побудови та функціонування таких систем [7, 9–11, 17].

**Метою статті** є розвиток теорії моніторингу сучасних інтелектуальних електроенергетичних систем із врахуванням особливостей їх нових гнучких архітектур та принципів інформаційної взаємодії, що поєднують як технологічні, так і бізнес-процеси.

### **1. Загальна характеристика процесу моніторингу**

Ще у 1972 р. Теодор Джордж Параскевакос під час роботи з Boeing у Хантсвілі, (Алабама, США) розробив систему датчиків моніторингу, яка використовувала цифровий зв'язок [18, 19]. Власне поняття «моніторингу» в його прикладному розумінні увійшло в наукову літературу в 70-х роках ХХ століття. У 1972 р. в Стокгольмі пройшла конференція з охорони навколишнього середовища під егідою ООН, де вперше виникла необхідність домовитися щодо визначення поняття «моніторинг» [20].

Здійснювати моніторинг (*monitor*) – багатозначне поняття, яке спочатку означало наставляти, радити, застерігати, умовляти. Поняття «*monitor*» (від лат. нагадує, наглядає) має вже найближче до сучасного розуміння – стеження за якимись об'єктами або явищами. Стало загальноновизнаним, що моніторинг визначається як постійне спостереження за будь-яким об'єктом (процесом) з метою виявлення в ньому кількісних та якісних змін [21, 22].

Головна мета моніторингу – «знімати показники» стану об'єкта спостереження і виявляти розбіжності з плановими (або виявляти тенденції розвитку й передбачати майбутні стани) [21–23]. У найбільш узагальненому вигляді моніторинг і оцінку стану визначають як зворотний зв'язок, що дає

зможу з'ясувати: чи відповідає плану фактична «траєкторія» руху до мети; чи досягнуті бажані проміжні й кінцеві результати.

Основа моніторингу – це інформаційні процедури, за допомогою яких отримується кількісна або якісна, у тому числі лексографічна, 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 [23]. Основними задачами традиційного моніторингу є: спостереження за станом об'єкта, оцінка і прогноз його стану, визначення ступеня впливу на функціонування об'єкта, виявлення факторів і джерел впливу [23]. Тут єдність, взаємозв'язок і взаємозалежність якості та кількості виражаються в понятті міра.

В залежності від потреб і мети споживача одержуваної моніторингової інформації можливі чотири випадки реалізації базових процедур моніторингу і сформованих ними рішень [5, 21–23]. **Перший** випадок – моніторингова інформація повинна бути надана немоніторинговим інформаційним системам негайно і на місці її одержання, тобто на об'єкті моніторингу, для швидкого виконання певних дій на цьому об'єкті. У **другому** випадку моніторингова інформація може бути необхідною також для її використання людиною (оператором, диспетчером, черговим, керівником та ін.). **Третій** випадок, коли є затребуваним відкладене в часі використання інформації або на місці одержання, або іншому місці. **Четвертий** випадок передбачає, що моніторингова інформація необхідна не в місці одержання, а в іншому, віддаленому місці для негайного або відкладеного використання.

Відмінності моніторингу в електроенергетиці, у порівнянні з іншими сферами застосування визначаються своєрідністю і різноманітністю фізичних явищ в електроенергетиці, безперервністю основного технологічного процесу та балансом між генеруванням і споживанням електричної енергії тощо [23, 24]. 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.

Як приклад моніторингу в енергетиці можемо визначити моніторинг споживання енергетичних ресурсів (енергомоніторинг) – комплекс заходів, спрямований на отримання, створення бази даних щодо енергоспоживання об'єктів та їх обробку, для виявлення випадків відхилення споживання [24]. При цьому основними перевагами енергомоніторингу є: автоматичне сповіщення та раннє сповіщення про будь-яку нестандартну поведінку (можна сповістити менеджера через SMS, пошту тощо); автоматичне визначення потенціалу економії споживання завдяки автоматизованому механізму аналізатора піків споживання електроенергії; динамічна оцінка ефективності експлуатації будівлі (усього комплексу будівель разом з окремими будівлями, секторами/зонами тощо); встановлення та регулярний моніторинг ключових показників ефективності/цілей у сфері сталого розвитку та енергоефективності. Згідно стандарту ISO 50001 енергетичний моніторинг є одним із основних інструментів енергоменеджменту і призначений для контролю за споживанням енергетичних ресурсів.

**2. Моніторинг централізованих енергосистем.** 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) [23, 25]. 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 довірна ймовірність необхідної точності;
- *доступністю* для сприйняття користувачем, що забезпечується виконанням відповідних процедур її отримання.

Наведемо характеристики процедур добре відомого моніторингу в електроенергетиці [23, 25, 26].

#### **Моніторинг зі спостереженням стану. Базові процедури моніторингу.**

- **Підрахунок.** Здійснюється операція лічби первинної інформації про технологічні процеси в електроенергетиці.

- **Вимірювання.** Одержується кількісна первинна інформація про технологічні процеси в електроенергетиці за рахунок прямого вимірювання (вимірювання однієї величини, значення якої знаходять безпосередньо без перетворення її роду).

**Моніторинг із спостереженням та оцінюванням стану.** Цей тип моніторингу включає три базові процедури: *контроль, діагностування та розпізнавання образів*. На відміну від процедур першого типу, вони дають не кількісну, а якісну інформацію.

#### **Базові процедури моніторингу.**

- **Контроль.** В основу процедури контролю покладено елементарне вимірювання (поділ шкали вимірювання на два значення), одержується тільки якісна інформація (елементарне вимірювання з простою двозначною шкалою, отримання одного біту інформації). Перевіряється, чи значення величин (параметрів), що підлягають контролю, знаходяться в межах заданих норм, чи поза ними.

- **Діагностування.** Отримання і оцінка діагностичної інформації, застосування діагностичних моделей і алгоритмів прийняття рішень з підвищення надійності та ресурсу електроенергетичних систем; визначення значень параметрів системи, що характеризують її стан.

- **Розпізнавання образів.** Здійснюється класифікація об'єктів з кластерним аналізом. Не включає комерційний облік енергії, оскільки він визначається економічним, а не технологічним призначенням.

#### **Системні процедури моніторингу.**

- **Індикація.** Відображення визначеної інформації на фізичному пристрої відображення. Передбачає спостереження, фіксацію, контроль, характеристики та оцінку стану і стадій розвитку різних процесів, об'єктів для встановлення та контролю залежностей від зміни умов у часі.

- **Реєстрація.** Запис, фіксація фактів або явищ з метою їх обліку та надання їм офіційного статусу.

- **Передача інформації.** Здійснюється переміщення заданої кількості бітів інформації (відомостей, здатних надавати інформацію) у просторі чи здійснюється фізичний доступ суб'єктів до цієї інформації.

Важливою проблемою запропонованого моніторингу в електроенергетиці є технічна реалізація, зокрема, функція негайного і на місці надання інформації немоніторинговим системам, а кінцевою метою розширеного моніторингу завжди є оцінка стану об'єкта. Фактично визначено, що моніторинг, як з точки зору мети, так і з точки зору технічного виконання, доцільно розглядати **як одночасне спостереження і оцінку стану об'єкта** моніторингу одночасно.

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 на основі приладу синхронізованих векторних вимірювань (Phasor Measurement Unit, PMU). WAMS здатна працювати на значних територіях, охоплюючи електроенергетичну систему в цілому [25]. Переваги WAMS для централізованих енергосистем:

- моніторинг та контроль електромережі в режимі реального часу;
- дані синхронізуються та архівуються (якщо електроенергетична система розділена на декілька регіонів, різні регіони електроенергетичної системи можуть обмінюватися даними між собою завдяки використанню PMU);
- у доступі є вся інформація про параметри режиму (значення струмів, напруги, фазових кутів, активної та реактивної потужності) та мережі (потужність навантаження);

- відстеження динаміки всієї системи та запобігання небажаним порушенням у системі;
- окремі підстанції можуть використовувати розрахунок рівнів пульсацій високої напруги.

Сучасні WAMS фактично є технологією не тільки моніторингу, але й керування та контролю динаміки електричних мереж високої напруги, які здійснюються в реальному часі за рахунок використання GPS трекерів, оскільки вона здатна робити майбутні прогнози поведінки енергетичних систем шляхом аналізу даних (значень частот, напруги, струмів), підвищення надійності та стабільності [27].

Зростаюча проблема перевантаження електромережі та глобальне збільшення кількості збоїв зумовила необхідність удосконалення електричних мереж за допомогою використання концепції глобального моніторингу, захисту та контролю (Wide Area Monitoring Protection and Control, WAMPAC) [28]. WAMPAC – це концепція, яка передбачає використання загальносистемної інформації та передачу відібраної локальної інформації у віддалену точку для протидії поширенню суттєвих завад (загальносистемних збурень). WAMS у майбутньому зменшать кількість катастрофічних відключень електроенергії та загалом підвищать надійність і безпеку виробництва, передачі та розподілу енергії, особливо в енергетичних мережах з високим рівнем експлуатаційної невизначеності. Технологія синхронізованих вимірювань (Synchronized Measurement Technology, SMT) є важливим елементом і чинником WAMPAC.

Інтегрована система WAMPAC реального часу складається з чотирьох рівнів [28].

**Рівень 1:** локальний моніторинг, захист та контроль (автоматизація підстанцій локального керування генерацією).

**Рівень 2:** регіональний моніторинг та контроль (локальний баланс навантаження, локальна комутація мереж; застосування SCADA).

**Рівень 3:** менеджмент енергетичної системи, зонний контроль (оцінка стану, оцінка безпеки в електромережі, регулювання, обмежене безпекою).

**Рівень 4:** глобальний моніторинг, захист та контроль – синхронізовані векторні вимірювання (широкомасштабні баланс генерації, адекватність напруги, корегуючі дії, аварійне відключення частоти, затухання коливань, зкоординований адаптивний захист; динамічне налаштування локального захисту та використання синхронізованих векторних вимірювань).

Сучасний підхід до моніторингу електроенергетичних систем базується на взаємодії між силовою частиною системи та платформою моніторингу за допомогою хмарних технологій [29]. Згідно з визначенням NIST, хмарні обчислення (від англ. Cloud Computing) – це модель забезпечення повсюдного та зручного доступу на вимогу через мережу до спільного пулу обчислювальних ресурсів, що підлягають налаштуванню (наприклад, до комунікаційних мереж, серверів, засобів збереження даних, прикладних програм та сервісів) та які можуть бути оперативно надані і вивільнені з мінімальними управлінськими затратами та зверненнями до провайдера. Виміряні дані надсилаються безпосередньо в хмару. Хмара, зокрема, може забезпечити ефективний і практичний варіант для адміністрування послуг IoT та пропонувати деякі програми для допомоги в аналізі даних.

Як приклад успішної розробки WAMS в Україні можемо відзначити системи моніторингу перехідних режимів WAMS «Регіна-Ч» [30], 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.

Переваги інтелектуальної електромережі за допомогою моніторингу спостереження та оцінювання стану можна підсумувати таким чином [30, 31]:

- посилення центральної ролі диспетчерського контролю та збору даних у роботі електромережі;
- оперативне технічне обслуговування лише за необхідності та вчасно (що передбачає зниження витрат на технічне обслуговування та збереження високої надійності системи);
- подовження терміну служби електротехнічного обладнання (покращення повернення інвестицій, ROI);
- розробка інноваційних концепцій формування профілів навантаження;
- онлайн-діагностичні вимірювання властивостей, пов'язаних із найшвидшими механізмами відмови обладнання;
- оцінка індексу стану («здоров'я») та залишкового терміну служби обладнання.

При цьому забезпечується вирішення наступних задач:

- одержання достовірної поточної інформації та її систематизація;
- розпізнавання образів різної фізичної природи: електрофізичних процесів (сонячні панелі СЕС), механічних характеристик (ВЕС), температурні показники накопичувачів енергії (висуваються різні вимоги);
- аналіз ретроспективних та поточних даних, формування прогнозних сценаріїв;
- підвищення керованості технологічними процесами та бізнес-процесами;
- моніторинг і діагностика стану обладнання в нормальних та аварійних режимах, попередження розвитку аварій;
- моніторинг в системах енергоменеджменту.

У сучасних електроенергетичних системах розподілена система керування (енергетичними ресурсами (Distributed Energy Resource Management System, DERMS)) відповідає за взаємодію з «великою» енергосистемою та взаємодіє з системою керування розподілом електроенергії (Distribution Management System, DMS) чи з вдосконаленою системою керування розподілом електроенергії (ADMS) енергетичної компанії, чи системою керування попитом (Demand Response Management Systems, DRMS) споживачів [31, 32]. Власне DRMS, DMS, ADMS та DRMS є розвитком відповідних систем енергетичного менеджменту (Energy Resource Management System, EMS). Функціонування DRMS, DMS, ADMS та DRMS є неможливим без розширених функціональних можливостей моніторингу, особливо з поширеним застосуванням розподілених енергетичних ресурсів (Distributed Energy Resource, DER). Так, вдосконалена система DERMS має виконувати наступні функції: моніторинг стану та роботи генераторів, ліній електропередачі, накопичувачів електроенергії та навантажень (Energy Smart Monitor); розрахунок витрат первинного палива та вартості отриманої/відпущеної електроенергії. На рівні роботи EMS, DMS, DEMS, ADMS та DERMS виникає потреба вдосконалення WAMS з розширенням її функцій, які відобразять різномунітність систем та сфер їхнього застосування.

Нова якість та цінність моніторингу – це необхідність використання кількісної та якісної інформації, її систематизація. Важливими постають нова «інтерпретація» процедури контролю як етапу процесу керування; зміна метрики по окремих параметрах (характеристиках) процесів, її адаптація та коригування, а також розширення та деталізація процедури розпізнавання образу з оцінкою ефективності та результативності процесів, що моніторяться. Сучасний моніторинг в електроенергетиці має стати дійсно інтелектуальним, тобто Smart-моніторингом.

**3. SMART-моніторинг в електроенергетиці.** Проведений аналіз показав, що розвиток поняття «моніторинг» в електроенергетиці можемо представити наступною еволюцією:

- I етап: спостереження навколишнього середовища;
- II етап: спостереження будь-якого об'єкту;
- III етап: спостереження і оцінка стану будь-якого об'єкту;
- IV етап: Smart-моніторинг.

Задля подальшого розгляду характеристик Smart-моніторингу зазначимо, що абревіатура **S.M.A.R.T.** (від англ. *self-monitoring, analysis and reporting technology*) означає «технологія самоконтролю, аналізу та звітності». У назві Smart-моніторинг складова «**Smart**» підкреслює суттєво **розширений функціонал** запропонованих процедур моніторингу. **Smart-моніторинг** в електроенергетиці – інтелектуальний моніторинг – спеціально організоване систематичне автоматичне спостереження за технологічними процесами та бізнес-процесами в електроенергетиці як з аналізом поточної оцінки стану, так і ретроспективним аналізом та прогнозуванням стану.

Платформений підхід формування структури та процедур Smart-моніторингу реалізується під час формування бізнес-моделей спільної діяльності об'єктів (зокрема, енергетичних комірок) на основі цифрових технологій (узгодженість, масштабованість, відкритість), де цифрові платформи відіграють вирішальну роль у створенні нових цінностей.

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, а при оцінюванні стану – виконання **ідентифікації** предметів, явищ, процесів, сигналів, ситуацій в електроенергетичній системі відповідно до розширених вимог функціонування енергетичних ринків, у першу чергу, локальних.

При визначенні відмінних рис Smart-моніторингу важливу роль відіграє розширення поняття

«інформації». У Smart-моніторингу використання інформації визначаються додатковими показниками її якості, зокрема:

- *репрезентативністю*, що визначається правильністю та обґрунтованістю відбору істотних ознак і зв'язків відображуваного явища;
- *змістовністю*, що відображає семантичну ємність, яка дорівнює відношенню кількості семантичної інформації у повідомленні до обсягу оброблюваних даних;
- *достатністю (повнотою)*, що визначається мінімальним набором показників для прийняття правильного рішення; поняття повноти інформації пов'язано з її смисловим змістом (семантикою) і споживчими властивостями (прагматикою);
- *стійкістю*, що відображає її здатність до збереження точності у разі зміни вихідних даних.

На відміну від традиційного моніторингу (запис, порівняння, звітування) Smart-моніторинг наділено *новими функціями*: аналізування (наприклад, співвіднесення споживання енергії з вимірним відпуском обсягів генерації електроенергії); встановлення цілей (зокрема, встановлення цілей для зниження або контролю генерації та споживання енергії); контролінгу (у розумінні процесу контролінгу для інформаційних систем – цілеспрямованого підбору та обробки інформації через централізацію та координацію). Має здійснюватися ідентифікація даних за ознакою «корисності» як міри задоволення потреби системи щодо якості параметрів електроенергії та якості енергопостачання.

Smart-моніторинг розглядається як цільовий (ціленаправлений) з визначенням цілей (цілепокладання) моніторинг (**Monitoring & Target, M&T**) – в залежності від сфери застосування, зокрема, запропоновано здійснювати оцінку поточної економічної ефективності елементів системи.

Введення понять «еталонний тариф», «профілі» генерації та споживання електроенергії, як опорних характеристик роботи системи, розширює можливості адаптації моніторингу до зміни параметрів та режимів функціонування системи.

Можемо виділити три рівня здійснення Smart-моніторингу:

- *перший рівень* – це моніторинг у реальному часі параметрів електромережі – аналіз якості параметрів електричної енергії, швидке інформування щодо наявності невідповідностей у системі;
- *другий рівень* – здійснюється моніторинг якості енергопостачання, відповідність стандартам всіх параметрів електромережі, контролюється синхронізація та обмін електроенергією між елементами системи;
- *третій рівень* – на основі отриманих даних формується інформація для взаємодії об'єктів (наприклад, участі на ринках електроенергії. Тут нова «якість» інформації створює нову «кількість» інформації у взаємодії об'єктів. Виконується загальна оцінка стану та вирішуються задачі прогнозування.

Узагальнені рівні застосування Smart-моніторингу наступні.

*Базовий рівень* (локальна електроенергетична система (ЛЕС)): індикація; прийняття оперативних рішень; розв'язання оптимізаційних процедур.

*Верхній рівень* (системи передачі та розподілу електроенергії; локальний енергоринок): загальносистемні питання щодо функціонування системи вищого рівня, зокрема, систем енергетичного менеджменту (СЕМ).

*Нижній рівень* (підсистеми виділеної ЛЕС, навантаження, окремі генеруючі потужності): керування.

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)). Постає важлива задача організації ефективної взаємодії WAMS та WAMPAC (наприклад, WAMS «РЕГІНА-Ч») з системами Smart-моніторингу на рівні середньої напруги.

На горизонтальному (базовому) рівні Smart-моніторинг взаємодіє з такими системами (або є їх елементом) як EMS, DMS, DEMS, ADMS та DERMS. Операційними складовими нижнього рівня для Smart-моніторингу є, зокрема, інтелектуальні електронні пристрої (Intelligent Electronic Devices, IED) та Smart лічильники.

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

Smart-моніторинг з точки зору вимог функцій інтелектуальної системи (ІС, англ. Intelligent System) – це апаратно-програмна система, здатна вирішувати завдання, які традиційно вважаються творчими, що належать конкретній предметній області, знання про яку зберігаються в пам'яті такої системи; включає три основні блоки – базу знань, механізм виведення рішень та інтелектуальний інтерфейс.

Сфери застосування Smart моніторингу: оцінка стану протікання процесів та стану обладнання генераторів та навантаження; динамічне ціноутворення, тарифна політика, динамічна оцінка стану використання первинного палива та/чи поточних витрат генераторів; економічна ефективність роботи генераторів та навантажень; екологічна прийнятність, оцінка обсягів викидів CO<sub>2</sub>; оптимальна робота системи керування; керування попиту (Demand Side Management, DSM), керування максимальним енергоспоживанням; прогноз розвитку системи; оцінка взаємоперетоків електроенергії; стійкість системи до збурень; прогноз метрологічних показників, потенційних можливостей генерування ВДЕ (ВЕС, СЕС тощо); оцінка поточних витрат; стану електромагнітної сумісності елементів системи, роботи накопичувачів електроенергії; ретроспективний аналіз даних; моніторинг стану (конфігурації) системи; робота на локальних ринках електроенергії, формування тарифної політики з врахуванням цінових імпульсів.

Базовими складовими методології Smart-моніторингу є його основні функції:

- ранжування образів;
- ранжування факторів впливу;
- оцінка дольової участі, зокрема, з використанням процедур неінтрузивного моніторингу (неінтрузивність (деагрегація) даних, відкритість);
- оптимізаційні процедури для систем генерації та споживання електроенергії;
- наявність прогностичних функцій;
- збір та оцінка техніко-економічних показників функціонування елементів системи та системи в цілому;
- стійкість до збурень різної «природи»;
- забезпечення конфіденційності даних;
- використання поняття «еталонний тариф», «еталонні» профілі генерації та споживання електроенергії;
- ієрархічність завдань.

Важливе значення надається самоналаштуванню (самонавчанню) – здатності оптимізувати власні внутрішні параметри роботи, щоб оптимізувати виконання цільової функції, як правило, це максимізація ефективності або мінімізація «помилки».

Як приклад, наведемо основні операції Smart-моніторингу для оцінки економічних та технічних показників ЛЕС.

1. Задання початкових умов (встановлення критеріїв на якість електричної енергії, завантаження графіків залежностей витрат джерел живлення які знаходяться в системі, еталонні тарифи, які використовуються, часові інтервали вимірювань).
2. Вимірювання. Давачі у вузлах ЛЕС записують показники споживання/виробництва електроенергії, інші електричні та неелектричні параметри.
3. Оцінка виробленої енергії та відповідних «пропозицій». Проводиться оцінка виробленої енергії кожного окремого джерела живлення, який входить до ЛЕС, у порівнянні з графіками залежностей витрат від генерованої потужності, з урахуванням часу доби, пори року.
4. Розрахунок сумарних витрати на генерацію електроенергії.
5. Оцінка споживання електроенергії навантаженнями.
6. Оцінка балансу потужності. Виконується порівняння генерованої потужності та потужності споживачів. У разі зростання виробництва електричної енергії, система Smart-моніторингу повинна перевірити, чи відповідають встановлені критерії якості електроенергії. В разі невідповідності стандартизованим вимогам якості електроенергії (енергопостачання) при необхідності нараховуються штрафи постачальнику. Якщо довгострокова невідповідність стандартам якості, відключення постачальника.
7. Оцінка дієвості механізмів керування попиту.
8. Оцінка відповідності всіх технічних параметрів нормам та інформування систем



керування ЛЕС, агрегаторів та постачальників.

9. Розрахунок тарифу для участі на локальних ринках.

4. Функціональна структура Smart-моніторингу показана на рис. 1.

Охарактеризуємо типові ознаки (відмінності) Smart-моніторингу (див. рис. 1) по відношенню

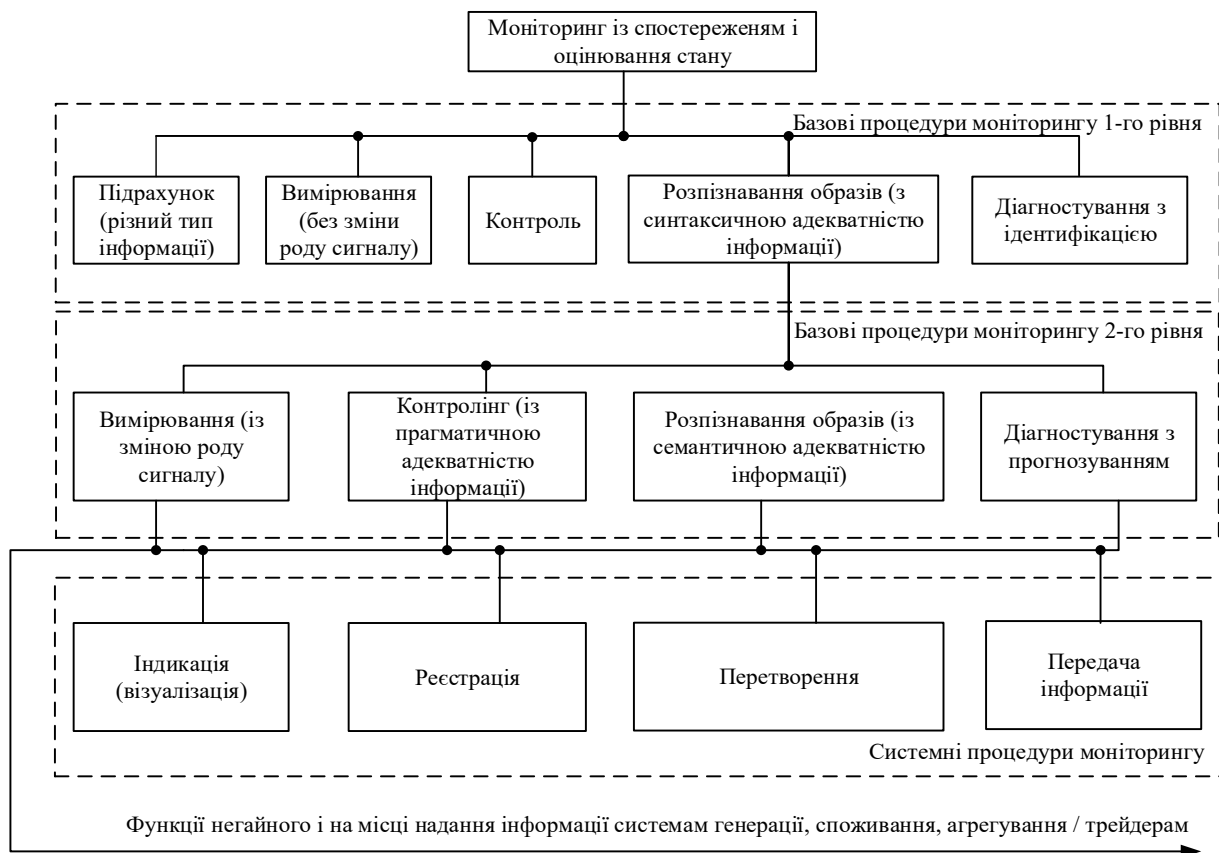


Рис. 1

до систем WAMS. Зазначимо, що принципи побудови та реалізації Smart-моніторингу з поєднанням технічної (технологічної) та економічної ефективності. Адекватність інформації Smart-моніторингу оцінюється у трьох формах: синтаксичної, семантичної та прагматичної:

– **синтаксична** – відображає формально-структурні характеристики інформації і не зачіпає її смислового змісту;

– **семантична (смилова)** – визначає ступінь відповідності образу об'єкта і самого об'єкта, передбачає врахування змісту інформації;

– **прагматична (споживча) адекватність** відображає ставлення до інформації її споживача, відповідність інформації меті керування, яка на її основі реалізується.

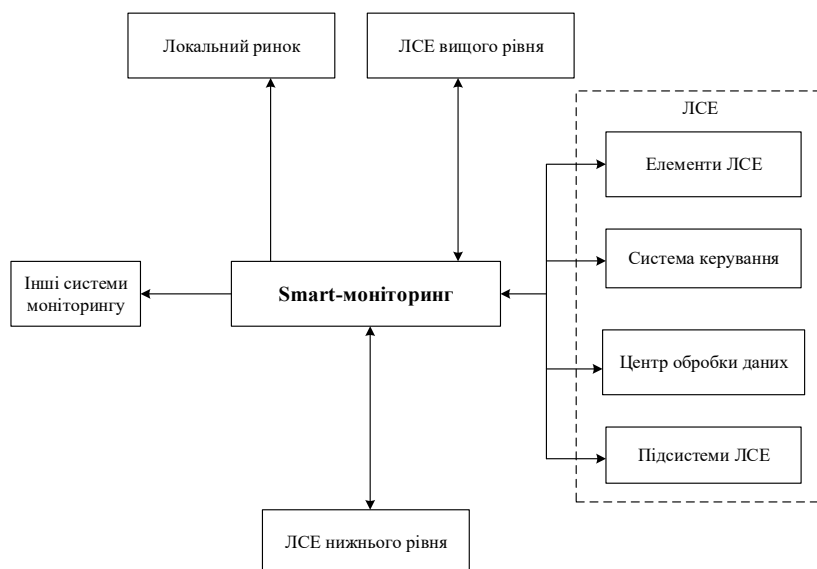


Рис. 2

Структура Smart-моніторингу як відкрита система наведена на рис. 2.

**Базові процедури Smart-моніторингу 1-го рівня:**

- **Лічба/підрахунок.** Розширюються обсяги інформації. Різноманітний тип технічної та економічної інформації щодо функціонування системи. Зв'язаний термін

**перерахування** визначає унікальність ідентифікації елементів скінченної (комбінаторної) множини або нескінченної множини шляхом присвоєння номера кожному елементу.

- **Вимірювання (без зміни роду сигналу).** Вимірювання розглядається як пізнавальний процес визначення числового значення вимірюваної величини, а також дія, спрямована на знаходження значення фізичної величини за рахунок: прямого вимірювання (вимірювання однієї величини, значення якої знаходять безпосередньо без перетворення її роду); абсолютного вимірювання (вимірювання, яке засноване на прямому вимірюванні однієї або декількох основних величин) чи відносного вимірювання (вимірювання відношення величини до іншої однорідної величини).

- **Контроль.** Контроль (фр. *contrôle* від *contrerôle* – подвійний список): перевірка, облік, спостереження за чим-небудь; заключна функція керування.

Під процесом контролю ми будемо розуміти систему спостереження і перевірки процесу функціонування та фактичного стану керованого об'єкта, що забезпечує досягнення системою поставленої мети шляхом порівняння фактичного стану системи з бажаним (як якісним, так і кількісним станом). Адекватне реагування на нову ситуацію для досягнення узгодженості й синхронізації функціонування об'єктів системи.

Важливим є переважно контроль якості електроенергії/енергопостачання). При цьому показники ефективності застосовуються як функції узагальнених характеристик елементів та системи в цілому.

- **Розпізнавання образів (з синтаксичною адекватністю інформації).** Поєднання базових процедур контролю та розпізнавання образів. Враховується своєрідність і різноманітність явищ, необхідність забезпечення безперервності процесів, двостороннього інтелектуального інтегрального взаємозв'язку з системами вищого рівня.

Задача розпізнавання зводиться до порівняння за ознаками розпізнавання певного зразкового образу з даним об'єктом і констатації, чи відноситься цей об'єкт до даного образу. Задля вирішення цього питання використовують певні технологічні та економічні критерії відповідності, які служать мірами розбіжності між розпізнаним і зразковим образами.

Розпізнавання образів – поєднання методів класифікації та ідентифікації предметів, явищ, процесів, сигналів, ситуацій і т.п. об'єктів, які характеризуються скінченим набором деяких властивостей і ознак.

Розпізнавання образів розглядається як важлива процедура при реалізації задачі аналізу. Як задача віднесення вихідних даних до певного класу за допомогою виділення (*англ. feature extraction*) істотних ознак, що характеризують ці дані, із загальної маси несуттєвих даних. Важливого значення набуває забезпечення інформативності ознак.

- **Діагностування з ідентифікацією.** Діагностика технічного та технологічного стану технічних об'єктів ґрунтується на розпізнаванні образів з використанням операцій контролю і вимірювання. Проведення обстеження об'єктів системи на предмет їх зносу, необхідності ремонту, можливості подальшої експлуатації тощо.

#### **Базові процедури Smart-моніторингу 2-го рівня.**

- **Вимірювання (із зміною роду сигналу).** У цій процедурі здійснюється вимірювальне перетворення (наприклад, за рахунок інтелектуальних датчиків): непряме вимірювання – вимірювання, в якому значення однієї чи декількох вимірюваних величин знаходять після перетворення роду величини; опосередковане вимірювання – непряме вимірювання однієї величини з перетворенням її роду. Застосовуються як сукупні, так і сумісні вимірювання.

Порівняння з «еталонним тарифом» при формуванні квазіоптимального тарифного плану, наприклад, за квадратичною нормою, дозволить оцінювати при Smart-моніторингу зміну тарифу не за інтервалом часу, а за поточними значеннями витрат палива і потужності генерації та споживання (зокрема, оцінки активної та реактивної потужності, врахування втрат в електричних мережах, профілів графіків навантажень); здійснювати розрахунок миттєвої вартості як інтегральної (усередненої) миттєвої характеристики вартості електроенергії на заданому «малому» інтервалі часу.

- **Контролінг (із прагматичною адекватністю інформації).** Контролінг (*англ. Controlling*) розглядається як міжфункціональний напрям формування управлінських заходів; виявлення подій, що визначають керуючі впливи; управління «прибутком» системи в широкому сенсі; аналіз і визначення причин відхилень фактичних значень показників від планових; прийняття на цій основі управлінських рішень задля мінімізації відхилень.

Концепція контролінгу націлює на формування і досягнення довготермінових цілей, з яких

впливають і формуються тактичні, які скоординовано спрямовуються на вирішення поставлених задач. Важливе значення приділяється проблемі забезпечення керованості та спостережуваності – здатності системи підлягати керуванню чи керуванні станом системи та вироблення рекомендацій (керуючих) з усунення або ослаблення можливих негативних змін.

• **Розпізнавання образів (із семантичною адекватністю інформації).** Процедура передбачає віднесення вихідних даних до певного класу за допомогою виділення істотних ознак, що характеризують ці дані. Розпізнавання образів (об'єктів, сигналів, ситуацій, явищ або процесів) – завдання ідентифікації об'єкта з визначенням його властивостей за його ознаками із оцінкою семантичної адекватності інформації. При цьому *образ* розглядається як класифікаційне угруповання в системі класифікації, що об'єднує (виділяє) певну групу об'єктів за деякою ознакою, а *ознака* – особливість предмета або явища, яка визначає подібність свого носія до інших об'єктів пізнання або відмінність від них, властивість.

Розпізнавання образів із врахуванням змісту інформації – це не тільки кластерний аналіз (кластеризація), але й формування окремих метрик, що забезпечує визначення керуючих впливів; оцінка технічної (технологічної) ефективності, оцінка економічної ефективності; формування «оптимального» (квазіоптимального) образу.

• **Діагностування з прогнозуванням** – це діагностика з прогнозом зміни стану, виявлення можливих негативних змін при умовах прагматичної (споживчої) адекватності. Суттєва роль приділяється використанню заданого набору інтелектуальних датчиків і процесу інтелектуального аналізу даних та самонавчання, здатності до самодіагностики.

Формуються діагностичні тести (діагностичні маркери) як сукупності контрольних перевірок, що є достатньою для визначення стану об'єкта діагностики. Підвищення ефективності діагностичних тестів досягається з урахуванням побудови системи, діагностики поточного стану та прогнозування розвитку подій. Фактично під час діагностики здійснюється інтелектуальний аналіз даних, який фокусується на моделюванні та розкритті даних, пов'язаних із вилученням знань з масивів (баз) даних, а не на їх описі.

#### *Системні процедури моніторингу.*

• **Індикація (візуалізація).** Індикація (лат. in-dico – показувати) – методи та прийоми спостереження, фіксації, контролю, характеристики та оцінки стану та стадій розвитку процесів, об'єктів та системи в цілому для встановлення та контролю залежностей від зміни умов у часі, статистики кількісного та якісного порядку, зіставлення з нормою. Індикація в Smart-моніторингу – це визначення, вимірювання, записування різних показників як об'єктів, так і системи в цілому. Візуалізація інформації розглядається як інтерактивне вивчення візуального представлення отриманих даних з метою їх пізнання.

• **Реєстрація.** Здійснюється реєстрація енергетичних, технічних та економічних (тарифів, вартості) характеристик і показників, їх облік, за необхідності врахування профілів генерації та споживання, зокрема еталонних.

• **Перетворення.** Відбувається перетворення роду сигналів, які несуть інформацію (зміна способу подання тієї самої інформації за допомогою іншого виду без змінення початкового повідомлення).

• **Передача інформації.** Здійснюється за допомогою повідомлень – послідовності сигналів в часі або просторі (часові або просторові повідомлення). Організується ієрархічне «середовище передачі» з будь-якою глибиною вкладеності. Як «носії» використовуються хвильово-польові об'єкти фізичної природи. Носіями можуть бути за певних умов і самі передані «інформаційні об'єкти» (віртуальні носії). Значна увага має приділятися кодова захищеності (інформаційній безпеці), здійсненню двостороннього обміну інформацією, забезпеченню ефективної взаємодії в єдиному ієрархічному інформаційному просторі функціонування об'єкта.

У процесі побудови інформаційної система Smart-моніторингу особливої ваги набуває функція негайного і на місці надання інформації системам генерації, споживання, агрегування з оцінкою умов та способів «подальшого» використання одержаної інформації з врахуванням мультиагентної взаємодії елементів системи.

Функціональні можливості Smart-моніторингу суттєво розширюється з використанням сучасних засобів АМІ (Advanced Metering Infrastructure), ІКТ, ІЕД, Smart лічильників, оскільки високоточні та гнучкі сенсорні системи стають критично важливими задля прискорення розгортання мікромереж і широкого проникнення ВДЕ. Нові технології Smart-моніторингу мають забезпечити

ефективну оцінку функціонування системи, створення потоків даних (із розосередженою та багаторівневою їх обробкою) в режимі реального часу, за допомогою яких можна буде відстежувати техніко-економічну ефективність функціонування, динаміку процесів в системі, використовувати оперування з великими даними (Big Data) в рамках механізму «Дані як послуга» (Data as a Service, DaaS), зокрема в рамках механізму для забезпечення гнучкості та балансування потоків енергії в системі. При цьому основними вимогами до побудови технічних і програмних засобів є: модульний принцип, відкритість архітектури, відокремленість виконання функцій контролю та керування об'єктом, виконання вимог щодо забезпечення кібербезпеки.

#### **Висновки.**

1. Розроблені теоретико-методологічні основи створення Smart-моніторингової системи як багатокомпонентного, багатовимірного, динамічного інформаційно-аналітичного комплексу, що є основою оптимізації техніко-економічних показників електроенергетичних систем середньої та низької напруги, поєднуючи окремі компоненти моніторингу в загальну методологію побудови Smart-моніторингу при оптимізації функціонування систем на локальних енергетичних ринках.

2. В рамках розвитку теорії моніторингу електроенергетичних систем запропоновано нову систему принципів та процедур, покладених в основу побудови систем Smart-моніторингу сучасних інтелектуальних децентралізованих електроенергетичних систем, зокрема, запропонована розширена класифікація складових Smart-моніторингу за функціональною ознакою з поділом на типи, базові і системні процедури та операції системи моніторингу з визначенням їхнього взаємозв'язку.

3. Здійснення комплексного систематичного автоматичного спостереження за технологічними процесами та бізнес-процесами в електроенергетиці, як основи побудови апаратних і програмних засобів для низки технологічних платформ (діагностування, аудиту, керування, диспетчерування, енергоменеджменту, формування енергетичних ринків майбутнього), дозволяє забезпечити сумісний моніторинг економічних та технічних (енергетичних) показників роботи системи при динамічній тарифікації генерації та споживання електроенергії.

4. Впровадження систем Smart-моніторингу сприятиме оптимізації енергетичних процесів в електроенергетичних системах, побудові децентралізованих систем енергозабезпечення, підвищенню їхньої енергоефективності, зокрема, розширенню стратегії технічного обслуговування на основі оцінки поточного стану об'єктів системи; поточному управлінню активами підприємств; розвитку активів, управлінню бізнес-процесами та формуванню комплексної геоінформаційної системи енерго-підприємств з використанням хмарних технологій; інформаційній інтеграції енергопідприємств та інтелектуальних електромереж і локальних електроенергетичних систем; керуванню мобільними активами (наприклад, системами заряджання електромобілів).

*Роботу виконано в межах наукової теми «Моделі та засоби запобігання погіршення якості електропостачання промислових споживачів (Монітор-4)» (КПКВК 6541030)*

1. Кириленко О.В. Заходи та засоби перетворення енергетики України на інтелектуальну екологічно безпечну систему. *Вісник Національної академії наук України*. 2022. № 3. С. 18–23.

2. US Department of Energy. Smart Grid system report, July 2009. URL: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2009%20Smart%20Grid%20System%20Report%20Appendix%20A%20%26%20B.pdf> (Available at 15.05.2024)

3. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими: За заг. ред. акад. НАН України О.В. Кириленка. К.: Ін-т електродинаміки НАН України. 2016. 400 с.

4. NIST URL: [https://www.nist.gov/system/files/documents/public\\_affairs/releases/smartgrid\\_interoperability.final.pdf](https://www.nist.gov/system/files/documents/public_affairs/releases/smartgrid_interoperability.final.pdf) (Available at 15.05.2024)

5. Кириленко О.В., Денисюк С.П., Блінов І.В. Цифрова трансформація: сучасні тенденції та завдання. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2023. № 65. С. 5–14. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.65.005>

6. Yadoshchuk V. Digital Transformation in The Energy Industry: Overview and Tips. •Content Writer. Updated April 29, 2024. URL: <https://waverleysoftware.com/blog/digital-transformation-in-the-energy-industry/> (Available at 15.05.2024)

7. Navigant research «Transactive Energy Markets», Navigant, 2018.

8. GridWise Architecture Council's Transactive Energy Framework. URL: [https://gridwiseac.org/pdfs/te\\_framework\\_report\\_pnnl-22946.pdf](https://gridwiseac.org/pdfs/te_framework_report_pnnl-22946.pdf) (Available at 15.05.2024)

9. Blinov I., Trach I., Parus Y., Khomenko V., Kuchansky V., Shkarupylo V. Evaluation of The Efficiency of The Use of Electricity Storage Systems in The Balancing Group and The Small Distribution System. 2021 IEEE 2nd

- KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Keiv, Ukraine, 2021. Pp. 262-265. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9569981>
10. Кириленко О.В., Блінов І.В., Танкевич С.Є. Smart Grid та організація інформаційного обміну в електроенергетичних системах. *Техн.електродинаміка*. 2012. № 3. С. 47–48.
11. Navigant research «Energy Cloud 4.0: Capturing Value through Disruptive Energy Platforms», Navigant, 2018 г.
12. Market Solutions to our Energy Needs. URL: <https://renewableplus.blogspot.com/2020/04/success-principles-for-energy-iotcloud.html> (Available at 15.05.2024)
13. Renewable energy world. URL: <https://www.renewableenergyworld.com/storage/der/the-next-phase-of-the-energy-transformation-platform-thinking/#gref> (Available at 15.05.2024)
14. What is Grid Orchestration and how does it differ from DERMS? URL: <https://www.camus.energy/gridorchestration> (Available at 15.05.2024)
15. Digitalising our Energy System for Net Zero: Strategy and Action Plan 2021. URL: <https://www.gov.uk/government/publications/digitalising-our-energy-system-for-net-zero-strategy-and-action-plan> (Available at 15.05.2024)
16. Being a world-class energy services provider. URL: <https://clouglobal.com/neural-networks-for-smart-meters-and-smart-grids/> (Available at 15.05.2024)
17. Кириленко О.В., Жуйков В.Я., Денисюк С.П. Використання динамічної тарифікації для оптимізації техніко-економічних показників Microgrid на локальних ринках електроенергії. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 3. С. 37–48. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022/03/037>
18. Paraskevagos T. Sensor Monitoring Device. US Patent 3842208A. URL: <https://patents.google.com/patent/US3842208A/en> (Available at 15.05.2024)
19. Bushman W Thomas, Paraskevagos Theodoros G. Apparatus and Method for Remote Sensor Monitoring, Metering and Control. US Patent 4,241,237. URL: <https://portal.unifiedpatents.com/patents/patent/US-4241237-A> (Available at 15.05.2024)
20. Екологічна енциклопедія. К.: ТОВ «Центр екологічної освіти та інформації», 2007. Т. 2: Є-Н. 416 с.
21. Півняк Г.Г., Бусигін Б.С., Дівізінюк М.М., Азаренко О.В., Коротенко Г.М., Коротенко Л.М. Тлумачний словник з інформатики. Дніпропетровськ. 2010. 600 с.
22. Великий тлумачний словник сучасної української мови (з дод. і допов.). К.: ВТФ Перун. 2005. 1728 с.
23. Стогній Б.С., Сопель М.Ф. Основи моніторингу в електроенергетиці. Про поняття моніторингу. *Техн. електродинаміка*. 2013. № 1. С. 62–69.
24. Smart energy monitoring together with BI. URL: <https://www2.deloitte.com/cz/en/pages/strategy-operations/articles/smart-energy-monitoring-together-with-bi.html> (Available at 15.05.2024)
25. 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> .
26. Blinov, I., Zaitsev, I.O., Kuchansky, V.V. Problems, Methods and Means of Monitoring Power Losses in Overhead Transmission Lines. Systems, Decision and Control in Energy I. Studies in Systems, Decision and Control. 2020. Vol 298. Springer, Cham. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-48583-2\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-48583-2_8)
27. 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>.
28. Terzija V., Valverde G., Cai Deyu, Regulski P., Madani V., Fitch J., Skok Srdjan, Begovic M.M., Phadke A. Wide-Area Monitoring, Protection, and Control of Future Electric Power Networks. *Proceedings of the IEEE*. 2011. Vol. 99. Pp. 80–93. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2060450> .
29. Fang Liu, Jin Tong, Jian Mao, Robert Bohn, John Messina, Lee Badger and Dawn Leaf. NIST Cloud Computing Reference Architecture. Recommendations of the National Institute of Standards and Technology. URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication500-292.pdf> (Available at 15.05.2024)
30. Інформаційно-діагностичний комплекс «Регіна» URL: <https://www.regina.org.ua> (Available at 15.05.2024)
31. Grid Interactive Microgrid Controllers and the Management of Aggregated Distributed Energy Resources (DER). EPRI 2015. URL: <https://www.epri.com/research/products/3002007067> (Available at 15.05.2024)
32. Денисюк С.П., Стржелецьки Р. Формування складових інтелектуальної платформи керування енергетичними системами та мережами. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2019. № 3. С. 7–22.

## SMART-MONITORING OF ELECTRICAL POWER SYSTEMS

O. Kyrylenko<sup>1</sup>, B. Stognii<sup>1</sup>, S. Denysiuk<sup>2</sup>, M. Sopol<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
56, Beresteyskyi Ave., Kyiv, 03057, Ukraine.

<sup>2</sup> National Technical University of Ukraine «Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»  
37, Beresteyskyi Ave., Kyiv, 03056, Ukraine,  
e-mail: [spdens@ukr.net](mailto:spdens@ukr.net)

*It is shown that the transformation of the energy sector based on the construction of new architectures of energy systems requires a joint consideration of three layers of two-way energy information exchange: economic, information-management, and physical (energy), and the functioning of modern electric power systems requires the application of process monitoring with enhanced functionality. For such intelligent monitoring, defined as Smart-monitoring, the first and second level monitoring procedures are characterized, in particular, taking into account measurement with a change in signal type, operation with information with syntactic, semantic and pragmatic adequacy, diagnosis with identification and forecasting. It is shown that Smart-monitoring in electric power at the level of medium and low voltages (distribution and consumption systems) should be formed as a technological platform for diagnosis, audit, control, dispatching, energy management of electric power systems, formation of modern energy markets. References 32, figures 2.*

**Keywords:** electric power system, intelligent monitoring, energy information exchange, monitoring procedures, technical and economic indicators.

1. Kyrylenko O. Measures and Ways of Transforming Ukraine's Energy Sector into an Intelligent Environmentally Friendly System. *Visnyk Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2022. No 3. PP. 18-23. (Ukr)
2. US Department of Energy. Smart Grid system report, July 2009. URL: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2009%20Smart%20Grid%20System%20Report%20Appendix%20A%20%26%20B.pdf> (Available at 15.05.2024)
3. Intelligent electrical networks: elements and modes. Kyiv: Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine. 2016. 400 p. (Ukr)
4. NIST URL: [https://www.nist.gov/system/files/documents/public\\_affairs/releases/smartgrid\\_interoperability\\_final.pdf](https://www.nist.gov/system/files/documents/public_affairs/releases/smartgrid_interoperability_final.pdf) (Available at 15.05.2024)
5. Kyrylenko O., Denysiuk S., Blinov I. Digital transformation of the energy industry: current trends and task. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2022. No 63. Pp. 5–12. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.63.005> (Ukr)
6. Yadoshchuk V. Digital Transformation in The Energy Industry: Overview and Tips. •Content Writer. Updated April 29, 2024. URL: (Available at 15.05.2024)
7. Navigant research «Transactive Energy Markets», Navigant, 2018.
8. GridWise Architecture Council's Transactive Energy Framework. URL: [https://gridwiseac.org/pdfs/te\\_framework\\_report\\_pnnl-22946.pdf](https://gridwiseac.org/pdfs/te_framework_report_pnnl-22946.pdf) (Available at 15.05.2024)
9. Blinov I., Trach I., Parus Y., Khomenko V., Kuchansky V., Shkarupylo V. Evaluation of The Efficiency of The Use of Electricity Storage Systems in The Balancing Group and The Small Distribution System. 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Keiv, Ukraine, 2021. Pp. 262-265. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9569981>
10. Kyrylenko O., Blinov I., Tankevych S. Smart grid and organization of information exchange in electric power systems. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2012. No 3. Pp. 44–54. (Ukr)
11. Navigant research «Energy Cloud 4.0: Capturing Value through Disruptive Energy Platforms», Navigant, 2018 г.
12. Market Solutions to our Energy Needs. URL: <https://renewableplus.blogspot.com/2020/04/success-principles-for-energy-iotcloud.html> (Available at 15.05.2024)
13. Renewable energy world. URL: <https://www.renewableenergyworld.com/storage/der/the-next-phase-of-the-energy-transformation-platform-thinking/#gref> (Available at 15.05.2024)
14. What is Grid Orchestration and how does it differ from DERMS? URL: <https://www.camus.energy/gridorchestration> (Available at 15.05.2024)
15. Digitalising our Energy System for Net Zero: Strategy and Action Plan 2021. URL: <https://www.gov.uk/government/publications/digitalising-our-energy-system-for-net-zero-strategy-and-action-plan> (Available at 15.05.2024)
16. Being a world-class energy services provider. URL: <https://clouglobal.com/neural-networks-for-smart-meters-and-smart-grids/> (Available at 15.05.2024)
17. Kyrylenko O., Zhuikov V., Denysiuk S. Use of dynamic tariffication for optimization Microgrid technical and economic indicators in local electricity markets. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2022. No. 3, May-June. Pp. 37–48.

DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.03.037> (Ukr)

18. Paraskevakos T. Sensor Monitoring Device. US Patent 3842208A. URL: <https://patents.google.com/patent/US3842208A/en> (Available at 15.05.2024)
19. Bushman W Thomas, Paraskevakos Theodoros G. Apparatus and Method for Remote Sensor Monitoring, Metering and Control. US Patent 4,241,237. URL: <https://portal.unifiedpatents.com/patents/patent/US-4241237-A> (Available at 15.05.2024)
20. Ecological encyclopedia. Kyiv: LLC Center of Environmental Education and Information, 2007. Vol. 2: E-N. 416 p. (Ukr)
21. Pivniak G., Busygin B., Diviziniuk M., Azarenko O., Korotenko G., Korotenko L. Computer science glossary. Dnipropetrovsk, 2010. 600 p. (Ukr)
22. A large explanatory dictionary of the modern Ukrainian language (with appendices and additions) / Compiler and editor-in-chief V. T. Busel. Kyiv: VTF Perun, 2005. 1728 p. (Ukr)
23. Stognii B., Sopol M. Fundamentals of monitoring process in electroenergy. About the concept of monitoring process. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2013. No. 1. Pp. 62–69. (Ukr)
24. Smart energy monitoring together with BI. URL: <https://www2.deloitte.com/cz/en/pages/strategy-operations/articles/smart-energy-monitoring-together-with-bi.html> (Available at 15.05.2024)
25. 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> .
26. Blinov, I., Zaitsev, I.O., Kuchansky, V.V. Problems, Methods and Means of Monitoring Power Losses in Overhead Transmission Lines. *Systems, Decision and Control in Energy I. Studies in Systems, Decision and Control*. 2020. Vol 298. Springer, Cham. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-48583-2\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-48583-2_8)
27. 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>.
28. Terzija V., Valverde G., Cai Deyu, Regulski P., Madani V., Fitch J., Skok Srdjan, Begovic M.M., Phadke A. Wide-Area Monitoring, Protection, and Control of Future Electric Power Networks. *Proceedings of the IEEE*. 2011. Vol. 99. Pp. 80–93. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2060450> .
29. Fang Liu, Jin Tong, Jian Mao, Robert Bohn, John Messina, Lee Badger and Dawn Leaf. NIST Cloud Computing Reference Architecture. Recommendations of the National Institute of Standards and Technology. URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication500-292.pdf> (Available at 15.05.2024)
30. Інформаційно-діагностичний комплекс «Регіна» URL: <https://www.regina.org.ua> (Available at 15.05.2024)
31. Grid Interactive Microgrid Controllers and the Management of Aggregated Distributed Energy Resources (DER). EPRI 2015. URL: <https://www.epri.com/research/products/3002007067> (Available at 15.05.2024)
32. Denysiuk S.P., Strzelecki R. Formation of components of smart platform for the management of power systems and networks. *Energy: economics, technologies, ecology*. 2019. No. 3. Pp. 7–22. (Ukr)

Надійшла 08.07.2024  
Остаточний варіант 01.08.2024