

УДК 351.824:620.9(477):355.48

DOI <https://doi.org/10.51547/ppp.dp.ua/2025.3.3>**Лушніков Олексій Сергійович,**

аспірант кафедри державного управління і місцевого самоврядування

Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»

ORCID ID: 0009-0006-7603-1446

Баштанник Віталій Володимирович,

доктор наук з державного управління, професор,

професор кафедри державного управління і місцевого самоврядування

Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»

ORCID ID: 0000-0001-5969-3620

ЕНЕРГЕТИЧНА АВТОНОМІЯ УКРАЇНИ В УМОВАХ ПРОТИДІЇ ЗБРОЙНІЙ АГРЕСІЇ: ПУБЛІЧНО-АДМІНІСТРАТИВНІ СТРАТЕГІЇ

ENSURING UKRAINE'S ENERGY INDEPENDENCE IN THE CONTEXT OF THE RUSSIAN-UKRAINIAN WAR: PUBLIC AND ADMINISTRATIVE ASPECTS

У статті досліджуються ключові трансформаційні процеси, що відбуваються в енергетичному секторі України під час протидії збройній агресії РФ проти України, зокрема наслідки масових руйнувань виробничої інфраструктури та численних відключень електропостачання. Наголошено, що традиційна централізована модель управління виявила свою критичну вразливість до зовнішніх атак, що стимулювало пошук нових підходів до управління сектором в умовах високої турбулентності та нестабільності. У центрі уваги дослідження виступає аналіз ефективності механізмів управлінської автономії та деконцентрації, які забезпечують підвищення стійкості та адаптивності енергетичної системи за рахунок делегування повноважень місцевим органам влади та активної інтеграції розподілених енергогенеруючих об'єктів.

Методологічною основою виступає систематичний та порівняльний аналіз, поєднаний зі статистичною обробкою даних і експертною оцінкою на основі актуальної інформації щодо втрат потужностей, використання децентралізованих технологій та впровадження адміністративних стратегій на різних рівнях управління. У результаті дослідження у статті виявлені основні проблеми впровадження децентралізованих моделей: брак фінансування, регуляторні складнощі, дефіцит кваліфікованих кадрів та слабка координація між центральними й місцевими структурами. Запропоновані практичні рекомендації стосуються розширення автономії місцевих органів самоврядування, активного впровадження цифрових технологій управління, поліпшення умов для інвестування та інтеграції державних і приватних ресурсів.

У статті наголошується, що трансформація моделі управління в напрямку децентралізації є критично важливою для забезпечення енергетичної незалежності, стабільності, стійкості національної енергетичної системи України та її подальшої інтеграції до європейського енергетичного простору. Послідовне впровадження запропонованих кроків сприятиме створенню ефективної, гнучкої та автономної енергетичної системи, здатної відповідати викликам сучасної війни та забезпечувати енергетичну безпеку держави.

Ключові слова: управлінська автономія, деконцентрація, децентралізована енергетика, публічно-адміністративні стратегії, енергетична безпека, стійкість.

The article examines the key transformation processes taking place in the energy sector of Ukraine during the counteraction to the armed aggression of the Russian Federation against Ukraine, in particular the consequences of the massive destruction of production infrastructure and numerous power outages. It is emphasized that the traditional centralized management model has revealed its critical vulnerability to external attacks, which stimulated the search for new approaches to managing the sector in conditions of high turbulence and instability. The focus of the study is on the analysis of the effectiveness of the mechanisms of managerial autonomy and deconcentration, which ensure increased stability and adaptability of the energy system by delegating powers to local authorities and active integration of distributed energy generating facilities. The methodological basis is a systematic and comparative analysis, combined with statistical data processing and expert assessment based on current information on capacity losses, the use of decentralized technologies and the implementation of administrative strategies at different levels of management. As a result of the research, the article identifies the main problems of implementing decentralized models: lack of funding, regulatory difficulties, shortage of qualified personnel and weak coordination between central and local structures. The proposed practical recommendations relate to expanding the autonomy of local self-government bodies,

active implementation of digital management technologies, improving conditions for investment and integration of public and private resources.

The article emphasizes that the transformation of the management model towards decentralization is critically important for ensuring energy independence, stability, sustainability of the national energy system of Ukraine and its further integration into the European energy space. The consistent implementation of the proposed steps will contribute to the creation of an effective, flexible and autonomous energy system capable of meeting the challenges of modern warfare and ensuring the energy security of the state.

Key words: *managerial autonomy, deconcentration, decentralized energy, public and administrative strategies, energy security, sustainability.*

Постановка проблеми. Останні роки стали справжнім випробуванням для енергетичної системи України: атаки на критичну інфраструктуру, масові блекаути та суттєве падіння енергетичних можливостей стали частиною воєнної реальності. Події підтвердили, що централізована модель управління енергетикою надто уразлива перед зовнішніми ударами. Це стимулювало поступовий перехід у бік автономного та децентралізованого підходу, який у перспективі здатний зміцнити стійкість і гнучкість енергетичного сектора.

У цьому контексті увага експертів фокусується на тому, наскільки ефективно впроваджуються сучасні механізми децентралізації й які адміністративні рішення допомагають оптимізувати управління енергетикою в умовах війни. Окремо гостро постає питання про недоліки децентралізованого управління, зокрема, нестачу координації, можливе дублювання, проблеми з ресурсним забезпеченням. Водночас, європейський досвід показує, що ці виклики варто долати шляхом чіткого визначення повноважень, укріплення комунікації між локальними і централізованими структурами й розвитку сучасних цифрових інструментів контролю та взаємодії.

Розкриття та подолання проблем децентралізації є ключовим завданням у процесі м'якої перебудови енергетичного сектору України. Лише комплексне реформування управлінських процесів дасть змогу створити справді автономну й стійку енергетичну систему, здатну ефективно протистояти викликам сьогодення та забезпечувати потреби економіки та населення навіть у найскладніших обставинах. Адже російська агресія проти України гостро висвітлила безпрецедентні виклики для енергетичної безпеки країни. Масові атаки на об'єкти критичної енергетичної інфраструктури, що почалися з початком повномасштабних воєнних дій, спричинили руйнування генераційних потужностей, підстанцій, ліній електропередачі, що, у свою чергу, призвело до серйозних перебоїв з електропостачанням, тривалих відключень електроенергії, суттєвих обмежень для промислових споживачів і побутових абонентів. В умовах, коли від швидкого

відновлення електропостачання безпосередньо залежить стійкість суспільства, економічна життєздатність держави й мобілізаційна готовність, ці загрози набули критичного значення.

Водночас, крім фізичних руйнувань, енергетичний сектор України зіткнувся з проблемами кібербезпеки. Хакерські атаки з боку країни-агресора були спрямовані на унеможливлення роботи диспетчерських центрів, маніпуляції керуванням енергосистемою та спроби підвищити аварійність. Таким чином, виклики для енергетичної безпеки мають багатовимірний характер: поєднання фізичних, кібернетичних і техніко-організаційних факторів створює складну картину ризиків, що потребує системної відповіді. Саме тому вразливість централізованої моделі управління стала очевидною з перших тижнів повномасштабних атак: знищення чи пошкодження центральних елементів енергосистеми вводило у стан нестабільності цілі регіони, тоді як місцеві генераторні потужності були або недостатньо розвинені, або не мали достатнього резерву. Це викликало значні труднощі з координацією оперативних рішень на місцях, подовжило час відновлення електропостачання й зробило практично неможливою ефективну реакцію у разі одночасного ураження кількох об'єктів. Під тиском цих викликів особливо гостро постає питання децентралізації та підвищення автономії окремих енергетичних ланок. Разом з тим, чинні механізми децентралізації у довоєнний період не були достатньо розвиненими: відчутна нестача локальних енергоносіїв, резервних джерел живлення, обмежена кількість автономних енергетичних систем покривали лише базовий рівень потреб, самі ж процеси розбудови децентралізованої генерації та впровадження смарт-технологій були ще на початковій стадії, а отже в умовах воєнної агресії ці слабкі ланки стали особливо відчутними.

Крім технічних аспектів, виклики для енергетичної безпеки України мають адміністративно-організаційний компонент. Забезпечення ефективної взаємодії між центральними і місцевими органами управління, оперативний розподіл ресурсів, швидке ухвалення рішень щодо пріори-

тетних відновлювальних робіт, логістика доставки необхідного обладнання у зону обстрілів саме такі складники стали серйозним випробуванням для наявної управлінської моделі. До цього додається й недостатня координація дій між окремими регіонами: нерідко обласні компанії через відсутність чітких протоколів не могли ефективно залучати або разом розподіляти мобільні резерви, що збільшувало тривалість аварійних відключень. Серед окремих важливих проблем варто виділити величезне навантаження на енергетичні підприємства, які, опинившись в ситуації дефіциту генерації, були змушені шукати швидковпроваджені альтернативи: встановлення мобільних дизель- і газоелектростанцій, закупівля генераторів для критичних об'єктів, переорієнтація частини виробництва на відновлювальних джерел енергії (ВДЕ). Однак цей процес ускладнювався тим, що значна частина об'єктів залишалася під ризиком повторних ворожих ударів, а доставка обладнання на лінію фронту була утруднена через мінування й постійний обстріл.

Крім безпосередніх збитків, руйнування енергетичної інфраструктури призводить до ланцюгових наслідків для всієї економіки та соціальної сфери. Зниження виробничих потужностей електроенергії суттєво обмежує роботу промислових підприємств, що, у свою чергу, впливає на зайнятість населення, податкові надходження, виконання оборонних замовлень. Багато критично важливих підприємств (зокрема, хімічна, оборонна, харчова промисловість) опинилися у вимушених простоях, а відсутність електропостачання ускладнювала роботу медичних установ, об'єктів водопостачання і каналізації, режимних установ.

Виклики для енергетичної безпеки України також включають ризики, пов'язані з відновленням та ремонтом зруйнованих об'єктів. Значна частина територій, де знаходяться ключові інфраструктурні вузли, перебувають під контролем ворога або в зоні активних бойових дій, що суттєво ускладнює доступ до них. З іншого боку, постійна нестача ресурсів, труднощі із закупівлею необхідних матеріалів і залежність від зовнішнього постачання компонентів для ремонту створили додаткові бар'єри для швидкого відновлення енергоінфраструктури. Не меншою проблемою є зростаюча енергозалежність від імпортованої електроенергії, пального, обладнання і технологій, що особливо гостро проявилось під час інтенсивних атак на внутрішню генерацію. В умовах глобальних криз (зокрема, цінних коливань на світових ринках енергоносіїв) зменшення вну-

трішніх виробничих потужностей підсилює вразливість національної енергосистеми.

Варто також звернути увагу на соціальний вимір викликів, які постали перед Україною. Постійні або тривалі відключення електроенергії призводять до погіршення умов життя мільйонів громадян, зростання соціальної напруги, психологічної стомленості населення й втрати довіри до державних органів. Державна система змушена вирішувати велику кількість питань, пов'язаних з організацією пунктів обігріву, забезпеченням генераторами шкіл, лікарень і дитсадків, розробкою нових підходів до кризового менеджменту.

Усі ці фактори, що сукупно визначають характер і масштаб загроз, які постали перед енергетичною безпекою України, вимагають глибокої аналітики і застосування інноваційних рішень. Лише перебудова управлінських процесів, комплексна децентралізація системи, підсилення кіберзахисту та диверсифікація генераційних потужностей здатні поступово знизити найгостріші ризики й закласти підвалини для формування по-справжньому стійкої енергетики майбутнього.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У контексті воєнних викликів для енергетичної безпеки України доречно звернутися до праць провідних британських дослідників, які аналізують питання стійкості енергетичних систем, децентралізації управління та зменшення вразливості інфраструктури до зовнішніх загроз. Ф.Керн (F.Kern, С.Кузєнко, С.Мітчелл, 2020) ґрунтовно дослідив, як децентралізація енергетичного сектору може підвищити адаптивність та гнучкість енергосистем у кризових умовах, виокремлюючи ризики централізованих моделей та потенціал громад для швидкого реагування на надзвичайні ситуації. Д.Ватсон (J.Watson, 2019) наголошує на важливості диверсифікованих джерел енергії, локалізованого виробництва та сучасного адміністративного управління як основних елементів зниження структурних ризиків в умовах енергетичної невизначеності. М.Бредшоу (Michael Bradshaw, 2018), аналізує геополітичний аспект енергетичної безпеки, звертає увагу на вразливість країн із високою концентрацією генерації та залежністю від централізованих мереж, підкреслюючи, що саме у кризових ситуаціях проявляється важливість гнучких локальних рішень та управлінської автономії. Р.Болтон, Т.Фоксон (Bolton, R., Foxon, T., 2019) вказали, що трансформація енергетичної інфраструктури через призму соціально-технічних змін, що є принципово важливим для керування системами розподілу електроенергії у Великій Британії. Автори

підкреслюють, що перехід до низьковуглецевих енергосистем неможливий суто технічними засобами, і це завжди складний комплекс соціальних, інституційних і технологічних змін. Зокрема, Р.Болтон, Т.Фоксон виокремили ключові аспекти:

1) соціально-технічний підхід, у межах якого пропонується розглядати енергетичні мережі не лише як технічну, а й як «соціо-технічну» систему, де інновації залежать від взаємодії інженерних, організаційних та суспільних факторів;

2) взаємодія суб'єктів, коли аналізується взаємодія між державними регуляторами, компаніями-операторами, споживачами й іншими зацікавленими сторонами у процесах інновацій та управління електричними мережами;

3) гнучкість та адаптивність моделей управління, здатних реагувати на нові виклики (зокрема – децентралізацію, розвиток відновлюваної енергетики, цифровізацію).

4) управління перехідними процесами, з урахуванням складності переходу від централізованої системи до більш децентралізованої та багаторівневої структури управління, що супроводжується появою нових учасників і механізмів координації.

Майже всі автори у своїх роботах приходять до схожого висновку: децентралізація, цифровізація, диверсифікація генерації та партисипативні управлінські стратегії критично важливі для підвищення стійкості і енергетичної незалежності в умовах загроз, зокрема воєнних чи гібридних. Однак британські дослідники відзначають, що жодна з моделей не є універсальною, а ефективність рішень прямо залежить від здатності держави й місцевих громад до співпраці, швидкого обміну інформацією та раціонального управління ресурсами.

Варто вказати, що енергетична система країни, втягнута у масштабний військовий конфлікт, постала перед низкою безпрецедентних викликів. Ці виклики носять комплексний характер і виходять далеко за межі лише технічних питань – до них належать фізичні руйнування інфраструктури, кіберзагрози, адміністративна неузгодженість та залежність від зовнішніх ресурсів. Тому досвід, напрацьований британськими та європейськими фахівцями щодо децентралізації, цифрової трансформації та розвитку локальної генерації, може бути адаптований Україною для посилення власної енергетичної безпеки.

Даний дослідницький аналіз зосереджується на виявленні ефективності існуючих механізмів децентралізації в енергетичному секторі та аналізі адміністративних стратегій, що дозволяють оптимізувати управлінські процеси в умовах війни.

Основна увага приділяється розкриттю проблем неефективності децентралізації, а також шляхів їх подолання для забезпечення стабільності національної енергетичної системи та підвищення її автономії.

Виклад основного матеріалу. Енергетична безпека є одним із ключових чинників національної безпеки держави, а її значення суттєво посилюється в умовах воєнного стану. Саме в періоди військових загроз питання надійного та безперервного забезпечення енергією набуває стратегічного значення, оскільки енергетика критично впливає на роботу об'єктів оборони, систем життєзабезпечення, транспорту, комунікацій та медичних установ. У Стратегії енергетичної безпеки України на період до 2025 року, затвердженій Кабінетом Міністрів у 2021 році, енергетична безпека визначається як здатність забезпечувати національні інтереси в доступі до надійних, стійких і сучасних джерел енергії [7]. Дана концепція включає технічну надійність, економічну ефективність, екологічну прийнятність та готовність до функціонування в надзвичайних обставинах.

Проте реалії воєнного стану суттєво ускладнюють виконання цих завдань: об'єкти енергетичної інфраструктури стають мішенями атак, порушується логістика постачань, виникають перебої у роботі енергосистем, що напряму впливає на життєдіяльність населення і обороноздатність країни. Тому сучасне бачення енергетичної безпеки все більше акцентує на питаннях стійкості (resilience), здатності до швидкого відновлення систем після пошкоджень, розвитку децентралізованих енергетичних рішень, диверсифікації джерел енергопостачання та гнучкого адміністрування енергетичних потоків (Goldthau, Sovacool, 2012).

Сучасні організації, які прагнуть енергетичної автономії, впроваджують новітні технології й інноваційні управлінські підходи для досягнення сталого, надійного та незалежного енергозабезпечення. У сучасних умовах це питання не обмежується лише запровадженням технічних рішень, таких як використання розподілених відновлюваних джерел енергії, впровадження акумулюючих систем чи автоматизованих енергомереж, а й передбачає також адаптацію організаційних структур, зміцнення інституційної гнучкості та розвиток партнерських мереж, здатних забезпечувати стабільність навіть у періоди зовнішніх і внутрішніх викликів (Bryson et al., 2014; Sovacool, 2016).

Одним із ключових елементів енергетичної автономії слід вважати технологічну основу як

інтеграцію сучасних генераторних установок, фотоелектричних панелей, вітроенергетичних систем та акумулюючих пристроїв. Важливим аспектом є також створення ефективних систем енергозбереження, зокрема завдяки впровадженню інтелектуальних регуляторів та «розумних» лічильників, які дозволяють балансувати та керувати потоками енергії на різних рівнях організації. Не менш суттєвим складником є організаційна структура управління. Розбудова адаптивних систем прийняття рішень, чітке визначення зон відповідальності персоналу, впровадження цифрових механізмів контролю та раннього реагування дають змогу швидко і ефективно реагувати на неочікувані перебої чи зовнішні загрози. Високий рівень внутрішньої координації забезпечує стійкість у критичних ситуаціях, знижуючи залежність від сторонніх енергоресурсів.

Окремо виділяється ресурсна достатність і гнучкість енергетичного балансу, що включає як наявність додаткових резервних потужностей, так і можливість швидкого підключення альтернативних джерел постачання в разі перебоїв. Така гнучкість підвищує здатність до швидкого відновлення функціонування після будь-яких деструктивних подій, зокрема природних катастроф, технічних збоїв чи кібератак. Мова йде про феномен резервної і адаптивної спроможності енергетичної системи.

Резервна й адаптивна спроможність енергетичної системи (*Reserve and adaptive capacity of the energy system*, RACES) – це комплексна характеристика, що відображає потенціал енергетичної інфраструктури витримувати та ефективно реагувати на раптові навантаження, перебої або кризові події. Резервна спроможність охоплює наявність додаткових (неробочих у звичному режимі) потужностей і джерел енергії, які можуть бути оперативно залучені у разі потреби, наприклад, при аварійних ситуаціях, сезонних піках споживання чи пошкодженні основних ліній постачання. Адаптивна спроможність пов'язана із здатністю енергетичної системи швидко й ефективно перебудовуватися під нові умови, тобто підключати альтернативні ресурси, перерозподіляти наявні потужності, змінювати потоки енергії між підсистемами, інтегрувати нові технології або реагувати на зміну попиту. Разом ці два аспекти утворюють основу для стійкої та відновлювальної енергетичної системи, яка не лише має запас міцності, а й гнучко реагує на динаміку зовнішніх і внутрішніх викликів: ракетні атаки, природні катастрофи, кібератаки, технічні аварії тощо.

Важливою складовою сучасної енергетичної автономії залишається інституційна відкри-

тість – формування розвинених міжсуб'єктних взаємозв'язків, участь у партнерських енергетичних кластерних структурах, формування тобто створення так званих енергетичних спільнот чи кооперативів. Така співпраця дозволяє не лише диверсифікувати джерела інформації та енергоресурсів, а й оптимізувати управлінські процеси, розподіляючи ризики та підвищуючи колективну стійкість у кризових умовах (Walker & Devine-Wright, 2008; Bauwens et al., 2016). Саме тому у рамках енергетичної автономії слід приділяти увагу ще одній важливій складовій – інтегрованій економічній оптимізації, у межах якої йдеться про балансування витрат на впровадження і підтримку автономних систем із загальними можливостями організації, а також про ефективне використання фінансових, людських і технологічних ресурсів для модернізації інфраструктури.

Очевидно, що вагому роль у досягненні енергетичної автономії відіграє соціальна інтеграція та взаємодія з місцевими громадами, органами влади й іншими стейкхолдерами, адже підвищення суспільної довіри, узгодженість дій, вчасне інформування користувачів покращує соціальну сприйнятність нових підходів до енергозабезпечення, сприяє створенню прозорого та передбачуваного енергетичного середовища (Wolsink, 2012). При цьому важливо звернути увагу на наявний адаптаційний потенціал організації до зовнішніх змін як здатність оперативно змінювати стратегію інституційного розвитку, інтегрувати новації, підсилювати системи захисту відповідно до мінливих викликів ринку чи регуляторного середовища. Адже саме високий рівень адаптивності забезпечує не лише короткострокову стійкість, а й довготривалу конкурентоспроможність енергетичних систем. Так само невід'ємною складовою енергетичної автономії є екологічна відповідальність та рух до сталого розвитку. Використання відновлюваних джерел, впровадження енергоефективних технологій і турбота про довкілля сприяють збереженню природних ресурсів та формуванню позитивного іміджу організації.

Таким чином, енергетична автономія є багатовимірною категорією, що базується на гармонійному поєднанні технологічного потенціалу, організаційної гнучкості, ресурсної забезпеченості, інституційної відкритості, економічної доцільності, соціальної інтеграції, адаптивності та екологічної відповідальності. Лише комплексне врахування цих елементів дозволяє сучасним організаціям досягати високої стійкості та незалежності в енергетичній сфері.

Третім ключовим елементом інституціонального дизайну (О.Баштанник, 2025) енергетичної системи України є інфраструктурний комплекс передачі та розподілу енергії, який з позицій теорії автоматичного управління можна розглядати як багаторівневу систему зі складною топологією зворотних зв'язків. Ефективність транспортних і розподільчих мереж визначається не лише їхніми технічними параметрами, а й динамічними характеристиками, зокрема, часом встановлення перехідних процесів, стійкістю до змінних характеристик, здатністю підтримувати задані режими при варіації вхідних параметрів. Резервна й адаптивна спроможність енергетичної системи в термінах теорії управління відображає здатність системи зберігати стійкість і задані динамічні характеристики при суттєвих змінах параметрів об'єкта керування або впливі зовнішніх збурень різної природи. У сучасних умовах критично важливими стають алгоритми управління з прогнозуючими моделями (MPC – Model Predictive Control), які дозволяють передбачати поведінку енергомережі при різних сценаріях навантаження та оперативно коригувати налаштування регуляторів.

Інтеграційні процеси з європейською енергосистемою вимагають переосмислення динамічних властивостей української енергомережі в термінах запасу стійкості, передатних функцій та частотних характеристик. Синхронізація з ENTSO-E передбачає не тільки уніфікацію технічних стандартів, але й адаптацію систем автоматичного регулювання частоти та потужності (САРЧМ) до нових умов функціонування об'єднаної енергосистеми з урахуванням масштабних дисбалансів та аварійних ситуацій.

Трансформація енергетичного сектору в контексті теорії управління потребує створення адаптивних систем регулювання, які автоматично підлаштовують параметри регуляторів під змінну динаміку об'єкта. Сучасна парадигма Smart Grid вимагає впровадження децентралізованих багаторівневих систем керування з ієрархічною структурою, здатних реалізовувати оптимальне керування за різними критеріями, від мінімізації відхилень частоти до балансування економічних витрат на підтримку резервів. Підвищення стійкості енергосистеми потребує впровадження комплексних систем моніторингу з використанням методів статистичної обробки потоків даних у реальному часі, фільтрації шумів вимірювання та адекватної оцінки стану системи. Цілком логічно, що алгоритми машинного навчання дають змогу створювати предиктивні моделі для випереджаючого

виявлення аномалій та запобігання каскадних аварій. Історично сформована структура енергосистеми України відображає систему з розподіленими параметрами, де затримки у передачі сигналів управління та вимірювання параметрів можуть суттєво впливати на динаміку. Розробка цифрових систем управління з компенсацією транспортного запізнювання є ключовим фактором для підвищення швидкодії та якості регулювання. Застосування методів Н ∞ -оптимізації та μ -синтезу контролерів дозволить забезпечити стійкість та якість управління енергосистемою при наявності параметричних невизначеностей, що особливо актуально в умовах різких змін топології мережі внаслідок пошкоджень інфраструктури. Такий підхід формує основу для створення дійсно енергетичної системи, здатної зберігати керованість навіть при істотних структурних змінах.

SmartGrid (розумна мережа) – інтегрована енергетична інфраструктура нового покоління, яка поєднує класичні лінії електропередачі й розподілу з інноваційними засобами автоматизації, цифровими технологіями зв'язку, сучасними системами моніторингу та керування. Її головна ідея полягає в тому, щоб забезпечити динамічний, керований у реальному часі обмін інформацією та енергією між усіма учасниками ринку: виробниками, операторами розподілу, споживачами і малими генераторами (prosumers), а також інтегрувати ресурси з відновлюваних джерел енергії та системи накопичення. SmartGrid відрізняється від класичних мереж багатовекторністю потоків енергії та інформації, гнучкістю та високим рівнем автоматизації, що дозволяє їй відразу виявляти зміни стану системи, реагувати на них та ефективно усувати будь-які перебої або дисбаланси.

Ключовими функціональними рисами виступають: по-перше, двосторонній зв'язок між усіма вузлами енергосистеми забезпечується завдяки використанню цифрових мереж (PRM, IoT, SCADA, AMI), що дає змогу відслідковувати параметри в реальному часі, оперативно управляти ресурсами, прогнозувати аварійні ситуації та впроваджувати smart-алгоритми для оптимізації розподілу потужності; по-друге, інтеграція технологій автоматизації, що дозволяє мінімізувати ручне втручання та перевести більшість операцій (від балансування до виявлення пошкоджень) у автоматичний режим; по-третє, масштабована структура, адже розумна мережа може включати мікромережі (microgrids), домогосподарства з власною генерацією (сонячні панелі, малі вітротурбіни), комерційних і промислових споживачів;

по-четверте, підтримка розподілених та відновлюваних джерел енергії, інтеграція локальних акумуляторних систем, електромобілів як споживачів і потенційних накопичувачів (Vehicle-to-Grid, V2G).

Отже, архітектурно-технологічна структура (інституційний дизайн) SmartGrid являє собою багаторівневу систему, де кожен рівень виконує специфічні функції й пов'язаний з іншими:

1) фізичний рівень – класичні електроустановки, кабельні лінії, трансформатори, підстанції, споживачі, генератори, сонячні станції, акумулятори;

2) рівень вимірювання та моніторингу: цифрові лічильники (smart meters), датчики, вимірювальні системи (PMU), IoT-пристрої, що забезпечують максимальну спостережуваність роботи мережі;

3) інформаційно-комунікаційний рівень: системи передачі даних (оптоволокну, радіоканали, 5G), протоколи захищеної комунікації та системи передачі команд;

4) аналітичний та управлінський рівень як потужні центри збору великих даних (Big Data), штучний інтелект і машинне навчання для прогнозування та аналізу стану, автоматизовані системи диспетчерського керування (DMS/EMS);

5) рівень забезпечення кібербезпеки на основі багаторівневої захищеності, що забезпечує енергосистему від зовнішніх втручань і кібератак

Очевидними перевагами SmartGrid виступають: 1) енергоефективність (зниження втрат електроенергії завдяки оптимізації потоків, індивідуальному керуванню навантаженням, усуненню небалансів між попитом і генерацією); 2) надійність і стійкість (автоматичне виявлення, локалізація та самовідновлення після аварій чи пошкоджень, гнучке перепідключення ліній і джерел енергії у разі надзвичайних подій); 3) адаптивність (швидке реагування системи на коливання попиту, метеоумови, введення нових генеруючих або накопичувальних потужностей); 4) екологічність (створює ідеальні умови для збільшення частки «зеленої» енергетики, знижує викиди вуглецю, дозволяє переходити на локальне або персоналізоване споживання); 5) можливість створення енергетичних екосистем – активні спільноти, кооперативи, peer-to-

peer торгівля електроенергією, участь домогосподарств у балансуванні системи.

Зазвичай при цьому виокремлюють виклики та обмеження, перш за все, високу вартість упровадження через необхідні суттєві інвестиції у заміну обладнання, побудову каналів зв'язку, IT-інфраструктуру; проблеми кібербезпеки, адже збільшення точок доступу до мережі підвищує ризик кібератак, що ставить під загрозу стабільність усієї системи; необхідність регуляторних і правових змін: облік нових моделей ролей і відповідальності, стандартизації протоколів обміну й захисту даних; складність інтеграції застарілих інфраструктур: трансформація класичних мереж у SmartGrid є багатоетапною і часто потребує модернізації фізичних компонентів. І очевидно – підвищені вимоги до кваліфікації персоналу, оскільки робота з новими технологіями вимагає масштабної перепідготовки кадрів.

На нашу думку, перспективними напрямками розвитку виступають, по-перше, розгортання розподілених мікромереж з автономними алгоритмами керування з одночасною інтеграцією енергетичних сховищ, побудова ринків гнучкості (flexibility markets) для продажу енергетичних послуг у режимі онлайн, використання блокчейн-технологій для безпечних транзакцій і сертифікації чистої енергії, активна участь споживачів у балансуванні та управлінні мережею через платформи т.з. «енергетичного інтернету речей».

Фактично, розумна мережа (SmartGrid) означає якісний зсув у підходах до організації енергетики: це поєднання інтелектуальної керованості, оптимізації, сталості та гнучкості. Вона дозволяє створити енергетичну систему, здатну гарантувати безперервність, надійність і екологічність електропостачання, зробити енергетику доступною та відкритою до участі кожного. Саме це прокладає шлях до стійкого розвитку енергетики майбутнього.

Отже, резервна й адаптивна спроможність енергетичної системи України має розглядатись як проблема синтезу оптимальної системи управління зі змінною структурою, здатної забезпечувати необхідну якість перехідних процесів при різноманітних збуреннях та зберігати стійкість при варіаціях параметрів об'єкта в широкому діапазоні.

REFERENCES:

1. Tichy, L., Dubský, Z. The EU Energy Security Relations with Russia Until Ukraine War. SSRN. 2023. DOI: <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4326109> [in English].
2. Szulecki, K., Overland, I. Russian nuclear energy diplomacy and its implications for energy security in the context of the war in Ukraine. Nature Energy. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41560-023-01228-5> [in English].

3. Mykytenko, V.V. Povoienne vidnovlennia ta rozvytok krytychnoi infrastruktury Ukrainy [Post-war restoration and development of critical infrastructure of Ukraine]. *Visnyk ekonomichnoi nauky Ukrainy – Bulletin of Economic Science of Ukraine*. 2023. 1(44). 124-138. DOI: <https://doi.org/10.37405/1729-7206> [in Ukrainian].
4. Buriachenko, A., Slavkova, A. Reformuvannia enerhetychnoho sektoru Ukrainy dlia zabezpechennia staloho rozvytku [Reforming the energy sector of Ukraine to ensure sustainable development]. *Modeling the development of the economic systems – Modeling the development of the economic systems*. 2023. 4. 130-137. DOI : <https://doi.org/10.31891/mdes/2023-10-17> [in Ukrainian].
5. Omelchenko, V. Sektor vidnovliuvanoi enerhetyky Ukrainy do, pid chas ta pislia viiny [The renewable energy sector of Ukraine before, during and after the war]. *Tsentr Razumkova – Razumkov Center*. 11.11.2022. <https://razumkov.org.ua/statti/sektor-vidnovlyuvanoyi-energetyky-ukrayiny-do-pid-chas-ta-pislya-viyny> [in Ukrainian].
6. Bondarenko, S., Korotchenko O. Formalizatsiia ta zakonodavche zakriplennia mekhanizmiv zabezpechennia stiikosti enerhetychnoi bezpeky Ukrainy [ormalization and legislative consolidation of mechanisms for ensuring the sustainability of energy security of Ukraine]. *Journal of Scientific Papers «Social Development and Security» – Journal of Scientific Papers «Social Development and Security»*. 2024. 14, 2. 82-106. DOI: 10.33445/sds.2024.14.2.9 [in Ukrainian].
7. Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy “Pro skhvalennia Stratehii enerhetychnoi bezpeky”: vid 4 serpnia 2021 r. № 907-r. [On approval of the Energy Security Strategy: Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated August 4, 2021 No. 907-p.] Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/907-2021-%D1%80#Text> [in Ukrainian].
8. Treshchov, M. Modernizatsiia enerhetychnoho sektoru yak priorytetnyi napriam poveioennoho vidnovlennia Ukrainy [Modernization of the energy sector as a priority direction of post-war reconstruction of Ukraine]. *Naukovyi visnyk: Derzhavne upravlinnia – Scientific Bulletin: State Administration*. 2024. № 1(15). 28-45. DOI: [https://doi.org/10.33269/2618-0065-2024-1\(15\)-28-45](https://doi.org/10.33269/2618-0065-2024-1(15)-28-45) [in Ukrainian].
9. Otsinka stiikosti enerhetychnoi infrastruktury Ukrainy [Assessment of the sustainability of the energy infrastructure of Ukraine]. *Analitichnyi zvit – Analytical report*. HO «Diksi Hrup», 2022 r. Retrieved from: <https://dixigroup.org/wp-content/uploads/2022/05/dixi-energy-resilience-str.pdf> [in Ukrainian].
10. Zavdannia ta funksii NKREKP [Tasks and functions of the National Commission for the Regulation of Energy and Utilities of Ukraine]. *Sait NKREKP*. Retrieved from: <https://www.nerc.gov.ua/?id=11804> [in Ukrainian].
11. Zakon Ukrainy “Pro Radu natsionalnoi bezpeky ta oborony Ukrainy”: vid 05.03.1998 № 183/98-VR. [On the National Security and Defense Council of Ukraine: Law of Ukraine dated 05.03.1998 No. 183/98-BP]. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/183/98-%D0%B2%D1%80#Text> [in Ukrainian].
12. Enerhetychnyi balans Ukrainy za 2020 rik [nergy balance of Ukraine for 2020]. Retrieved from: <https://stat.gov.ua/uk/datasets/enerhetychnyy-balans-ukrayiny-0> [in Ukrainian].
13. Zakon Ukrainy “Pro vnesennia zmin do deiakykh zakoniv Ukrainy shchodo vidnovlennia ta “zelenoi” transformatsii enerhetychnoi systemy Ukrainy”: vid 27.07.2023 № 3220-Ikh [On Amendments to Certain Laws of Ukraine on the Restoration and "Green" Transformation of the Energy System of Ukraine: Law of Ukraine No. 3220-IX of 27.07.2023.]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3220-20> [in Ukrainian].
14. Omelchenko, V. Dekarbonizatsiia ukrainskoi enerhetyky (ekonomiky): vplyv rosiiskoi ahresii, ambitni tsili ta potentsiini mozhlyvosti dlia Ukrainy v pisliavoiennyi period [Decarbonization of the Ukrainian Energy Sector (Economy): The Impact of Russian Aggression, Ambitious Goals and Potential Opportunities for Ukraine in the Post-War Period]. *Tsentr Razumkova – Razumkov Center*. Kyiv. 2022. Retrieved from: <https://razumkov.org.ua/images/2022/10/26/2022-Decarbonisation.pdf> [in Ukrainian].
15. Kononova, O.Ie., Shpatakova, O.L., Ivanenko, R.O. Enerhetychna stratehiia Ukrainy v umovakh viiny [Energy strategy of Ukraine in wartime]. *Investytsii: praktyka ta dosvid -Investments: practice and experience*. 2022. 11-12. 5-11 [in Ukrainian].
16. Omelchenko, V. Bazovi prychyny enerhetychnoi kryzy v OZP 2021-2022rr. [Basic causes of the energy crisis in the 2021-2022 economic and social development period]. Kyiv: Razumkov Tsentr – Razumkov Center. 2021. Retrieved from: <https://razumkov.org.ua/statti/bazovi-prychyny-energetychnoi-kryzy-v-ozp-2021-2022rr> [in Ukrainian].