

Олександр Сергійович Сердюк,*канд. екон. наук, старший дослідник*

Інститут економіки промисловості НАН України,

вул. Марії Капніст, 2, м. Київ, 03057, Україна

E-mail: oleksandrserdyk@ukr.net<https://orcid.org/0000-0003-3049-3144>;**Богдан Ярославович Андрієнко,***аспірант*

Інститут економіки промисловості НАН України,

вул. Марії Капніст, 2, м. Київ, 03057, Україна

E-mail: bogdan_andrienko@ukr.net<https://orcid.org/0009-0009-1016-3122>

КОНЦЕПТУАЛЬНЕ БАЧЕННЯ СМАРТ-ЕНЕРГОСИСТЕМИ

У сучасних наукових і політичних колах смарт-енергосистема розглядається як складова Індустрії 4.0, оскільки в широкому розумінні вона має на меті підвищення ефективності виробництва шляхом упровадження технологій штучного інтелекту. Однак наразі не існує єдиного усталеного бачення щодо поняття «смарт-енергосистема». Як правило, її розглядають через призму окремих, найчастіше не пов'язаних між собою технологічних процесів, що ускладнює розроблення несуперечливих теоретичних положень і практичних рекомендацій щодо розвитку Індустрії 4.0.

Метою статті є систематизація наукових поглядів на окремі аспекти застосування цифрових технологій у сфері енергетики та розроблення цілісного концептуального бачення смарт-енергосистеми.

Визначено ключові елементи смарт-енергосистеми: смарт-енергогенерація – комплекс заходів цифровізації системи управління енергогенеруючими установками, спрямований на підвищення питомого виробництва електроенергії (кВт·год. на одиницю палива), а також коригування навантаження в межах вузлів виробництва електроенергії з відновлюваних джерел із метою стабілізації енергетичного потоку; смарт-синхронізація – розподілення навантаження серед секторів енергетики на засадах інтелектуального оцінювання потреб і спроможностей системи; смарт-дистрибуція – оптимізація роботи розподільчих мереж на основі аналізу даних щодо часових і просторових тенденцій у системі передачі електроенергії; смарт-споживання – технологічні заходи, що створюють умови для економного споживання електроенергії.

Обґрунтовано цілісне бачення концепції «смарт-енергосистема», яка передбачає комплексну реалізацію заходів у рамках мікроконцепцій смарт-енергогенерації, смарт-синхронізації, смарт-дистрибуції та смарт-споживання. Аргументовано, що імплементація концепції «смарт-енергосистема» забезпечуватиме синергетичний ефект економного споживання енергетичних ресурсів.

Ключові слова: смарт-енергосистема, смарт-енергогенерація, смарт-синхронізація, смарт-дистрибуція, смарт-споживання, цифровізація, енергетика.

JEL: L 16, L 23, L 60, L 69, L 94

Поняття «смарт-енергосистема» є багатозначним та, як правило, характеризує окремі аспекти застосування цифрових технологій в енергетиці. Серед дослідників та

організацій не існує одностайної думки щодо цього поняття. Частина з них ототожнюють смарт-енергосистеми з інтелектуальною мережею (Smart Grid), акцентуючи



© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2024

увагу на дистрибутивних функціях системи (Tuballa, Abundo, 2016; Чернецька, Замулко, 2020; European SmartGrids Technology Platform, 2006; Huge test, 2011; NIST, 2010). Інші пов'язують смартизацію енергосистем з оптимізацією процесів енергогенерації з використанням цифрових технологій (Суходоля, 2022; Midgley, 2024; Innovative technologies, 2024). У законодавстві України не існує поняття «смарт-енергосистема», проте використовується термін «розумні мережі», який у рамках Закону України «Про енергетичну ефективність» визначено як «електричні мережі, що об'єднують в економічно доцільний спосіб учасників ринку електричної енергії та дозволяють керувати передачею енергії та її споживанням з метою підвищення надійності електропостачання та безвідмовності роботи енергетичної системи» (Про енергетичну ефективність, 2022).

Метою статті є систематизація наукових поглядів на окремі аспекти застосування цифрових технологій у сфері енергетики та розроблення цілісного концептуального бачення смарт-енергосистеми.

Для розкриття теоретичного змісту поняття «смарт-енергосистема» слід звернутися до трактувань загальноновизнаних термінів, з яких воно складається. Відповідно до ДСТУ 3440-96 «Системи енергетичні. Терміни та визначення» енергетична система – це «сукупність електростанцій, електричних та теплових мереж, з'єднаних між собою і пов'язаних загальним режимом у безперервному процесі виробництва, перетворення й розподілення електроенергії та тепла за умови загального керування цим процесом» (ДСТУ, 1996). Інша складова – термін «смарт» є багатозначним. У контексті його прив'язки до енергетичних систем доцільно взяти до уваги інтерпретацію, яка стосується організації виробничих процесів. Цьому критерію відповідає термін «смарт-індустрія», який характеризує застосування інтелектуальних систем управління виробничими процесами (бездротові датчики, 5G інтернет тощо) з метою оптиміза-

ції діяльності підприємств (Smart industry, 2024). Синтез двох ключових термінів дає змогу визначити поняття та ознаки смарт-енергосистеми. Отже, смарт-енергосистема – це сукупність взаємопов'язаних енергогенеруючих і розподільчих підприємств, а також об'єктів споживання електроенергії, які використовують інтелектуальні системи управління для оптимізації діяльності. Напрямок оптимізації визначається функцією підприємств у рамках енергосистеми.

Смарт-енергогенерація

Ключовим елементом, на якому вибудовується структура смарт-енергосистем, є смарт-енергогенерація, яка являє собою процеси виробництва електроенергії на заводах оптимізації виробничого навантаження. Концептуальна природа цього явища полягає в тому, що бездротові датчики зчитують інформацію з енергогенеруючих установок (споживання енергетичного ресурсу, обсяг виробництва електроенергії, тривалість експлуатації тощо) та передають її на сервер, де вона обробляється за допомогою методів глибинного аналізу даних і машинного навчання, в результаті чого визначаються ефективні режими роботи енергогенеруючих установок. Далі установки переводяться в режим роботи, який є максимально ефективним в умовах поточних потреб енергетичної системи.

Принцип розрахунку ефективного режиму роботи енергетичних установок ґрунтується на теорії виробничих функцій (Robinson, 1954) відповідно до якої існує кількісна залежність між факторами виробництва та величиною випуску продукції. У контексті енергетичних установок фактором виробництва є енергетичний ресурс, тоді як випуск продукції дорівнює обсягу виробництва електроенергії. Відповідно, критерієм ефективної роботи енергетичних установок є максимальний обсяг виробництва електроенергії на одиницю спожитого енергетичного ресурсу.

Сфера практичного застосування смарт-енергогенерації, заснованої на прин-

ципі переведення устаткування в ефективний режим роботи, обмежується технологічними властивостями енергетичних установок. Необхідними умовами для застосування такої смарт-енергогенерації є: по-перше, безперебійний доступ до енергетичного ресурсу; по-друге, можливість швидкого регулювання навантаження енергетичних установок. Серед енергогенеруючих підприємств, що використовують відновлювані джерела енергії, лише частина відповідає наведеним умовам: це енергоблоки, які працюють на біопаливі, та геотермальні станції, що використовують енергію термальних підземних вод. Натомість для найпоширеніших видів електростанцій сектору відновлюваної енергетики не доступна опція оптимізації режиму роботи. Сонячні та вітрові електростанції технологічно влаштовані так, що максимально ефективного режиму роботи вони досягають лише в умовах, коли мають доступ до найбільшої кількості енергетичного ресурсу (сонячного світла, вітру). Однак цей доступ є нерегульованим, а отже, неможливо оптимізувати діяльність електростанцій штучним способом. Можливості оптимізації режиму роботи гідроелектростанцій є обмеженими, оскільки обсяг енергетичного ресурсу, подачу якого можна регулювати, залежить від об'єму води, яка збирається у водосховищі. Тобто регулювати навантаження можна лише до того часу, доки вода надходить з водосховища. Після її вичерпання електростанція фактично припиняє свою роботу.

Незважаючи на те що до окремих видів електростанцій (найпоширеніших) неможливо застосувати підхід, спрямований на оптимізацію навантаження енергетичних установок, смартизувати виробництво електроенергії в рамках відновлюваного сектору енергетики можна шляхом коригування навантаження в межах вузлів виробництва електроенергії з відновлюваних джерел. Ці вузли являють собою об'єднані спільною системою управління електро-

станції, які використовують різні джерела відновлюваної енергії. Принцип управління вузлами полягає в компенсації нестачі запитаного енергетичною системою обсягу електроенергії за рахунок використання альтернативних джерел енергії. Наприклад, якщо в похмуру погоду сонячна електростанція не виробляє енергії, то цю нестачу можна компенсувати за рахунок енергії, яка виробляється вітровою електростанцією. Однак може статися так, що за відсутності сонця і вітру жодна електростанція не відпускатиме електроенергію в мережу. Для уникнення цієї проблеми слід забезпечити широку диверсифікацію джерел енергопостачання в рамках вузлів виробництва електроенергії з відновлюваних джерел. В ідеалі вузол має складатися з електростанцій, які використовують різні відновлювані джерела енергії, а саме: сонячних електростанцій (СЕС), вітрових електростанцій (ВЕС), гідроелектростанцій (ГЕС), гідроакмулювальних електростанцій (ГАЕС). Оскільки призначенням вузлів як структурних одиниць енергетичної системи є стабілізація виробництва електроенергії через кооперацію нестабільних джерел, включати до них геотермальні електростанції (геоТЕС) і теплові електростанції, що працюють на біопаливі (біоТЕС), не має сенсу, тому що ці об'єкти здатні самостійно підтримувати стабільний обсяг виробництва електроенергії.

Принцип дії вузла виробництва електроенергії з диверсифікованих відновлюваних джерел є таким: у період високої інтенсивності енергогенерації на СЕС і ВЕС частина електроенергії спрямовується на заповнення верхнього басейну ГАЕС, у той час як ГЕС перебуває в режимі накопичення води у водосховищі. У випадку, коли обсяг виробництва електроенергії на СЕС та/або ВЕС зменшується (або припиняється), нестача електроенергії, яка відпускається в мережу, компенсується за рахунок роботи ГАЕС та/або ГЕС (рис. 1).

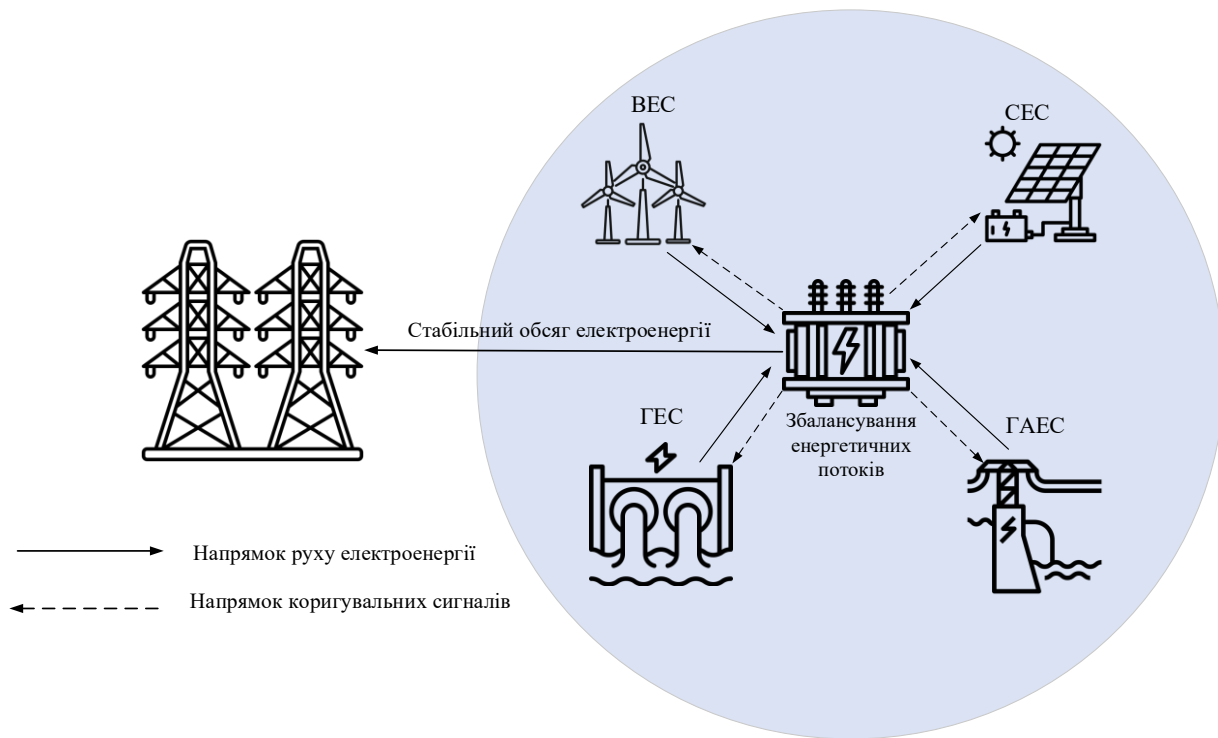


Рисунок 1 – Принцип функціонування вузлів виробництва електроенергії з відновлюваних джерел

Ідея смартизації виробництва електроенергії в рамках вузлів полягає в автоматизованому зборі інформації про технічні аспекти діяльності об'єктів енергогенерації, тенденції доступу до енергоресурсів (як часто світить сонце, наскільки сильним є вітер, як швидко заповнюється водосховище ГЕС тощо), властивості дистрибутивної системи. На основі отриманої інформації інтелектуальна система здійснюватиме розрахунки щодо оптимальної комбінації розподілення навантаження серед об'єктів енергогенерації, яка відповідає поточній кон'юнктурі факторів виробництва. Відповідно до цих розрахунків система коригуватиме роботу електростанцій (вмикатиме та вимикатиме потужності), і в результаті загальна ефективність виробництва електроенергії в рамках вузла зростатиме.

Навчання системи на великих масивах даних, зчитуваних упродовж тривалого періоду, в довгостроковій перспективі приведе до збільшення стабільних обсягів виробництва електроенергії в рамках вузлів.

Тривалі спостереження за зміною факторів виробництва сприятимуть розширенню горизонтів коригування навантаження без шкоди для стабільності системи. Іншими словами, на початковому етапі система визначатиме досягну мету виробництва стабільного обсягу електроенергії, виходячи з того обмеженого обсягу даних, який нею був попередньо проаналізований. Із часом після накопичення даних на основі додаткової інформації система може дійти висновку, що вузол забезпечуватиме стабільне виробництво більших обсягів електроенергії.

У практичному аспекті створення вузлів виробництва електроенергії з відновлюваних джерел може ускладнюватися з урахуванням відстані між існуючими електростанціями, які вже зараз можуть бути об'єднані у вузли, а також місць доступу до джерел відновлюваної енергії, де можна побудувати електростанції. При цьому ступінь перешкоди, яку створює чинник відстані, залежить від потенціалу та розга-

луженості електричної мережі в місцевості. Там, де мережа є розгалуженою та має високу пропускну здатність, відстань між діючими електростанціями та/або неосвоєними відновлюваними джерелами енергії не матиме критичного значення для розбудови вузлів.

Слід зауважити, що на відміну від концепції смарт-енергогенерації, яка передбачає переведення автономних силових установок (які не обмежені в доступі до джерел енергії) в ефективний режим роботи, економічний ефект від діяльності вузлів виробництва електроенергії з відновлюваних джерел буде опосередкованим. У першому випадку економічні переваги полягатимуть в економії палива за рахунок зменшення його питомих витрат (на одиницю виробленої електроенергії), у другому – вузли забезпечуватимуть стабільний потік електроенергії від джерел, які априорі є економічними (не потребують палива, яке становить високу частку витрат енергогенерації), а отже, забезпечуватиметься стабільне постачання дешевої електроенергії.

Щодо концепції смарт-енергогенерації, яка передбачає переведення автономних силових установок в ефективний режим роботи, слід звернути увагу на те, що її застосування до енергоблоків атомних електростанцій може бути недоцільним із декількох причин. По-перше, навантаження на енергоблоки АЕС неможливо швидко регулювати, тому вони не здатні швидко реагувати на запити енергетичної системи. Теоретично їх можна залишити працювати в максимально ефективному режимі, але в умовах, коли частка АЕС в енергетичному балансі країни є високою (в країні працює багато енергоблоків), малоймовірно, що загальний обсяг виробництва електроенергії на всіх енергоблоках АЕС відповідатиме потребам енергетичної системи. Скоріш за все, цей обсяг буде занадто великим або занадто малим. Певною мірою матиме сенс залишити працювати енергоблоки АЕС в ефективному режимі в умовах, коли їх налічується лише декілька одиниць на енергетичну

систему з великими потребами. Однак з огляду на співвідношення вартості ядерного палива та обсягу електроенергії, який можна з нього виробити, це забезпечуватиме суто маржиналістський економічний ефект, що протиставлятиметься ефекту масштабу. Іншими словами, економія від збільшення питомого виробництва електроенергії на одинцю палива буде занадто малою, щоб її враховувати, оскільки вартість цієї одиниці є мізерною порівняно з вигодами, які забезпечує масштабне виробництво (зумовлене високим навантаженням на енергоблоки). Можна заперечити цю тезу, висунувши припущення про те, що ефективний режим роботи перебуває на вищому рівні навантаження енергоблоку, ніж він є в даний момент. Однак у цьому випадку виникає проблема великого надлишку електроенергії, що нівелює вигоди від переходу в ефективний режим роботи. Отже, обставини, пов'язані з ефектом економії від збільшення питомого виробництва електроенергії, є другою причиною, яка робить недоцільним застосування концепції смарт-енергогенерації до енергоблоків АЕС.

У секторальному контексті найсприятливіші умови для імплементації концепції смарт-енергогенерації, яка передбачає переведення автономних силових установок в ефективний режим роботи, мають підприємства теплової енергетики. Технологія виробництва електроенергії на ТЕС і ТЕЦ дозволяє швидко регулювати навантаження на енергоблоках, що разом із необмеженим доступом до джерела енергії (вугілля, газу, мазуту) відкриває можливості для високочастотного коригування навантаження відповідно до запитів енергетичної системи. Регулювання навантаження має бути спрямоване на забезпечення синергії у виробництві електроенергії тепловим сектором. Навантаження серед енергоблоків має бути розподілене таким чином, щоб позитивний ефект для системи був максимальним.

Коригування навантаження має здійснюватися з використанням рівнянь, які характеризують залежність питомого вироб-

ництва електроенергії (кВт·год. на одиницю палива) від рівня навантаження на енергоблок або ТЕС (рис. 2). У свою чергу, ці рівняння складатимуться шляхом аналізу великих масивів даних щодо обсягу виробництва електроенергії за певного рівня

навантаження та характерних для цього обсягу витрат палива. У довгостроковій перспективі в результаті аналізу більшого обсягу даних та, як наслідок, кращого навчання системи рівняння можуть бути модифіковані.

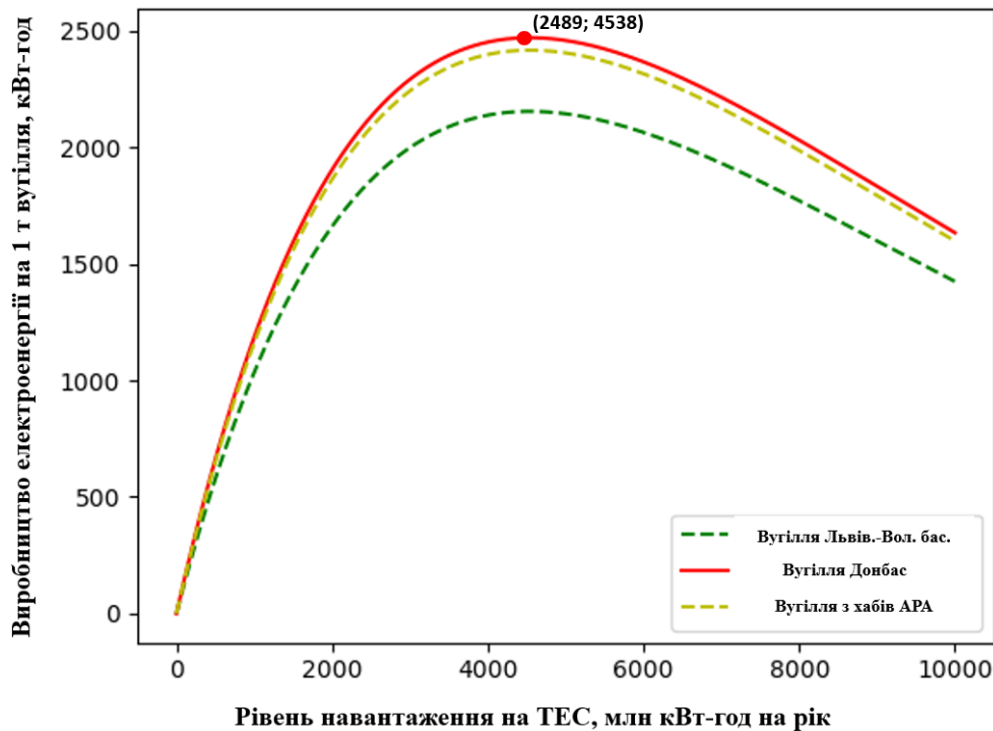


Рисунок 2 – Залежність питомого виробництва електроенергії (кВт на 1 т вугілля) від загального навантаження на Ладижинській ТЕС

На рис. 2 наведено криві, що характеризують залежність питомого виробництва електроенергії від загального навантаження на Ладижинській ТЕС, які було складено на основі рівняння тренду. Різні типи ліній характеризують залежність для різних видів вугілля із неоднаковою теплотворністю. Для інших ТЕС та окремих енергоблоків форма кривих буде схожою, оскільки відповідно до закону спадної віддачі зі зростанням навантаження обсяг виробництва електроенергії на одиницю палива спочатку збільшуватиметься, потім досягне свого піку і після цього почне зменшуватися.

Згідно з логікою прив'язки режиму роботи окремих силових установок до загальних результатів діяльності сектору теп-

лової енергетики можна передбачити, що внаслідок розподілення навантаження, спрямованого на забезпечення максимального позитивного ефекту для сектору, режим роботи кожної окремої силової установки буде близьким до показника, що відповідає вершині кривої (за формою, аналогічною до рис. 2), яка характеризує залежність питомого виробництва електроенергії від загального навантаження.

Результати аналізу технологічних аспектів реалізації концепції смарт-енергогенерації свідчать про доцільність переведення силових установок ТЕС, ТЕЦ, геотЕС та біоТЕС в ефективний режим роботи з розрахунку загального ефекту для енергетичної системи. Щодо АЕС, то має сенс

залишити їх працювати в режимі статичного забезпечення потреб енергетичної системи без урахування чинника максимізації виробництва на одиницю палива, оскільки це створюватиме більше проблем, ніж вигід. У свою чергу, електростанції, які використовують відновлювані джерела енергії, доцільно об'єднати у вузли або, іншими словами, закілювати їх у єдину мікромережу, яка сполучатиметься із загальною системою єдиним виходом. Таким чином, буде створена окрема структурна одиниця в рамках енергетичної системи, яка діятиме на засадах концепції смарт-енергогенерації, що передбачатиме регулювання навантаження електростанцій (які використовують різні джерела відновлюваної енергії) з метою забезпечення стабільного обсягу виробництва електроенергії.

Смарт-синхронізація

Однією з ключових властивостей смарт-енергосистем є максимізація виробництва дешевої енергії та, відповідно, мінімізація виробництва електроенергії з високою собівартістю. У секторальному вимірі найбільш дешевою є електроенергія, яка виробляється на АЕС; на другому місці – відновлювані джерела енергії, а найбільш дорого електроенергію продукують ТЕС і ТЕЦ. Для мінімізації середньої собівартості виробництва енергії по сектору енергетики загалом слід пріоритизувати навантаження на різні типи електростанцій. Передусім необхідно максимально задіяти потужності АЕС; можливий дефіцит електроенергії (якщо потужностей АЕС виявиться недостатньо) спробувати покрити за рахунок електростанцій, що використовують відновлювані джерела енергії; остаточні потреби (у тому числі маневрові) – забезпечити за рахунок роботи ТЕС і ТЕЦ. Досягненню цієї мети сприятиме концепція смарт-синхронізації.

Смарт-синхронізація передбачає аналіз даних щодо потреб енергетичної системи та виробничих спроможностей секторів енергетики, за результатами якого

здійснюється розподілення навантаження між секторами. На відміну від розглянутих локальних механізмів розподілення навантаження (всередині вузлів виробництва енергії з відновлюваних джерел або між ТЕС), які за своєю сутністю більшою мірою відповідають критеріям смарт-енергогенерації, смарт-синхронізація не враховує технологічних аспектів виробництва електроенергії – вона лише оперує інформацією щодо фактичного потенціалу окремих секторів енергетики, здійснюючи по відношенню до них запит на виробництво певного обсягу електроенергії. Надалі, у рамках процесів смарт-енергогенерації здійснюється розподілення навантаження між електростанціями всередині самих секторів.

Потенціал для застосування смарт-синхронізації залежить від дистрибутивних можливостей енергетичної системи, тобто від технічної спроможності ліній електропередач доставляти електроенергію до споживачів із найбільш віддалених електростанцій. Наприклад, може виникнути ситуація, коли смарт-система визначить за доцільне сконцентрувати великий обсяг навантаження на електростанціях, розташованих в окремій частині країни, тоді як в іншій частині електростанції працюватимуть на мінімумі. У такому випадку виникає технічне питання: чи вистачить пропускної здатності існуючих ліній електропередач, щоб спрямувати необхідний обсяг електроенергії до регіонів, де електростанції працюють на мінімумі. Якщо виявиться, що дистрибутивна система не здатна забезпечити виконання такого завдання, то доцільно сконцентрувати зусилля на її розбудові та/або сприяти впровадженню концепції смарт-дистрибуції.

Смарт-дистрибуція

Смарт-дистрибуція передбачає використання інтелектуальних систем із метою оптимізації роботи розподільчих мереж. Система вишукує найкоротші та найоптимальніші шляхи доставки електроенергії до споживачів та, з урахуванням загальної

кон'юнктури енергетичних потоків, розподіляє навантаження на лінії електропередач. Смарт-дистрибуція виконує логістичні завдання, однак аналіз даних, навчання системи та автоматизоване управління об'єктами дозволяють вирішувати ці завдання набагато якісніше, ніж аналогові системи.

Ефективність діяльності смарт-енергосистем залежить від загального обсягу електроенергії, що споживається в рамках енергетичної системи. Чим більшим є цей обсяг, тим меншим буде позитивний ефект від оптимізації навантаження на окремі електростанції та сектори енергетики. У випадку окремих електростанцій високі потреби в електроенергії обумовлюватимуть високе навантаження, через що фактичні обсяги електрогенерації віддалятимуться від максимально ефективного рівня (вершини кривої на рис. 2). У контексті секторів енергетики високі обсяги споживання електроенергії в межах системи визначають необхідність у більшому залученні секторів, що виробляють енергію з високою собівартістю. Разом із цим високі обсяги споживання електроенергії ускладнюють її передачу та знижують логістичний потенціал дистрибутивної системи. Отже, питома ефективність смарт-енергосистем (ефект на одиницю витраченого ресурсу) залежить від загальних потреб в електроенергії.

Смарт-споживання

Із метою зниження загального обсягу споживання електроенергії в рамках смарт-енергосистеми доцільно імплементувати концепцію смарт-споживання. Вона складається з двох ключових компонент: інтелектуальні лічильники (Smart Metering) та інтелектуальне регулювання попиту (Demand Response). Призначення інтелектуальних лічильників полягає в наданні споживачам актуальної інформації про обсяг споживання енергії окремими електроприладами та поточний тариф, на основі якої вони можуть розвинути практику економного споживан-

ня електроенергії. У свою чергу, функція інтелектуального регулювання попиту надає можливість запланувати використання того або іншого електроприладу в момент, коли це буде найбільш вигідно для споживача. Наприклад, пральні та посудомийні машини, сушарки, зарядні пристрої можуть автоматично вмикатись у нічний час, коли діє дешевий тариф на електроенергію. Такі можливості не лише позитивно позначатимуться на матеріальному становищі споживачів, але і сприятимуть стабілізації обсягів виробництва електроенергії в рамках системи (за рахунок урівноваження денного та нічного споживання енергії).

Синтез понять, що визначають напрями використання цифрових технологій у сфері енергетики

Узагальнення результатів дослідження концепції смарт-енергосистеми та її ключових компонент (мікроконцепцій) дозволяє сформулювати таке визначення: смарт-енергосистема – це цілісний комплекс технологічних та організаційних заходів, спрямованих на здешевлення виробництва електроенергії шляхом переведення енергетичних установок в ефективний режим роботи та створення умов для стабільної діяльності електростанцій, що використовують відновлювані джерела енергії (смарт-виробництво); зниження загальної вартості виробництва електроенергії через пріоритизацію навантаження на різні сектори енергетики (смарт-синхронізація); створення можливостей для передачі великих обсягів електроенергії в рамках єдиної енергетичної системи шляхом інтелектуальної оптимізації роботи розподільчих мереж (смарт-дистрибуція); забезпечення технологічних умов для економного споживання електроенергії (смарт-споживання). Сукупність зазначених компонент, об'єднаних у рамках єдиної мережі «виробництва – дистрибуції – споживання електроенергії», являють собою смарт-енергосистему (рис. 3).

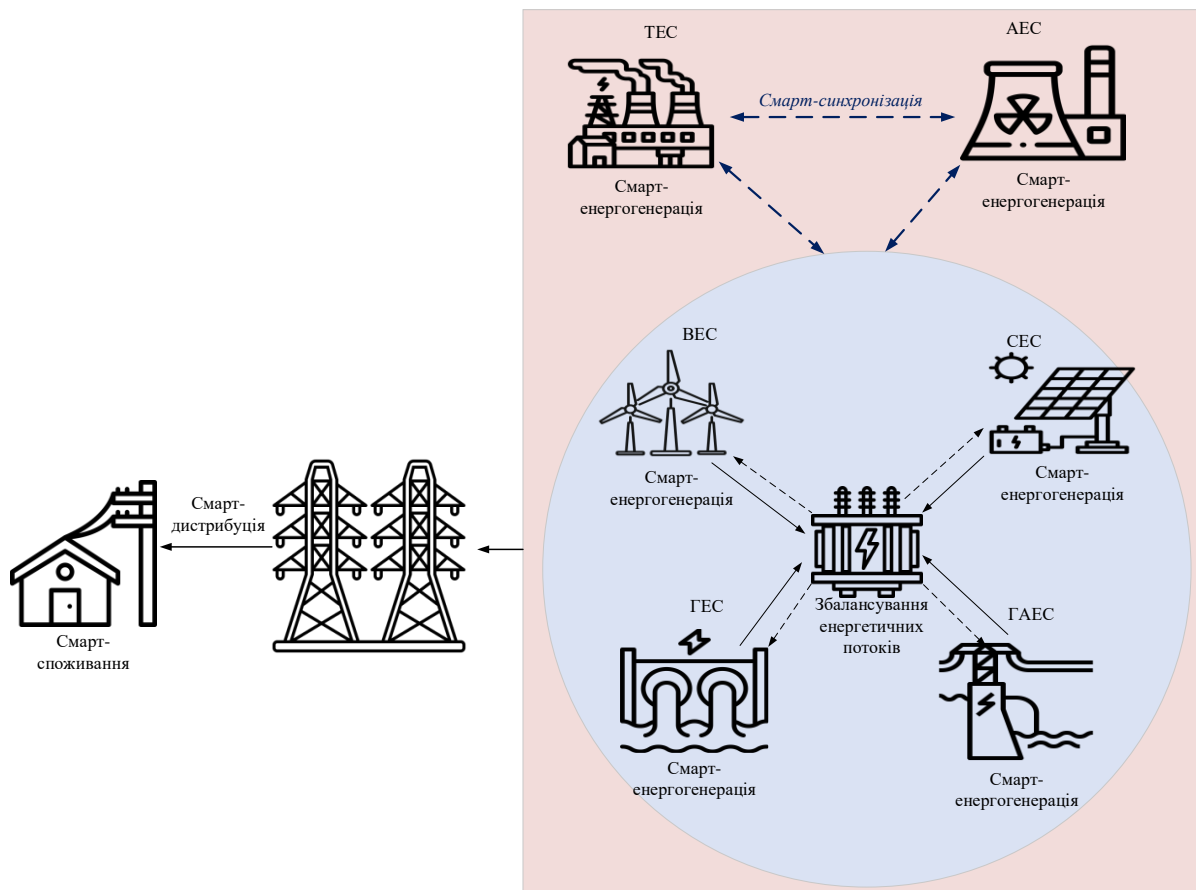


Рисунок 3 – Концепція смарт-енергосистеми

Висновок. Послання в єдину систему окремих технологічних рішень, що передбачають використання цифрових технологій для оптимізації процесів виробництва, дистрибуції та споживання електроенергії, матиме синергетичний ефект. Застосування концепції смарт-енергогенерації сприятиме зниженню собівартості виробництва електроенергії на окремих електростанціях, тоді як смарт-синхронізація посилюватиме загальний ефект за рахунок пріоритизації навантаження на більш економічні сектори енергетики. Оскільки потенціал застосування смарт-синхронізації залежить від пропускної здатності енергетичної системи, реалізація комплексу заходів щодо оптимізації діяльності розподільчих мереж (смарт-дистрибуція) дасть змогу переспрямувати більші обсяги виробництва електроенергії на сектори з низькою собівартістю енергогенерації. Цьому також сприятиме зниження

потреб системи в електроенергії в результаті застосування концепції смарт-споживання.

Отже, на основі систематизації існуючих наукових поглядів на окремі аспекти застосування цифрових технологій у сфері енергетики встановлено, що смарт-енергосистемою доцільно вважати єдину енергетичну систему, в рамках якої комплексно реалізуються заходи, передбачені концепціями смарт-енергогенерації, смарт-синхронізації, смарт-дистрибуції та смарт-споживання.

Література

ДСТУ 3440-96. Системи енергетичні. Терміни та визначення (1996). ДНАОП законодавча база. URL: https://dnaop.com/html/62516/doc-%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3_3440-96 (дата звернення: 10.04.2024).

- Про енергетичну ефективність: Закон України від 21 жовтня 2021 р. № 1818-IX (2022). *Відомості Верховної Ради України*. № 2. Ст. 8. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#Text> (дата звернення: 17.04.2024).
- Суходоля О. М. (2022). Новітні енергетичні технології та їх вплив на функціонування систем енергопостачання: аналіт. доп. Київ: НІСД. 36 с. URL: https://niss.gov.ua/sites/default/files/2022-12/ad_new-energy-technologies_gotove.pdf (дата звернення: 10.04.2024).
- Чернецька Ю. В., Замулко А. І. (2020). Модель інформаційної платформи для планування розвитку систем розподілу електричної енергії. *Наукові вісті КНІІ*. № 4. С. 7-17. DOI: <http://doi.org/10.20535/kpissn.2020.4.207712>
- European SmartGrids Technology Platform. (2006). Vision and strategy for Europe's electricity networks of the future. URL: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/a2ea8d86-7216-444d-8ef5-2d789fa890fc/language-en> (дата звернення: 10.04.2024).
- Huge test of state-of-the-art ideas Republic of Korea's smart grid development. (2011). Low Carbon Green Growth Roadmap for Asia and the Pacific: Case Study - Republic of Korea's smart grid development. URL: <https://www.unescap.org/sites/default/files/37.%20CS-Republic-of-Korea-smart-grid-development.pdf> (дата звернення: 10.04.2024).
- Innovative technologies for power stations. (2024). *PHOENIX CONTACT*. URL: <https://www.phoenixcontact.com/en-pc/industries/conventional-power-generation> (дата звернення: 10.04.2024).
- Midgley E. (2024). Innovations for 24/7 Low Carbon Energy: The Power of Hybrid Energy Systems. *Nuclear Innovations for Net Zero*. Vol. 64 (3). P. 6-7. URL: https://www.iaea.org/sites/default/files/nuclearinnovations_0.pdf (дата звернення: 10.04.2024).
- NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 1.0 (2010). Office of the National Coordinator for Smart Grid Interoperability. URL: https://www.nist.gov/system/files/documents/public_affairs/releases/smartgrid_interoperability_final.pdf (дата звернення: 10.04.2024).
- Robinson J. (1954). The Production Function and the Theory of Capital. *The Review of Economic Studies*. Vol. 21. No. 2. P. 81-106.
- Smart industry (2024). *SPIE*. URL: <https://www.spie.com/en/clients/industry-services/smart-industry> (дата звернення: 10.04.2024).
- Tuballa M., Abundo M. (2016). A review of the development of Smart Grid technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 59. P. 710-725.

References

- DSTU 3440-96. Energy systems. Terms and definitions. (1996). *DNAOP*. Retrieved from https://dnaop.com/html/62516/doc-%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3_3440-96 [in Ukrainian].
- Law of Ukraine on energy efficiency № 1818-IX (2022). *Vidomosti Verkhovnoyi Rady Ukrayiny*. № 2. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#Text> [in Ukrainian].
- Sukhodolia, O. M. (2022). The latest energy technologies and their impact on the functioning of energy supply systems. Kyiv: NICD. 36 p. Retrieved from https://niss.gov.ua/sites/default/files/2022-12/ad_new-energy-technologies_gotove.pdf [in Ukrainian].
- Chernetska, Y. V., & Zamulko, A. I. (2020). Model of the information platform for planning the development of the electric energy distribution system. *Scientific news KPI*. № 4. P. 7-17. DOI: <http://doi.org/10.20535/kpissn.2020.4.207712> [in Ukrainian].
- European SmartGrids Technology Platform (2006). Vision and strategy for Europe's electricity networks of the future. Retrieved from <https://op.europa.eu/en/publication->

- detail/-/publication/a2ea8d86-7216-444d-8ef5-2d789fa890fc/language-en
- Huge test of state-of-the-art ideas Republic of Korea's smart grid development (2011). Low Carbon Green Growth Roadmap for Asia and the Pacific: Case Study - Republic of Korea's smart grid development. Retrieved from <https://www.unescap.org/sites/default/files/37.%20CS-Republic-of-Korea-smart-grid-development.pdf>
- Innovative technologies for power stations (2024). *PHOENIX CONTACT*. Retrieved from <https://www.phoenixcontact.com/en-pc/industries/conventional-power-generation>
- Midgley, E. (2024). Innovations for 24/7 Low Carbon Energy: The Power of Hybrid Energy Systems. *Nuclear Innovations for Net Zero*, 64 (3), pp. 6-7. Retrieved from https://www.iaea.org/sites/default/files/nuclearinnovations_0.pdf
- NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 1.0 (2010). Office of the National Coordinator for Smart Grid Interoperability. Retrieved from https://www.nist.gov/system/files/documents/public_affairs/releases/smartgrid_interoperability_final.pdf
- Robinson, J. (1954). The Production Function and the Theory of Capital. *The Review of Economic Studies*. Vol. 21. No. 2. P. 81-106.
- Smart industry (2024). SPIE. Retrieved from <https://www.spie.com/en/clients/industry-services/smart-industry>
- Tuballa, M., & Abundo, M. (2016). A review of the development of Smart Grid technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 59. P. 710-725.

Oleksandr S. Serdiuk,

PhD in Economics, Senior Researcher

Institute of Industrial Economics of the NAS of Ukraine,
2 Maria Kapnist Street, Kyiv, 03057, Ukraine

E-mail: oleksandrserdyk@ukr.net

<https://orcid.org/0000-0003-3049-3144>;

Bohdan Ya. Andriienko,

postgraduate student

Institute of Industrial Economics of the NAS of Ukraine,
2 Maria Kapnist Street, Kyiv, 03057, Ukraine

E-mail: bogdan_andriienko@ukr.net

<https://orcid.org/0009-0009-1016-3122>

CONCEPTUAL VISION OF THE SMART ENERGY SYSTEM

In modern scientific and political circles, the smart energy system is considered as an integral component of Industry 4.0, since in a broad sense it serves the purpose of increasing production efficiency due to the introduction of artificial intelligence technologies. However, currently there is no single, established vision regarding the meaning of the term "smart energy system". As a rule, it is viewed through the prism of separate, often unrelated technological processes, which complicates the development of consistent theoretical provisions and practical recommendations for the development of Industry 4.0.

The purpose of the article is the systematization of scientific views on certain aspects of the application of digital technologies in the field of energy and the development of a holistic conceptual vision of a smart energy system.

The key elements of the smart energy system consist of smart energy generation, as a set of digitalization measures for the control system of energy generating facilities, aimed at increasing the specific production of electricity, as well as adjusting the load within the nodes of electricity production from renewable sources with the aim of stabilizing the energy flow; smart

synchronization, which is designed to distribute the load among the energy sectors on the basis of an intelligent assessment of system needs and capabilities; smart distribution, which optimizes the operation of distribution networks based on data analysis of temporal and spatial trends in the electricity transmission system; and smart consumption, which involves the implementation of technological measures that create conditions for economical consumption of electricity.

The holistic vision of the "smart energy system" concept, which provides for the comprehensive implementation of measures provided for by the micro-concepts of smart energy generation, smart synchronization, smart distribution and smart consumption, is substantiated. It is argued that the implementation of the "smart energy system" concept will ensure a synergistic effect of economical utilization of energy resources.

Keywords: smart power system, smart power generation, smart synchronization, smart distribution, smart consumption, digitalization, power sector.

JEL: L 16, L 23, L 60, L 69, L 94

Формат цитування:

Сердюк О. С., Андрієнко Б. Я. (2024). Концептуальне бачення смарт-енергосистеми. *Економіка промисловості*. № 2 (106). С. 52-63. DOI: <http://doi.org/10.15407/econindustry2024.02.052>

Serdiuk, O. S., & Andriienko, B. Ya. (2024). Conceptual vision of the smart energy system. *Econ. promisl.*, 2 (106), pp. 52-63. DOI: <http://doi.org/10.15407/econindustry2024.02.052>

Надійшла до редакції 22.04.2024 р.