

ДЕРЖАВНА ПОЛІТИКА, ІННОВАЦІЇ ТА СТАЛИЙ РОЗВИТОК

РОЗГОН ОЛЬГА ВОЛОДИМИРІВНА

кандидат юридичних наук, доцент, провідний науковий співробітник НДІ правового забезпечення інноваційного розвитку НАПрН України
ORCID 0000-0001-6739-3927

УДК 330.15

DOI 10.37772/2518-1718-2026-1(53)-4

ІНТЕГРАЦІЯ РОЗУМНИХ МЕРЕЖ ТА ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ В АВТОМОБІЛЬНОМУ СЕКТОРІ В КОНТЕКСТІ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПЕРЕХОДУ УКРАЇНИ¹

У статті досліджено електрифікацію транспорту та впровадження «розумних мереж» у поєднанні з відновлюваними джерелами енергії в автомобільному секторі як взаємопов'язані складові енергетичного переходу України в умовах декарбонізації економіки та імплементації міжнародних кліматичних зобов'язань держави. Проаналізовано трансформацію енергетичного сектору економіки України крізь призму інтеграції відновлюваних джерел енергії, розвитку зарядної інфраструктури та цифровізації енергосистеми.

Обґрунтовано, що електрифікація транспорту є не лише інструментом скорочення викидів парникових газів, а й чинником структурної модернізації енергетичного ринку, що потребує адаптації нормативно-правового регулювання та інституційної перебудови.

Визначено роль «розумних мереж» як технологічного і правового підґрунтя для синхронізації електромобільності з розподіленою генерацією та ринками допоміжних послуг. Виявлено нормативні прогалини у сфері регулювання електромобільності та цифровізації енергомереж, а також окреслено пріоритети гармонізації національного законодавства з *acquis* ЄС.

Обговорено перспективи інтеграції технологій «розумних мереж» у поєднанні з відновлюваними джерелами енергії в електротранспорті, бар'єри на шляху їх впровадження, а також їхній потенціал для підтримки цілей сталого розвитку у сфері автомобільного транспорту.

Доведено, що ефективна інтеграція електрифікації транспорту і моделі Smart Grid здатна забезпечити підвищення енергетичної безпеки, стійкість енергосистеми та конкурентоспроможність енергетичного сектору України в умовах європейської інтеграції.

У статті обґрунтовано необхідність формування спеціального регуляторного режиму для зарядної інфраструктури як елементу критичної енергосистеми. Визначено взаємозв'язок між розвитком розподіленої генерації, механізмами гнучкості та цифровізацією мереж. Запропоновано концептуальний підхід до електрифікації транспорту в межах моделі «EV–Smart Grid–ВДЕ» як інституційної основи енергетичного переходу України.

Ключові слова: розумні мережі, відновлювані джерела енергії, електромобіль, електрифікація транспорту, енергетичний перехід, двонаправлена зарядка електромобілів, транспортний засіб-мережа (V2G).

Постановка проблеми. *Енергетичний сектор економіки України переживає глибоку трансформацію, зумовлену поєднанням накопичених структурних дисбалансів та прямих наслідків військових дій. Аналіз торговельного балансу енергетичних ресурсів*

виявив постійну залежність від імпорту і високу чутливість енергетичної системи до зовнішніх потрясінь, які значно посилилися після 2014 року та в період повномасштабної війни. Це підтверджує вразливість національної енергетичної безпеки та

¹ Статтю підготовлено в межах теми фундаментального дослідження «Теоретико-правові засади інноваційного розвитку енергетичної системи України», РК УкрНТЕІ 0124U005149, 2026 р.



обмежені можливості внутрішнього ресурсного та генеруючого потенціалу [1].

Енергетична стійкість є ключовим елементом функціонування економіки та життєдіяльності України, проте застаріла інфраструктура зі значним рівнем зносу устаткування ставить під загрозу стабільність електропостачання. Аварії через дисбаланс в електромережах негативно впливають на повсякденне життя і продуктивність бізнесу. Одним зі стратегічних рішень цих проблем є впровадження «розумних мереж» (*Smart Grid*), які автоматизують управління енергосистемами та забезпечують постійний моніторинг і контроль [2].

Зауважимо, що *термін «розумні мережі»* використовуємо у значенні, наведеному в Законі України «Про енергетичну ефективність» від 21.10.2021 № 1818-IX.

Інтеграція електромобілів у концепцію *Smart Grid* є стратегічним інструментом підвищення енергоефективності шляхом трансформації транспортних засобів на активні елементи розподіленої енергосистеми. Це безпосередньо узгоджується з положеннями Закону України «Про енергетичну ефективність» від 21.10.2021 № 1818-IX щодо пріоритетності впровадження «розумних мереж».

Сучасний вектор глобального енергетичного розвитку визначається парадигмою декарбонізації, що зумовлює масштабну електрифікацію секторів, які традиційно базувалися на викопному паливі. Найбільш динамічні трансформації відбуваються на перетині енергетики і транспортної галузі. Конвергенція енергетичної та транспортної систем перетворює автомобільний сектор на активний елемент мережі, долаючи його традиційну роль як виключно пасивного споживача енергоресурсів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій за обраною темою свідчить, що вивчення теоретико-методологічної та практичної сутності «розумних мереж» були об'єктом наукових досліджень різних учених. Так, у своїх публікаціях категорію «розумні мережі» проаналізували Бугазіяну С. М. [2], Пуцентейло П. Р. [3], Ру J. та ін. [4].

Приділили увагу *інноваціям в автомобільному секторі*, у тому числі в аспекті електромобілів, у своїх наукових роботах такі вчені: Acharige S. S. G. та ін. [5], Ashfaq M. та ін. [6], Naseem H. та ін. [7], Sanjana D. та ін. [8], Прокопенко О. В., Vălk K. [9]. Серед учених проблематику *енергетичного переходу* досліджували Зварич Р. Є. і Харковський Б. В. [10], Шкурат М. Є. і Кузьменко Є. Г. [1].

Попри значний масив наукових праць, присвячених теоретичним засадам «розумних мереж», комплексному правовому аналізу їх упровадження в поєднанні з ВДЕ в автомобільному секторі приділено недостатньо уваги. Актуальним залишається погли-

блення розуміння правової природи цієї категорії та її системного впливу на трансформацію автомобільного сектору.

Метою статті є комплексний аналіз електрифікації транспорту і впровадження технологій *Smart Grid* і відновлюваних джерел енергії (далі — ВДЕ) як взаємопов'язаних складових енергетичного переходу України, а також дослідження правових, економічних та інституційних механізмів їх реалізації в умовах декарбонізації та європейської інтеграції.

Дослідження спрямоване на виявлення прогалин у правовому регулюванні зарядної інфраструктури, визначення ролі державної енергетичної та кліматичної політики у формуванні «розумних мереж», а також обґрунтування стратегічних напрямів удосконалення правового забезпечення енергетичного переходу.

Наукова новизна дослідження полягає у проведеному комплексному правовому аналізі електрифікації транспорту і впровадження систем *Smart Grid* у синергії з ВДЕ. На відміну від попередніх розвідок ці процеси розглядаються як взаємопов'язані елементи єдиного енергетичного переходу України, тоді як раніше вони досліджувалися фрагментарно або виключно в межах енергетичного права, або в контексті державної транспортної політики.

Виклад основного матеріалу. *Електрифікація транспорту як елемент декарбонізації та сектору енергетичної політики.* Електрифікація транспорту є ключовим елементом процесу декарбонізації енергетичного і транспортного секторів, оскільки електромобільність здатна суттєво зменшувати викиди парникових газів і залежність від викопних видів палива, але одночасно створює значне навантаження на електричну мережу в умовах зростаючої кількості зарядних сесій [5]. Інтелектуальне управління перетворює *електромобіль* із пасивного споживача на *активний елемент енергосистеми*, здатний надавати допоміжні послуги для її стабілізації [11].

При цьому традиційні режими експлуатації енергосистем не були спроектовані для такої концентрації нерегульованого споживання, що потребує нових моделей взаємодії з мережею, зокрема реалізації технологій *Grid-to-Vehicle (G2V)* та *Vehicle-to-Grid (V2G)*, що дозволяють не лише заряджати батареї автотransпортних засобів, але й використовувати їх як розподілені ресурси для балансування навантаження, регулювання частоти та інтеграції змінних ВДЕ [12].

Взаємозв'язок між *електрифікацією транспорту і розвитком ВДЕ* проявляється в тому, що електромобілі можуть бути мобільними накопичувачами енергії для згладжування коливань генерації з ВДЕ, що, у свою чергу, підсилює гнучкість і стійкість *Smart Grid*, які визначені як пріоритет у наукових і

практичних дослідженнях інтеграції *електромобіля* в розумні енергосистеми [5].

Електрифікація транспорту є одним із ключових глобальних векторів декарбонізації та структурної трансформації енерготранспортних систем, що реалізується насамперед через масове впровадження електромобілів. Функціонування таких транспортних засобів базується на заряджанні їхніх акумуляторних систем від електричної мережі, що фактично інтегрує транспортний сектор у загальну електроенергетичну інфраструктуру. У цьому контексті *процес заряджання* стає фундаментальним елементом електромобільності, оскільки він формує нові профілі навантаження, визначає напрями розвитку мережі зарядних станцій і зумовлює загальну ефективність функціонування всієї екосистеми електричного транспорту.

Однонаправлена зарядка (Grid-to-Vehicle, G2V) є традиційною моделлю енергетичної взаємодії електротранспортного засобу з електричною мережею, де передача електричної енергії здійснюється від електромережі до акумуляторної батареї автомобіля. *Двонаправлена зарядка* («від автомобіля до мережі») розглядається як спосіб інтеграції зростаючої кількості акумуляторних електромобілів в енергетичну систему [13].

Двонаправлена зарядка — це технологія, що дозволяє електромобілю не лише отримувати енергію з мережі, а й віддавати її назад для живлення зовнішніх пристроїв, будинків або енергосистеми загалом. Основні типи двонаправленої зарядки: зворотної передачі до мережі (V2G, V2H, V2L) і в режимі споживання енергії з мережі (Grid-to-Vehicle, G2V) [14].

Тобто *двонаправлена зарядка* — це технологія, що забезпечує можливість двостороннього перетоку електричної енергії між електромобілем і зовнішнім середовищем: як у режимі споживання енергії з мережі, так і в режимі її зворотної передачі до мережі або безпосереднього живлення споживачів.

Зауважимо, що впровадження технологій дво-спрямованого заряджання, зокрема концепції V2G (Vehicle-to-Grid), дає змогу вирівнювати добові коливання споживання в енергосистемі України. Використання електромобілів як маневрових потужностей та інструментів управління попиту дозволяє *накопичувати надлишкову генерацію з ВДЕ з її подальшим поверненням у мережу під час пікових навантажень*. Це безпосередньо сприяє виконанню цільових показників, які зазначені у статтях 9 та 15 Закону України «Про енергетичну ефективність» від 21.10.2021 № 1818-IX щодо підвищення ефективності кінцевого енергоспоживання.

Такий підхід не лише забезпечує *технологічну оптимізацію режимів роботи електричних мереж*, а й створює підґрунтя для розвитку ринку допоміж-

них послуг і послуг із балансування щодо енергосистеми, що відповідає стратегічним пріоритетам державної політики у *сфері енергоефективності*.

Регулювання *зарядної інфраструктури для електромобілів* охоплює комплекс *технічних, юридичних та економічних бар'єрів*, подолання яких є критично важливим для ефективної інтеграції електротранспорту в сучасні енергосистеми та переходу до моделі Smart Grid.

Так, до проблем, які *потребують розв'язання для підвищення рівня безпеки на транспорті та зменшення його негативного впливу на навколишнє природне середовище*, доцільно віднести недостатній розвиток інфраструктури заправних станцій альтернативними видами екологічно сприятливих моторних палив і зарядних станцій для електромобілів. Розв'язання цих проблем можливе шляхом упровадження економічних та інших заходів стимулювання використання в містах екологічно більш чистих видів транспорту, зокрема *електромобілів, стимулювання випереджального розвитку мережі зарядних станцій для електромобілів* (Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року та затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2025-2027 роках від 27.12.2024 № 1550).

Дія Закону України «Про деякі питання використання транспортних засобів, оснащених електричними двигунами, та внесення змін до деяких законів України щодо подолання паливної залежності і розвитку електрзарядної інфраструктури та електричних транспортних засобів» від 24.02.2023 № 2956-IX поширюється на відносини, що виникають при використанні транспортних засобів, оснащених електричними двигунами, та створенні/використанні інфраструктури для них. Проте законом *не врегульовано детального регуляторного режиму експлуатації та взаємодії з енергосистемою*, що зумовлює юридичну невизначеність щодо стандартів, участі операторів і правил взаємодії з операторами систем розподілу, зокрема, умов надання доступу до V2G (Vehicle-to-Grid), що дозволяв би електромобілям *передавати енергію в мережу або дім*, а також вимог щодо взаємодії зарядних станцій із ринками електроенергії та системою обліку. У ч. 7 ст. 5 цього закону лише зазначено, що будівництво, розміщення та експлуатація електрзарядних станцій та установок зберігання енергії може здійснюватися на земельних ділянках будь-якої категорії земель та/або виду цільового призначення.

Неузгодженість *процесів регулювання та інтеграції зарядної інфраструктури в енергосистему* створює критичні *пікові навантаження*, що призводить до зростання коефіцієнта гармонійних спотворень напруги та погіршення якості електроенергії. Водночас п. 33 ст. 1 Закону України «Про ринок

електричної енергії» визначає управління попитом як *інтегрований підхід* до коригування обсягів і графіків споживання з метою мінімізації *пікових навантажень*. Таким чином, виникає об'єктивна необхідність *упровадження механізмів балансування*, що дозволять гармонізувати роботу електротранспорту з режимами функціонування енергосистеми.

За відсутності інтелектуальних систем управління типу *Smart Grid*, що забезпечують динамічне балансування попиту через механізми V2G (Vehicle-to-Grid), *локальні розподільчі мережі втрачають здатність до самовідновлення та стабільної роботи*. *Впровадження «розумних мереж» дозволить вирівнювати ці ризики та гарантувати енергетичну стійкість в умовах масштабної електрифікації автомобільного сектору*.

Європейський зелений курс (European Green Deal) є стратегічною програмою ЄС, спрямованою на досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року, що нормативно закріплено в Regulation (EU) 2021/1119 [15]. Ця рамка визначає *декарбонізацію* як обов'язкову ціль, інтегруючи механізми вуглецевого регулювання, розвиток циркулярної економіки, масштабну електрифікацію транспорту і модернізацію енергосистем. У межах *європейської інтеграції* Україна імплементує наведені цілі через *гармонізацію національного законодавства*, зокрема відповідно до Закону України «Про засади державної кліматичної політики» від 08.10.2024 № 3991-IX.

Традиційні енергетичні системи, архітектура яких базується на принципах вертикальної ієрархії та односпрямованому потоці потужності від централізованої генерації до кінцевого споживача, вичерпали свій технологічний та економічний ресурс, оскільки досягли своєї технологічної та економічної межі ефективності. *Трансформація енергосистеми від застарілої ієрархічної архітектури до моделі розподіленої генерації є критичною умовою забезпечення національної стійкості в умовах воєнного стану*.

Сучасний світовий *енергетичний простір* визначається тріадою концепцій: *декарбонізація, децентралізація та діджиталізація (цифровізація) (Decarbonization, Decentralization, Digitalization)*. Ці три явища впливають на всі сфери нашого життя. Виявляється, що високовольтні транспортні лінії, технології зберігання енергії й так звана цифрова революція відіграють провідну роль у різних частинах світу в розвитку глибокої *декарбонізації електроенергетичного сектору*, нових бізнес-моделей енергетики на рівні розподілу та нових архітектур розподілу електроенергії [16].

Для України цей перехід перестав бути суто екологічним питанням, перетворившись на стратегію енергетичної стійкості. В умовах воєнного стану висока *концентрація генерації* виявилася критично

вразливою точкою, що зумовлює потребу в негайному перегляді архітектури енергосистеми. Стратегічний розвиток української енергетики передбачає заміну *вертикально-інтегрованої моделі на децентралізовану*. *Декарбонізація економіки України трансформується з екологічної ініціативи у фундамент національної безпеки*. Вона забезпечує енергетичну автономність через перехід до ВДЕ та суттєво знижує вразливість критичної інфраструктури перед зовнішніми загрозами.

Шкурат М. і Кузьменко Є. виявили, що подальша *трансформація енергетичної системи України* має базуватися на поєднанні відновлення пошкодженої інфраструктури, розвитку маневрових і балансуєчих потужностей, *децентралізованої відновлюваної генерації та підвищення енергоефективності* [1].

16.03.2022 року відбулася одна із ключових подій української енергетики: *національна енергосистема* об'єдналася з європейською мережею операторів системи передачі електроенергії ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity). На енергетичній карті Україна вже стала членом ЄС [17].

Розподілена генерація відіграє ключову роль у трансформації сучасних енергосистем, оскільки передбачає виробництво електричної енергії об'єктами малої та середньої потужності безпосередньо у місцях її споживання. Це дозволяє відмовитися від виключної залежності від великих централізованих електростанцій на користь гнучких локальних рішень.

Перехід від ієрархічного управління макрооб'єктами (ТЕС, АЕС) до інтеграції розподілених активів, зокрема електромобілів, зумовлений *упровадженням технологій Smart Grid*. Цей стратегічний вектор, нормативно закріплений у *Концепції впровадження «розумних мереж» в Україні до 2035 року*, схвалений розпорядженням Кабінету Міністрів України від 14.10.2022 № 908-р.

Застосування технологій Smart Grid і перехід на ВДЕ були визначені як *критичні шляхи для зменшення втрат енергії та пом'якшення впливу на навколишнє середовище*, що сприятиме технологічній трансформації сектору. Інтеграційні процеси, спрямовані на синхронізацію з ENTSO-E, вимагають не лише технічних реформ, але й системних удосконалень регуляторної бази. *Екологічна трансформація енергетичного сектору економіки України* є невід'ємним компонентом інтеграції, що підтверджується необхідністю прийняття суворих екологічних стандартів ЄС у відповідь на глобальні виклики, такі як зміна клімату. Перехід на ВДЕ, підтримуваний можливостями Smart Grid, не лише сприятиме збереженню навколишнього середовища, але й зміцнить енергетичну безпеку України та зменшить її залеж-

ність від викопного палива. Підхід до модернізації, активного впровадження інноваційних технологій, таких як Smart Grid, створить необхідні передумови для забезпечення енергетичної безпеки, економічної ефективності та екологічної стійкості. *Досягнення синергії* між цими компонентами є критичним фактором успіху в трансформації енергетичного сектору України, який, у свою чергу, відіграє вирішальну роль у її інтеграції в європейській енергетичний простір [10].

Цифровізація є фундаментальною умовою функціонування децентралізованих енергосистем, складність управління якими зумовлена *стохастичною* (випадковість, непередбачуваність) *природою ВДЕ* та багатовекторністю потоків потужності. Впровадження «розумних мереж» (*Smart Grids*) дозволяє досягти динамічного балансування енергосистеми.

Нормативно-правові засади впровадження «розумних мереж» та інтеграції ВДЕ в автомобільному секторі. Трансформація енергетичного сектору України, зумовлена впровадженням «розумних мереж» у поєднанні з ВДЕ в автомобільному секторі, базується на системі нормативно-правових актів у сферах електроенергетики, альтернативної енергетики та автомобільного транспорту.

Законодавчий фундамент трансформації енергетичного сектору України в напрямі розбудови Smart Grid ґрунтується на інтеграції механізму Net Billing (ст. 71 Закону України «Про ринок електричної енергії» від 13.04.2017 № 2019-VIII) та стандартів Network Code on Requirements for Grid Connection of Generators (NC RfG). Це дозволяє перетворити *стохастичні вузли розподіленої генерації на керовані елементи системи* через запровадження правового статусу активного споживача (ст. 58-1 зазначеного Закону).

Розвиток інфраструктури е-мобільності (статті 1, 3 Закону «Про деякі питання використання транспортних засобів, оснащених електричними двигунами, та внесення змін до деяких законів України щодо подолання паливної залежності і розвитку електрзарядної інфраструктури та електричних транспортних засобів» від 24.02.2023 № 2956-IX) у синергії з положеннями Directive (EU) 2019/944 [18] та *Концепції впровадження «розумних мереж» в Україні до 2035 року»* від 14.10.2022 № 908-р створює нормативне підґрунтя для впровадження технологій Demand Response та Vehicle-to-Grid. У цій системі інтелектуальний облік та автоматизація згідно з *Кодексом систем розподілу* від 14.03.2018 № 310 забезпечують технічну стійкість мереж і перехід до активної участі споживачів у ринку допоміжних послуг.

Regulation (EU) 2016/631 (NC RfG) [19] є базовим мережевим кодексом ЄС, що встановлює техніч-

ні вимоги до підключення генеруючих модулів до електроенергетичних систем. В Україні його положення імплементовані через Розділ IV *Кодексу систем розподілу* від 14.03.2018 № 310, який визначає технічні умови приєднання генеруючих установок до мереж операторів систем розподілу (ОСР). Це дає змогу інтегрувати навіть малопотужні джерела розподіленої генерації до механізмів первинного регулювання частоти. Зазначена вимога є критично важливою в умовах *зростання частки інверторної генерації* (ВДЕ і систем накопичення енергії) та зниження системної інерції, оскільки забезпечує участь мікрогенерації у підтриманні балансу потужності та запобіганні аварійним частотним відхиленням.

Directive (EU) 2019/944 закріплює нову модель участі споживача на ринку електричної енергії, трансформуючи його зі статусу пасивного користувача у повноцінного ринкового суб'єкта. Положення статей 15 та 31 Directive (EU) 2019/944 формують *правову основу для впровадження технологій Vehicle-to-Grid (V2G) та систем управління попитом (Demand Response)*, оскільки класифікують електромобілі та інші децентралізовані ресурси як інструменти ринкової гнучкості. Таким чином, Directive (EU) 2019/944 інституціоналізує (впорядковує) інтеграцію *транспортного сектору до енергетичного ринку*, створюючи нормативні передумови для розвитку «розумних мереж» і двоспрямованих енергетичних потоків.

Відповідно до *Концепції впровадження «розумних мереж» в Україні до 2035 року* від 14.10.2022 № 908-р пріоритетом є перехід до Advanced Metering Infrastructure (AMI) для двоспрямованого обміну даними та автоматизація підстанцій (SAS) [19]. Заходи спрямовані на активізацію споживачів, підвищення керованості мереж і стійкості енергосистеми. *Стратегія розвитку розподіленої генерації на період до 2035 року* та операційний план з її реалізації на 2024–2026 роки від 18.07.2024 № 713-р є фундаментальними документами для енергетичного переходу України. Вони фокусуються на децентралізації енергосистеми, впровадженні Smart Grid і системній інтеграції ВДЕ.

Отже, *законодавчий фундамент трансформації енергетичного сектору України* пройшов еволюцію від декларативної підтримки у Законі «Про альтернативні джерела енергії» від 20.02.2003 № 555-IV до формування конкурентної екосистеми. Остання включає інструменти Net Billing (Закон України «Про внесення змін до деяких законів України щодо відновлення та «зеленої» трансформації енергетичної системи України» від 30.06.2023 № 3220-IX) і правове регулювання установок зберігання енергії (Закон України «Про внесення змін до деяких законів

України щодо розвитку установок зберігання енергії» від 15.02.2022 № 2046-IX).

Ця динаміка, закріплена базовим Законом України «Про ринок електричної енергії» від 13.04.2017 № 2019-VIII, демонструє *зміну парадигми*: від простого нарощування потужностей до забезпечення гнучкості, децентралізації та активної інтеграції споживачів у ринок. Такий підхід є визначальним для зміцнення *енергетичної безпеки та успішної євроінтеграції України*.

Енергетичний перехід України являє собою стратегічну трансформацію від вразливої централізованої моделі енергопостачання до гнучкої цифровізованої архітектури «розумних мереж» (Smart Grid). *Повна синхронізація* енергосистеми України з *ENTSO-E* у межах цієї трансформації запровадження ринкових механізмів, зокрема Net Billing, а також розвиток систем накопичення енергії (Energy Storage) сприяють формуванню моделі активного споживача, за якої домогосподарства, громади та бізнес є не лише споживачами, а й учасниками енергетичного ринку. Така *децентралізована енергетична архітектура* є не лише інструментом декарбонізації, але й важливим чинником підвищення енергетичної стійкості держави, оскільки створює більш розподілену та адаптивну систему енергопостачання, здатну ефективно функціонувати навіть в умовах сучасних безпекових викликів.

Правові, економічні та інституційні механізми енергетичного переходу України формуються як комплекс взаємопов'язаних інструментів державної політики у сфері енергетики і клімату, спрямованих на декарбонізацію, підвищення енергетичної безпеки та інтеграцію до енергетичного простору ЄС.

Вуглецеве регулювання в Україні реалізується через систему екологічного оподаткування, передбачену Податковим кодексом України від 02.12.2010 № 2755-VI (Екологічне оподаткування в Україні регулюється Розділом VIII). Водночас національна кліматична політика формується з урахуванням міжнародних зобов'язань держави у межах Паризької угоди, ухваленої 12.12.2015 року в рамках Рамкової конвенції ООН про зміну клімату, спрямованої на обмеження підвищення глобальної температури до 1,5–2 °С. Україна ратифікувала зазначену угоду на підставі Закону України «Про ратифікацію Паризької угоди» від 14.07.2016 № 1469-VIII), взявши на себе зобов'язання щодо скорочення викидів парникових газів до 2030 року. Додатковим фактором трансформації національної системи вуглецевого регулювання є поступова адаптація до кліматичних інструментів ЄС, зокрема механізму прикордонного вуглецевого коригування Carbon Border Adjustment Mechanism, запровадженого в межах European Green Deal, який з 01.10.2023 року передбачає застосування спеціаль-

них вимог до імпорту вуглецевосмної продукції на ринок ЄС.

Стимулювання ВДЕ здійснюється на підставі Закону України «Про альтернативні джерела енергії» від 20.02.2003 № 555-IV та Закону України «Про ринок електричної енергії» від 13.04.2017 № 2019-VIII, які передбачають механізми «зеленого» тарифу, аукціонної підтримки та інтеграції виробників ВДЕ до конкурентного ринку.

Інституційна складова енергопереходу базується на реформуванні повноважень і забезпеченні незалежності *НКРЕКП* відповідно до Закону України «Про Національну комісію, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг» від 22.09.2016 № 1540-VIII, що є критичним для прозорого регулювання ринків. Водночас розвиток ринку допоміжних послуг, передбачений Законом України «Про ринок електричної енергії» від 13.04.2017 № 2019-VIII та *Кодексом системи передачі* від 14.03.2018 № 309, створює необхідні передумови для *балансування енергосистеми та інтеграції ВДЕ*. Впровадження цих механізмів гнучкості є ключовим елементом сучасної моделі енергетичного переходу України, що дозволяє адаптувати національну енергосистему до глобальних стандартів декарбонізації.

Глобальний енергоперехід, закріплений на національному рівні (зокрема, у Законі України «Про альтернативні джерела енергії» від 20.02.2003 № 555-IV), зумовлює *трансформацію енергетичної моделі від статичної до динамічної*. Таким чином, держава фактично легітимізує перехід від застарілої централізованої енергосистеми до децентралізованої цифрової мережі.

Тенденціями в дослідженнях інфраструктури заряджання *електромобілів* є такі: передова інтеграція «розумних мереж», системи «*транспортний засіб-мережа*» (V2G) та *стійкі ВДЕ для майбутнього стійкого розгортання електромобілів* [8].

Загалом послуга з постачання або виробництва електроенергії з електромобіля для задоволення потреб енергетичного об'єкта або кінцевого користувача відома як послуги V2G [20]. Відповідно, сучасні дослідження інфраструктури електромобільності зосереджені на трансформації електромобіля з виключно транспортного засобу на активний елемент енергетичної системи. Така трансформація реалізується через інтеграцію транспортного засобу з електромережею за моделлю Vehicle-to-Grid (V2G), відповідно до якої електромобілі можуть функціонувати як мобільні накопичувачі енергії та брати участь у балансуванні енергосистеми. Важливим напрямом є також інтеграція електромобільної інфраструктури з концепцією «розумні мережі» (Smart Grid), що передбачає застосування координованого або «розум-

ного» заряджання на основі алгоритмів штучного інтелекту та прогнозу аналітики для оптимізації попиту на електроенергію. Технологічною основою такої взаємодії є сучасні стандарти комунікації, зокрема *ISO 15118*, які забезпечують безпечний двосторонній обмін даними між електромобілем і зарядною станцією. Окремим напрямом досліджень є поєднання зарядної інфраструктури з ВДЕ, що передбачає створення автономних зарядних хабів на базі сонячної та вітрової генерації, а також інтеграцію систем накопичення енергії *Battery Energy Storage System (BESS)* безпосередньо у зарядні пункти з метою компенсації переривчастості виробництва електроенергії з ВДЕ.

При цьому *ключовими механізмами цієї трансформації є впровадження:*

- ВДЕ та стимулювання вітрових і сонячних станцій перетворює споживачів на активних учасників ринку, що зменшує навантаження на магістральні мережі та мінімальний вплив на довкілля;

- систем накопичення енергії (наприклад, літій-іонних), які інтегровані в мережу або приватне домоволодіння для балансування споживання, що дозволяє згладжувати піки споживання;

- «розумних мереж» для ефективного управління потоками енергії, забезпечення двостороннього зв'язку між виробником і споживачем, що автоматично балансує попит і пропозицію;

- системи зберігання енергії (*Energy Storage System — ESS*), які дозволяють балансувати нестабільну генерацію, накопичуючи енергію в певній формі (хімічній, кінетичній або потенційній) для її подальшого використання в періоди дефіциту або пікового споживання.

Запропонована модель інтеграції електромобільності, ВДЕ та «розумних мереж» є важливим чинником *забезпечення енергетичної стійкості держави* в умовах воєнного стану та глобальних процесів декарбонізації. Її реалізація передбачає *поступовий перехід* до стійкої енергетики шляхом трансформації структури генерації електроенергії, заміни викопних видів палива ВДЕ, а також зміни підходів до управління енергетичними системами через цифровізацію, децентралізацію та інтеграцію нових технологічних рішень.

У цьому контексті доцільним є *аналіз системних змін, що виникають у процесі глобального енергетичного переходу* від традиційної енергетики, заснованої на використанні викопного палива, до моделі, орієнтованої на застосування ВДЕ (сонячної, вітрової, біоенергетики) та впровадження низьковуглецевих технологій, які забезпечують зниження викидів парникових газів, підвищення гнучкості енергосистеми та посилення її енергетичної безпеки.

1) Трансформація топології електроенергетичної мережі (*Power Grid*), яка є критичною ланкою в енергопереході, відбувається через:

- *впровадження розподіленої генерації (РГ) та активних споживачів* (механізм *Self-consumption* згідно з вимогами *Directive (EU) 2023/2413* [21] як частина пакету «Fit for 55»)) перетворює мережу на складну систему із двоспрямованими (реверсивними) потоками. Впровадження розподіленої генерації та активних споживачів відбувається через механізм *Self-consumption* як модель, яка дозволяє споживачам виробляти електроенергію для власних потреб, а надлишки віддавати в мережу з можливістю їх використання пізніше як ключовий елемент переходу від моделі «зеленого тарифу» до моделі *Net Billing*. Механізм *self-consumption* у *Кодексі систем розподілу (КСР)* від 14.03.2018 № 310 відображений через інститут «активних споживачів», що дозволяє встановлювати генеруючі установки для власного споживання без зміни технічних умов приєднання, якщо потужність не перевищує договірну. КСР вимагає встановлення двонаправлених вузлів обліку для годинної фіксації перетоків і дотримання вимог до інверторів для паралельної роботи з мережею.

Directive (EU) 2023/2413 як частина пакету «Fit for 55» (*RED III*) суттєво посилює механізми *self-consumption* (самоспоживання) ВДЕ, роблячи їх ключовим елементом енергопереходу, трансформує роль споживача з пасивного покупця на активного учасника ринку. Це вимагає перегляду *Кодексу систем розподілу* від 14.03.2018 № 310, зокрема, адаптацію до зростаючої частки ВДЕ, підвищення надійності та цифровізацію (оптимізацію схем видачі потужності, реконструкцію мереж, а також обов'язкове інформування про зміни топології), обов'язкові перспективні плани розвитку (ПРСР), що враховують схеми видачі потужності ВДЕ, реконструкцію мереж і прогнози попиту, забезпечуючи надійність приєднання, а також врахування *Енергетичної стратегії України на період до 2050 року* від 21.04.2023 № 373-р. Отже, *Кодекс систем розподілу* від 14.03.2018 № 310 потребує подальшої адаптації до вимог *Directive (EU) 2023/2413*, зокрема, спрощення дозвільних процедур (закріплення процедури «мовчазної згоди» для малих установок і скорочення термінів надання ТУ на приєднання);

- *створення енергетичної спільноти або впровадження механізму колективного самоспоживання для ОСББ*. Це дозволяє не лише забезпечити будинок світлом під час блекаутів, а й суттєво економити, споживаючи власну «зелену» енергію. Закон України «Про внесення змін до деяких законів України щодо відновлення та «зеленої» трансформації енергетичної системи України» від 30.06.2023 № 3220-IX як фундаментальний НПА вніс зміни до близько 18

НПА, розвиваючи малу розподілену генерацію, що спрямований на відновлення та «зелену» трансформацію енергетичної системи, запровадив механізм самоспоживання (Net Billing), право на створення енергетичних спільнот, можливість експорту електроенергії з ВДЕ та сертифікацію її походження;

– *приєднання гібридних установок в Україні*, що дозволяє активним споживачам установлювати генеруючі потужності, включаючи системи зберігання, для власного споживання та продажу надлишків, а активні споживачі можуть допомагати ОСР керувати локальними мережами, уникаючи перевантажень трансформаторів. У Законі України «Про ринок електричної енергії» від 13.04.2017 № 2019-VIII (ст. 58-1) безпосередньо урегульовані права та обов'язки активних споживачів;

– *застосування Smart Metering та цифровізації обліку енергії* перейшли у фазу нормативних вимог, спрямованих на створення прозорого ринку через платформу Datahub. *Концепція впровадження «розумних мереж»* від 14.10.2022 № 908-р передбачає масштабну модернізацію електромереж, включаючи впровадження «розумного обліку» електроенергії (Smart Metering) для споживачів, цифровізацію підстанцій та автоматизацію систем розподілу протягом 2022-2035 р. Мета цього заходу – перехід на європейські стандарти (Smart Grid), що забезпечить точніший облік, можливість дистанційного зняття показань та інтеграцію ВДЕ;

– *встановлення недискримінаційних тарифів на послуги з розподілу та передачі електроенергії* регульовані НКРЕКП, що встановлено *Кодексом систем розподілу* від 14.03.2018 № 310 та *Кодексом системи передачі* від 14.03.2018 № 309.

Отже, впродовж останніх років НКРЕКП внесла низку суттєвих змін до *Кодексу систем розподілу* від 14.03.2018 № 310. Зазначені зміни були зумовлені необхідністю імплементації положень Закону України «Про внесення змін до деяких законів України щодо відновлення та «зеленої» трансформації енергетичної системи України» від 30.06.2023 № 3220-IX (щодо самоспоживання), зокрема щодо розвитку механізмів самоспоживання електроенергії, а також потребою оперативного реагування на кризові умови функціонування енергосистеми, спричинені воєнними загрозами та дефіцитом маневрових потужностей.

У результаті було спрощено процедури приєднання об'єктів розподіленої генерації до мереж розподілу, запроваджено правовий статус «активного споживача», врегульовано встановлення двонаправлених засобів комерційного обліку з модулями зв'язку для *функціонування механізму Net Billing*, передбачено спрощені умови підключення когенераційних і газопоршневих установок, а також норма-

тивно визначено підходи до інтеграції систем накопичення енергії (Energy Storage). Крім того, запровадження електронних сервісів, зокрема створення особистих кабінетів замовників приєднання, забезпечило можливість подання документів та моніторингу статусу заявок на приєднання об'єктів розподіленої генерації в електронній формі, що сприяє підвищенню прозорості та ефективності взаємодії між операторами систем розподілу й учасниками ринку електричної енергії.

2) Дефіцит системної інерції, спричинений витісненням синхронної генерації інверторними джерелами, трансформує NC RfG із суто технічного регламенту в фундаментальний інструмент забезпечення динамічної стійкості та живучості енергосистеми.

Станом на 2026 рік триває процес перегляду та модернізації Regulation (EU) 2016/631 (NC RfG) [19] у межах ініціативи так званого CNC 2.0, спрямованої на адаптацію мережевих кодексів до нових технологічних умов енергетичного переходу. Зокрема, Європейська комісія спільно з ENTSO-E [22] здійснюють підготовку змін до мережевих кодексів із метою інтеграції таких технологій, як системи накопичення енергії (energy storage), електромобільність та інверторні системи з функцією Grid-Forming (формування мережі).

Regulation (EU) 2016/631 встановлює ієрархію технічних вимог до генеруючих модулів (типи А, В, С, D), які спрямовані на забезпечення частотної та напругової стабільності енергосистеми в умовах поступового зменшення частки синхронної генерації. Нормативні положення документа передбачають обов'язок генеруючих установок витримувати відхилення частоти, забезпечувати первинну частотну реакцію, обмежувати швидкість зміни активної потужності, а також виконувати вимоги щодо роботи під час аварійних режимів. Таким чином, регуляторна архітектура NC RfG фактично виконує *компенсаторну функцію* щодо втрати природної електромеханічної інерції, характерної для традиційних турбогенераторів теплових та атомних електростанцій.

Водночас сучасна еволюція мережевих кодексів ЄС в енергетиці (Network Codes), зокрема у межах технічних стандартів ENTSO-E, поступово виходить за межі первинної концепції Regulation (EU) 2016/631 (NC RfG) у напрямі впровадження технологій Grid-Forming (GFM), які забезпечують підвищення стабільності, гнучкості та надійності електроенергетичних систем із високою часткою ВДЕ. Якщо чинна архітектура NC RfG переважно орієнтована на модель Grid-Following (GFL), за якої інверторні установки синхронізуються з уже сформованими параметрами мережі, то зростаючий дефіцит системної інерції зумовлює необхідність переходу до інвертор-

них технологій, які забезпечують високу ефективність перетворення енергії та інтелектуальне керування параметрами мережі, здатних самостійно формувати опорну частоту та напругу, виконуючи функцію так званої «віртуальної синхронної машини». У цьому контексті виконання вимог NC RfG набуває не лише технічного, але й правового значення, оскільки є складовою міжнародних зобов'язань України у межах Energy Community та однією з передумов повноцінної інтеграції до континентальної енергосистеми ENTSO-E. В умовах воєнного стану і втрати значної частини генеруючих потужностей великих теплових та атомних електростанцій українська енергосистема об'єктивно стає менш інерційною («легшою»), що підвищує ризик швидких відхилень частоти (RoCoF) і системних розсинхронізацій, актуалізуючи потребу в упровадженні сучасних інверторних технологій.

Отже, за таких умов *імплементація* алгоритмів керування, вимог до динамічної стійкості, передбачених Regulation (EU) 2016/631, набуває критичного значення. Фактично нормативне впровадження вимог NC RfG та їхній подальший розвиток у напрямі технологій Grid-Forming (формування параметрів мережі інверторами) є ключовим механізмом запобігання частотному колапсу при масштабній інтеграції сонячної та вітрової генерації. Це гарантує довгострокову стійкість енергосистеми як в умовах воєнного стану, так і в період післявоєнного відновлення.

3) Інформаційна складність управління енергосистемами зумовлює перехід від контролю обмеженої кількості макрооб'єктів до координації мільйонів *стохастичних вузлів* у межах концепції *Smart Grid* (Концепція впровадження «розумних мереж» від 14.10.2022 – Розділ II; ст. 1, 33 Закону України «Про ринок електричної енергії» від 13.04.2017 № 2019-VIII; Кодекс систем розподілу від 14.03.2018 № 310 – Розділ IV, Розділ XI). Координація мільйонів стохастичних вузлів є ідеальним технічним описом того, що в *Енергетичній стратегії України на період до 2050 року* від 21.04.2023 № 373-р. називають «розумними мережами та енергетичною незалежністю споживача».

Рішення щодо подолання інформаційної складності в *Енергетичній стратегії України до 2050 року* від 21.04.2023 № 373-р полягає у впровадженні технологій *Smart Grid*. Це автоматизовані системи, що за допомогою алгоритмів *Big Data* та *штучного інтелекту* в реальному часі координують мільйони вузлів мережі. *Smart Grid* — це модернізовані електромережі, які використовують інноваційні комунікаційні технології для збору даних про виробництво та споживання енергії. Це дозволяє автоматично підвищувати ефективність, надійність, економічну

вигоду та стійкість процесів розподілу електроенергії між усіма учасниками ринку [3].

Відповідно, така трансформація функціонування енергосистем зумовлює необхідність переходу від традиційних детермінованих моделей прогнозування до *імовірнісних алгоритмів*, що ґрунтуються на технологіях штучного інтелекту та аналізі великих масивів даних. Зокрема, використання підходів *Big Data* передбачає безперервний збір, обробку та зберігання значних обсягів інформації, отриманої з інфраструктури розумного обліку *Advanced Metering Infrastructure (AMI)* та мережевих сенсорів, що генерують терабайти даних у режимі реального часу.

Методи *Machine Learning* забезпечують підвищення точності прогнозування споживання електроенергії та генерації з ВДЕ з урахуванням метеорологічних параметрів і поведінкових характеристик споживачів. Водночас застосування *Multi-agent systems* дозволяє реалізувати децентралізовані механізми управління, за яких окремі вузли енергосистеми здатні автономно приймати операційні рішення без безпосередньої участі центрального диспетчерського управління, що підвищує гнучкість, адаптивність і стійкість енергетичних мереж нового покоління.

4) Економічна невідповідність. Традиційні ринкові механізми, розраховані на пасивне споживання, стають неефективними. Нова парадигма потребує інтеграції механізмів гнучкості (*Demand Response*, накопичувачів енергії *BESS*, віртуальних електростанцій *VPP*), які здатні компенсувати добову нерівномірність генерації ВДЕ. Так, *Кодексом системи передачі* від 14.03.2018 № 309 створено *технічний коридор*, який дозволив об'єднувати потужності (Розділ V, Розділ VI), а ст. 1, 30-2 Закону України «Про ринок електричної енергії» від 13.04.2017 № 2019-VIII (агрегація – це процес об'єднання багатьох дрібних розподілених енергоресурсів (DER) в один керований портфель. Вона проявляється у *віртуальній електростанції*, яка не існує без об'єднання сотень сонячних панелей, вітряків та акумуляторів у єдину мережу, яка веде себе як одна велика «традиційна» електростанція; *Demand Response* через управління попитом, де агрегатор, який об'єднує тисячі споживачів, може запропонувати системному оператору значне зниження навантаження (МВт), що є повноцінним товаром на ринку; *Накопичувачі енергії (BESS)*, які працюють синхронно завдяки командам агрегатора та за схемою: «*генерація підлаштовується під споживання*», тобто агрегація вирішує «економічну невідповідність» (Технічні вимоги до установок зберігання енергії (УЗЕ) в Україні регламентуються Главами 13 та 14 *Кодексу системи передачі (КСП)*).

Таким чином, подальша експлуатація енергосистем у межах застарілої архітектурної парадигми

об'єктивно зумовлює зростання питомих витрат на балансування та підвищення ризиків зниження надійності енергопостачання. У зв'язку з цим виникає необхідність структурного переходу до мультимодальних інтелектуальних енергосистем із високим рівнем цифровізації, в межах яких енергетичні та інформаційні потоки функціонують як інтегровані та двоспрямовані.

Така трансформація істотно змінює модель енергетичного ринку України, переорієнтовуючи її від концепції пасивного споживання до стимулювання активної ролі споживача як повноцінного учасника енергетичних відносин. Відповідно, традиційні стратегії, що ґрунтувалися на припущенні стабільно низьких цін на енергоносії та відсутності мотивації до підвищення енергоефективності, втрачають свою актуальність в умовах посилення мережевих обмежень і зростання вимог до гнучкості енергосистем.

Отже, проаналізовані механізми дозволяють встановити причинно-наслідковий зв'язок між розвитком ВДЕ та електромобільності і необхідністю переходу до інтелектуальних енергетичних систем типу Smart Grid, оскільки саме така модель забезпечує ефективне управління децентралізованою генерацією, балансування навантаження та інтеграцію нових енергетичних технологій у функціонування сучасної енергосистеми.

Висновки. Електрифікація транспорту є не лише технологічним процесом, а й структурним чинником трансформації енергетичного сектору економіки України. Законодавчий фундамент такої трансформації загалом відповідає вектору європейської інтеграції, однак потребує подальшої систематизації та гармонізації з *acquis* ЄС у частині розвитку механізмів гнучкості, агрегації та двонаправленої зарядки. Нормативно неузгоджена інтеграція зарядної інфраструктури може створювати додаткові ризики для стабільності функціонування енергосистеми.

Упровадження «розумних мереж» (Smart Grid) є об'єктивною передумовою ефективною інтеграції електромобільності та ВДЕ. Така модель перетворює автомобільний сектор із пасивного споживача енергії на активний елемент енергосистеми. Ключовий ефект Smart Grid полягає у зміні ролі електромобілів — від звичайних споживачів електроенергії до мобільних накопичувачів енергії. Це створює можливість інтеграції ВДЕ у автомобільний сектор через технологію Vehicle-to-Grid (V2G), яка дозволяє акумулювати надлишки генерації з сонячних і вітрових електростанцій у батареях електромобілів і повертати їх у мережу в періоди пікового навантаження.

У свою чергу, енергетичний перехід України має реалізовуватися через поєднання правових, економічних і цифрових механізмів за умови чіткої інституційної координації державної політики. Перспективною моделлю розвитку є формування інтегрованої енергетичної екосистеми «електромобіль – Smart Grid – ВДЕ», здатної забезпечити підвищення енергетичної безпеки, декарбонізацію економіки та підвищення стійкості національної енергосистеми.

Автором обґрунтовано інтегрований підхід до впровадження «розумних мереж» у поєднанні з ВДЕ в автомобільному секторі як необхідної передумови системної трансформації енергетики як галузі економіки.

У статті здійснено дослідження, спрямоване на розширення наукових знань щодо ідентифікації ключових проблем у сфері забезпечення енергетичної ефективності, а також визначення можливих шляхів їх вирішення на основі аналізу концепції Smart Grid у контексті її впровадження разом із ВДЕ в автомобільному секторі. У результаті дослідження поглиблено наукове уявлення про основні бар'єри розвитку енергоефективної інфраструктури та запропоновано підходи до їх подолання шляхом інтеграції технологій «розумних мереж».

ЛІТЕРАТУРА

1. Шкурат М., Кузьменко Є. Аналіз трансформації енергетичної системи України. *Herald of Khmelnytskyi National University. Economic Sciences*. 2026. № 350(1). С. 12-18. <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2026-350-1>
2. Бугазіянус С. Smart grid аналіз та його можливості у створенні сучасних організаційно-правових механізмів для системи енергетичної безпеки України. *Теоретичні та прикладні питання державотворення*. 2025. Вип. 33. С. 198-211. <https://doi.org/10.35432/tisb332025330148>.
3. Пуцентейло П.Р. Концепція Smart Grid: технологічні, організаційні та економічні аспекти розвитку енергетичної сфери. *Інноваційна економіка*. 2023. № 1. С. 137-150. <https://doi.org/10.37332/2309-1533.2023.1.19>.
4. Ru J., Gillott M., Shipman R. Vehicle-to-Grid (V2G) Research: A Decade of Progress, Achievements, and Future Directions. *Energies*. 2025. Vol.18 (23). P.6148. <https://doi.org/10.3390/en18236148>
5. Acharige S. S. G. et al. Grid integration of electric vehicles - Impact assessment and remedial measures. *Journal of Power Sources*. 2025. Vol. 650. P. 236697. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.236697>
6. Ashfaq M., Butt, O., Selvaraj, J., Rahim, N. Assessment of electric vehicle charging infrastructure and its impact on the electric grid: A review. *Int. J. Green Energy*. 2021. Vol. 18. P. 657–686. <https://doi.org/10.1080/15435075.2021.1875471>

7. Naseem H. et al. Smart Charging and Vehicle-to-Grid Integration of Electric Vehicles: Technical Insights, Cybersecurity Risks, and Mobility-Oriented Control Strategies. *Applied Sciences*. 2026. Vol. 160 (4). P.1748. <https://doi.org/10.3390/app16041748>
8. Sanjana D. et al. Next-Generation Electric Vehicle Charging Technologies: A Holistic Review of Innovations, System-Level Benefits, and Integration Challenges. *2025 International Conference on Electrical, Electronics, and Computer Science with Advance Power Technologies - A Future Trends (ICE2CPT)*, Jamshedpur, India, 29–31 October 2025. 2025. P.1–6. <https://doi.org/10.1109/ice2cpt66440.2025.11340135>
9. Smart Machines and Technologies at the Service of Mankind: Monograph / Gen. edit. Olha Prokopenko, Kristjan Välik, Tallinn: Teadmus OÜ, 2024, 229 p. URL: https://conference.euas.eu/2024/wp-content/uploads/2024/12/Monograph_2024.pdf
10. Зварич Р., Харковський Б. «Розумна інтеграція енергетичної системи України до єдиного енергетичного ринку ЄС: виклики та перспективи». *Журнал європейської економіки*. 2025. т. 24, № 2. С. 246-273. <https://doi.org/10.35774/jee2025.02.246>
11. Kumar P. et al. A comprehensive review of vehicle-to-grid integration in electric vehicles: Powering the future/ *Energy Conversion and Management: X*. 2025. Vol.25. P.100864. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100864>
12. Yang Y. et al. Review of vehicle to grid integration to support power grid security. *Energy Reports*. 2024. Vol. 12. P. 2786–2800. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.08.069>
13. Wohlschlager D. et al. Green Light for Bidirectional Charging? Unveiling Grid Repercussions and Life Cycle Impacts. *Advances in Applied Energy*. 2024. P. 100195. <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2024.100195>
14. Що означає V2G? Автомобіль до мережі для зарядки електромобіля? MIDA. 2025. URL: <https://www.evsegroup.com/uk/news/what-does-v2g-mean-vehicle-to-grid-for-electric-car-charging>.
15. Regulation (EU) 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC) No 401/2009 and (EU) 2018/1999 ('European Climate Law'). URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2021/1119/oj/eng>
16. Silvestre M. L. Di et al. How Decarbonization, Digitalization and Decentralization are changing key power infrastructures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 93. P. 483–498. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.068>
17. Інтеграція у європейську електромережу ENTSO-E. Мінекономіки. URL: <https://www.mev.gov.ua/reforma/intehratsiya-u-yevropeysku-elektromerezhu-entso-e>
18. Directive (EU) 2019/944 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on common rules for the internal market for electricity and amending Directive 2012/27/EU (recast). URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2019/944/oj/eng>
19. Commission Regulation (EU) 2016/631 of 14 April 2016 establishing a network code on requirements for grid connection of generators. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2016/631/oj/eng>.
20. Wang J. et al. Software Defined Wi-V2G: A V2G Network Architecture. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*. 2018. Vol.10 (2). P.167–179. <https://doi.org/10.1109/imits.2018.2806638>.
21. Directive (EU) 2023/2413 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 amending Directive (EU) 2018/2001, Regulation (EU) 2018/1999 and Directive 98/70/EC as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L_202302413.
22. ENTSO-E publishes Phase II Technical Report on Grid Forming Requirements. 2025. URL: <https://www.entsoe.eu/news/2025/11/04/entso-e-publishes-phase-ii-technical-report-on-grid-forming-requirements/>.

REFERENCES

1. Shkurat M., Kuzmenko E. (2026). Analysis of the transformation of Ukraine's energy system. *Herald of Khmelnytskyi National University. Economic Sciences*, 350(1), 12-18. <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2026-350-1> [in Ukrainian]
2. Bugazianus C. (2025). Smart grid analysis and its potential in creating modern organizational and legal mechanisms for Ukraine's energy security system. *Theoretical and applied issues of statehood*, 33, 198-211. <https://doi.org/10.35432/tisb332025330148> [in Ukrainian]
3. Putsenteilo P.R. (2023). The Smart Grid Concept: Technological, Organizational, and Economic Aspects of Energy Sector Development. *Innovative Economy*, 1, 137-150. <https://doi.org/10.37332/2309-1533.2023.1.19>. [in Ukrainian]
4. Ru J., Gillott M., Shipman R. Vehicle-to-Grid (V2G) Research: A Decade of Progress, Achievements, and Future Directions. *Energies*. 2025. Vol.18 (23). P. 6148. <https://doi.org/10.3390/en18236148>

5. Acharige S. S. G. et al. Grid integration of electric vehicles - Impact assessment and remedial measures. *Journal of Power Sources*. 2025. Vol. 650. P. 236697. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.236697>
6. Ashfaq M., Butt, O., Selvaraj, J., Rahim, N. Assessment of electric vehicle charging infrastructure and its impact on the electric grid: A review. *Int. J. Green Energy*. 2021. Vol. 18. P. 657–686. <https://doi.org/10.1080/15435075.2021.1875471>
7. Naseem H. et al. Smart Charging and Vehicle-to-Grid Integration of Electric Vehicles: Technical Insights, Cybersecurity Risks, and Mobility-Oriented Control Strategies. *Applied Sciences*. 2026. Vol. 160 (4). P.1748. <https://doi.org/10.3390/app16041748>
8. Sanjana D. et al. Next-Generation Electric Vehicle Charging Technologies: A Holistic Review of Innovations, System-Level Benefits, and Integration Challenges. *2025 International Conference on Electrical, Electronics, and Computer Science with Advance Power Technologies - A Future Trends (ICE2CPT)*, Jamshedpur, India, 29–31 October 2025. 2025. P.1–6. <https://doi.org/10.1109/ice2cpt66440.2025.11340135>
9. Smart Machines and Technologies at the Service of Mankind: Monograph / Gen. edit. Olha Prokopenko, Kristjan Välik, Tallinn: Teadmus OÜ, 2024, 229 p. URL: https://conference.euas.eu/2024/wp-content/uploads/2024/12/Monograph_2024.pdf
10. Zvarych R., Kharkivskiy B. (2025). “Smart integration of Ukraine’s energy system into the EU single energy market: challenges and prospects.” *Journal of European Economy*, 24 (2), 246-273. <https://doi.org/10.35774/jee2025.02.246> [in Ukrainian]
11. Kumar P. et al. A comprehensive review of vehicle-to-grid integration in electric vehicles: Powering the future/ *Energy Conversion and Management: X*. 2025. Vol.25. P.100864. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100864>
12. Yang Y. et al. Review of vehicle to grid integration to support power grid security. *Energy Reports*. 2024. Vol. 12. P. 2786–2800. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.08.069>
13. Wohlschlager D. et al. Green Light for Bidirectional Charging? Unveiling Grid Repercussions and Life Cycle Impacts. *Advances in Applied Energy*. 2024. P. 100195. <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2024.100195>
14. What does V2G mean? Vehicle to grid for charging electric vehicles? (2025).MIDA. URL: <https://www.evsegroup.com/uk/news/what-does-v2g-mean-vehicle-to-grid-for-electric-car-charging>. [in Ukrainian]
15. Regulation (EU) 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC) No 401/2009 and (EU) 2018/1999 (‘European Climate Law’). URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2021/1119/oj/eng>
16. Silvestre M. L. Di et al. How Decarbonization, Digitalization and Decentralization are changing key power infrastructures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 93. P. 483–498. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.068>
17. Integration into the European electricity network ENTSO-E. (2025). Ministry of Economy. URL: <https://www.mev.gov.ua/reforma/intehratsiya-u-yevropeysku-elektromerezhu-entso-e> [in Ukrainian]
18. Directive (EU) 2019/944 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on common rules for the internal market for electricity and amending Directive 2012/27/EU (recast). URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2019/944/oj/eng>
19. Commission Regulation (EU) 2016/631 of 14 April 2016 establishing a network code on requirements for grid connection of generators. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2016/631/oj/eng>
20. Wang J. et al. Software Defined Wi-V2G: A V2G Network Architecture. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*. 2018. Vol.10 (2). P.167–179. <https://doi.org/10.1109/imits.2018.2806638>
21. Directive (EU) 2023/2413 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 amending Directive (EU) 2018/2001, Regulation (EU) 2018/1999 and Directive 98/70/EC as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L_202302413
22. ENTSO-E publishes Phase II Technical Report on Grid Forming Requirements. 2025. URL: <https://www.entsoe.eu/news/2025/11/04/entso-e-publishes-phase-ii-technical-report-on-grid-forming-requirements/>

ROZGHON OLHA

PhD in Law, Associate Professor, Leading Researcher of the Scientific
and Research Institute of Providing Legal Framework for the Innovative Development
of the NALS of Ukraine

INTEGRATION OF SMART GRIDS AND RENEWABLE ENERGY SOURCES IN THE AUTOMOTIVE SECTOR IN THE CONTEXT OF UKRAINE'S ENERGY TRANSITION

Problem setting. Transport electrification is not only a technological process but also a structural factor in the transformation of Ukraine's energy sector. The modern paradigm of decarbonization leads to the systemic convergence of the energy and transport sectors, where large-scale electrification acts as a catalyst for the transformation of vehicles from passive consumers into active intelligent nodes of the energy network. The introduction of bidirectional energy transfer (V2G) technologies and the concept of «smart» charging allows the integration of the electric vehicle fleet into the overall power balancing system, transforming it into a distributed flexibility resource. This synergistic approach not only stabilizes the power system in conditions of high intermittent generation from renewable sources, but also forms a new architecture of energy security, where transport infrastructure becomes an integral element of demand management.

Analysis of recent researches and publications. An analysis of recent studies and publications on the chosen topic shows that the theoretical, methodological, and practical essence of «smart grids» has been the subject of scientific research by various scholars. Thus, in their publications, the category of «smart grids» was analyzed by Bugazianus C. M., Putsenteilo P. R., Ru J. et al.

The following scientists have paid attention to innovations in the automotive sector, including electric vehicles, in their scientific works: Acharige S. S. G. et al., Ashfaq M. et al., Naseem H. et al., Sanjana D. et al., Prokopenko O. V., Vălk K. Among scientists, the issues of energy transition were studied by Zvarych R. E. and Kharkovskiy B. V., Shkurat M. E. and Kuzmenko E. G.

Target of research. The purpose of the article is to provide a comprehensive analysis of transport electrification and the implementation of Smart Grid and RES technologies as interrelated components of Ukraine's energy transition, as well as to study the legal, economic, and institutional mechanisms for their implementation in the context of decarbonization and European integration.

Article's main body. The integration of the Smart Grid concept is a fundamental factor in the transformation of power systems, enabling electric vehicles to transition from passive consumption nodes to active demand management agents. The use of Vehicle-to-Grid (V2G) technology allows the stochastic nature of generation from renewable energy sources to be offset by using vehicle batteries as decentralized energy storage systems.

Conclusions and prospects for the development. The transformative role of the automotive sector in the Smart Grid structure has been identified. Emphasis is placed on the V2G (Vehicle-to-Grid) concept, according to which electric vehicles are considered as mobile energy storage systems that balance fluctuations in generation from renewable energy sources (RES). Based on an analysis of the regulatory framework of Ukraine and the EU governing the integration of electric transport into the energy system, the prospects for the development of a decentralized energy infrastructure are outlined.

The fundamental transformation of the national energy system in the context of the global energy transition has been studied: from a static centralized model to a dynamic decentralized network. The paper reveals the mechanisms for the introduction of digital management technologies and changes in the role of consumers in the energy system. It is proven that this transition is not only a technological upgrade, but also a critical condition for ensuring national security and energy sustainability of the state.

The concept of Smart Grid as a key tool for the digital transformation of Ukraine's energy sector is substantiated.

Key words: smart grids, renewable energy sources, electric vehicles, transport electrification, energy transition, bidirectional charging of electric vehicles, vehicle-to-grid (V2G).

За ДСТУ 8302:2015 цю статтю слід цитувати:

Розгон О. В. Інтеграція розумних мереж та відновлюваних джерел енергії в автомобільному секторі в контексті енергетичного переходу України. *Право та інновації*. 2026. № 1 (53). С. 33–45. [https://doi.org/10.37772/2518-1718-2026-1\(53\)-4](https://doi.org/10.37772/2518-1718-2026-1(53)-4).

Дата подання автором: 10.03.2026

Дата прийняття після рецензування: 30.03.2026

Дата опублікування: 29.04.2026