
**НАУКОВО-ПРАКТИЧНІ ЗАСАДИ СТВОРЕННЯ
ОПТИМІЗОВАНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ
РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ ЗА УЧАСТІ
ДОМОГОСПОДАРСТВ-ПРОСЬЮМЕРІВ***

Теліженко О. М., Сотник М. І., Шашков С. В.
DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-480-1-18>

ВСТУП

Завдання забезпечення стійкості національної енергетичної системи об'єктивно визначають напрямки структурних змін в генерації та впровадження нових моделей розподілу. Затверджена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18.07.2024 р. № 713-р «Стратегія розвитку розподіленої генерації на період до 2035 року і затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2024–2026 роках»¹ визначає, що найбільш ефективним способом розв'язання проблеми недостатності генеруючих потужностей в об'єднаній енергетичній системі України «... є впровадження розподіленої генерації з гарантованою потужністю, а також модернізація мережевої інфраструктури системи передачі і систем розподілу електричної енергії». Крім того, розвиток розподіленої генерації відповідає вимогам Директиви (ЕУ) 2019/944 Європейського Парламенту і Ради від 5 червня 2019 р. «Про спільні правила внутрішнього ринку електричної енергії та внесення змін до Директиви (ЕУ) 2012/27»², яку Україна зобов'язана імплементувати

* Публікація підготовлена у рамках виконання наукового проєкту «Розроблення економічних механізмів підвищення енергоефективності та сталого розвитку відновлюваної енергетики у домогосподарствах України» (№ д/р 0122U001233), який фінансується Національним фондом досліджень України.

¹ Стратегія розвитку розподіленої генерації на період до 2035 року і затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2024–2026 роках: Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18.07.2024 р. № 713-р. *Офіційний вісник України*. 2024. № 73, стаття 4366, код акта 126287/2024. URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-skhvalennia-stratehii-rozvytku-rozpodilenoj-heneratsii-na-period-do-2035-roku-i-zatverdzhennia-s713180724>

² Про спільні правила внутрішнього ринку електричної енергії та внесення змін до Директиви (ЕУ) 2012/27: Директива (ЕУ) 2019/944 Європейського Парламенту і Ради від 5 червня 2019 р. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32019L0944>

в рамках Договору про заснування Енергетичного Співтовариства³ та плану заходів щодо інтеграції до Європейського Союзу⁴.

До основних технічних рішень впровадження розподіленої генерації відносять, як правило, відновлювані джерела (з блоками акумулювання електроенергії), електричні генератори різних типів, когенераційні установки та блочно-модульні котельні (в частині забезпечення тепловою енергією). Більшість проєктів у галузі відновлюваної енергетики становлять сонячні електростанції. За даними реєстру Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП), станом на кінець квітня 2024 року в Україні нараховується 1369 сонячних електростанцій, що належать 931 ліцензіату⁵. Разом з тим, починаючи з 24 лютого 2022 року об'єкти української відновлюваної енергетики знаходяться під постійними ударами. Зруйновано або пошкоджено не менше 13% промислових сонячних електростанцій. За підрахунками Асоціації сонячної енергетики України, на окупованих територіях зараз опинилися 62 промислові сонячні електростанції із загальною встановленою потужністю більш ніж 950 МВт (без урахування значної кількості малих домашніх станцій (потужністю до 30 кВт). На підконтрольній території України розміщуються близько 5900 МВт промислових сонячних електростанцій та понад 1200 МВт домашніх малих станцій, які також зазнають істотних втрат внаслідок бойових дій⁶. На відміну від промислової відновлюваної енергетики спостерігається динамічний розвиток просьомерської енергетики. Домашні сонячні електростанції стають більш важливими для забезпечення енергетичної безпеки споживачів. Лише у 2022 році введено 220 МВт потужності сонячних електростанцій, з них 206 МВт (93,6%) встановлено саме домогосподарствами⁶.

³ Про внесення змін до плану заходів щодо виконання зобов'язань в рамках Договору про заснування Енергетичного Співтовариства: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 7 липня 2023 р. № 642-р. *Офіційний вісник України*. 2023. № 72, стор. 282, стаття 4137, код акта 119655/2023. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/642-2023-%D1%80#Text>

⁴ Про затвердження плану заходів з виконання рекомендацій Європейської Комісії, представлених у Звіті про прогрес України в рамках Пакета розширення Європейського Союзу 2023 року: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 09.02.2024 р. № 133-р. *Офіційний вісник України*. 2024. № 21, стор. 561, стаття 1368, код акта 123335/2024. URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-zatverdzhennia-planu-zakhodiv-z-vikonannia-rekomendatsii-ievropeiskoi-komisii-predstavlenykh-u-t90224>.

⁵ Реєстр виробників електроенергії з альтернативних джерел. *Energy Map*. 2024. URL: https://map.ua-energy.org/uk/resources/a837d379-008d-47e2-bfcd-985428050090/?fbclid=IwZXh0bgNhZWQCMTEAAAR1One3v6n51-ek11mZiVdhT3CnuDIDGNDezBexk_WHfjB1-pgRnzZ8ETU_aem_AYYr9YRtxRLr4ikJbgHuCDNMzmiCgA4T5xdQw93b6t7iS5nF5xQmgWPOPybBKkLe9oWqMVCkbi2JsiweMZRZb1j_

⁶ Білозерова Л. Сонячна генерація: змінюються масштаб та географія об'єктів. *Energy Map*. 2024. URL: <https://ua-energy.org/uk/posts/tryfonivska-ses-foto-dtek>

Важливе значення у забезпеченні розподіленої генерації мають відіграти когенераційні установки, переважно газопоршневого типу⁷. Станом на середину лютого 2024 року Агентство США з міжнародного розвитку (USAID) передало 57 когенераційних установок потужністю від 50 до 1500 кВт для громад України в рамках «Проекту енергетичної безпеки»⁸. Разом з тим, реалізація проєктів розподіленої генерації стикається з рядом перепон як суб'єктивного так і об'єктивного характеру. Так, під час обмеження електропостачання (графіки планових відключень), мали місце відключення від електромережі як мережевих так і гібридних домашніх сонячних електростанцій. На побутовому рівні такі дії оператора системи передачі здаються не логічними. Але, крім інших причин, такі дії пов'язані з певними труднощами балансування об'єднаної енергетичної системи. Такі ж проблеми є стримуючим фактором встановлення когенераційних установок, навіть тих, які передані Україні безкоштовно⁹.

Прийняття ряду нормативно-правових актів^{10, 11, 12, 13, 14} покликане сприяти впровадженню проєктів розподіленої генерації. Ключовими тут, на наш погляд, є два положення.

⁷ Яворська Н. Директор Центру досліджень енергетики Олександр Харченко: «В Україні вже встановлені десятки МВт газової генерації, але нам потрібні тисячі». *Енергореформа*. 2024. URL: <https://reform.energy/news/direktor-tsentru-doslidzhen-energetiki-oleksandr-kharchenko-v-ukraini-vzhe-vstanovleni-desyatki-mvt-gazovoi-generatsii-ale-nam-potribni-tisyachi-22706>

⁸ Регіони України отримали 80 когенераційних установок. *Energy Map*. 2024. URL: <https://ua-energy.org/uk/posts/rehiony-ukrainy-otrymaly-80-koheneratsiinykh-ustanovok>

⁹ Тільки одна з 96 установок для забезпечення електроенергії та тепла від USAID була встановлена, – голова Спілки споживачів комунальних послуг. *Еспресо*. 2024. URL: <https://espreso.tv/ekonomika-tilki-odna-z-96-ustanovok-dlya-zabezpechennya-elektroenergii-ta-tepla-vid-usaid-bula-vstanovlena-golova-spilki-spozhyvachiv-komunalnikh-poslug>

¹⁰ Про затвердження Змін до деяких постанов НКРЕКП: Постанова НКРЕКП від 22.02.2024 р. № 370 / Оприлюднення на офіційних веб-сайтах органів державної влади України від 22.02.2024 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0370874-24#Text>

¹¹ Про затвердження Правил ринку: Постанова НКРЕКП від 14.03.2018 р. № 307 / Урядовий кур'єр від 22.06.2018 р. № 117. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0307874-18#n3261>

¹² Про затвердження Змін до Правил ринку: Постанова НКРЕКП від 26.06.2024 р. № 1211 / Оприлюднення на офіційних веб-сайтах органів державної влади України від 27.06.2024 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v1211874-24#n2>

¹³ Про внесення змін до деяких законів України щодо відновлення та «зеленої» трансформації енергетичної системи України: Закон України. *Відомості Верховної Ради України* від 13.12.2023 р., № 82, стор. 2, стаття 301. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3220-20#Text>

¹⁴ Про затвердження Національного плану дій з відновленої енергетики на період до 2030 року та плану заходів з його виконання: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 13 серпня 2024 р. № 761-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-%D1%80#Text>

Перше. Законом України¹³ вносяться зміни до Закону України «Про альтернативні джерела енергії»¹⁵, який доповнюється статтею 96 – «Стимулювання виробництва електричної енергії з альтернативних джерел енергії за механізмом самовиробництва». Цією статтею передбачається «стимулювання виробництва електричної енергії з альтернативних джерел енергії за механізмом самовиробництва ... для:

– генеруючих установок приватних домогосподарств, призначених для виробництва електричної енергії з енергії сонячного випромінювання та/або вітру, що приєднані до електроустановок, призначених для споживання електричної енергії безпосередньо чи через мережі такого споживача, за умови, що встановлена потужність таких електроустановок не перевищує величину дозволеної (договірної) потужності електроустановок такого споживача, призначених для споживання електричної енергії, але не більше 30 кВт».

Цим же Законом¹³ вносяться зміни до Закону України «Про ринок електричної енергії»¹⁶ який, зокрема, доповнюється статтею 30² – «Агрегація», в якій передбачається, що агрегатор, в межах агрегованої групи, «несе фінансову відповідальність за небаланси електричної енергії за цінами, визначеними відповідно до правил ринку» (підпункт 5 пункту 6).

Друге. Постанова НКРЕКП¹² регламентує методику визначення списання/нарахування грошових коштів за небаланс електричної енергії у взаємовідносинах між стороною, відповідальною за балансування, постачальником послуг з балансування та адміністратором розрахунків.

Ці норми практично визначають місце і роль агрегатора в системі «просьюмер – агрегатор – оператор системи передачі» в частині взаємовідносин агентів на ринку небалансів. Разом з тим, проблема балансування об'єднаної енергетичної системи є більш широкою та такою, що охоплює коло питань, перш за все, точного прогнозування генерації та споживання електроенергії. В умовах збільшення частки розподіленої генерації така проблема стає все більш складною і, в кінцевому рахунку, може негативно впливати на розширення просьюмерської енергетики.

¹⁵ Про альтернативні джерела енергії: Закон України / Відомості Верховної Ради України від 13.06.2003 р., № 24, стаття 155. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15#Text>

¹⁶ Про ринок електричної енергії: Закону України / Відомості Верховної Ради України від 14.07.2017 р., /27–28/, стор. 5, стаття 312. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text>

1. Визначення поняття «агрегатор» на ринку електричної енергії

Вперше поняття «агрегатор» як учасник ринку електроенергії було введено Законом України «Про внесення змін до деяких законів України щодо відновлення та «зеленої» трансформації енергетичної системи України»¹³ як доповнення до Закону України «Про ринок електричної енергії»¹⁶ Діяльність з агрегації на ринку електричної енергії визначається як така, яку «...здійснює суб'єкт господарювання, пов'язана з об'єднанням електроустановок, призначених для виробництва та/або споживання, та/або зберігання електричної енергії з метою купівлі-продажу електричної енергії, надання допоміжних послуг та/або послуг з балансування на ринку електричної енергії». Тут, з точки зору впровадження розподіленої генерації, найбільш важливою, на наш погляд, є функція «балансування на ринку електричної енергії» яку здійснює агрегатор. При цьому, взаємодія щодо забезпечення балансування об'єднаної енергетичної системи відбувається між окремими суб'єктами системи «агрегована група/просьюмери – агрегатор – оператор системи передачі». Цілком очевидно, що ця система є дворівневою.

Перший рівень – агрегована група, в якій саме агрегатор має забезпечити весь комплекс функціональної взаємодії між її учасниками. І тут виникає цілком природне запитання: на яких принципах мають будуватися взаємовідносини/взаємодія між учасниками агрегованої групи? Оскільки інтереси учасників агрегованої групи можуть бути протилежними, така взаємодія, на наш погляд, має базуватися на принципах колабораційних альянсів.

Другий рівень – «агрегатор – оператор системи передачі», на якому агрегатор виступає як сторона, відповідальна за баланс. На цьому рівні мають бути розроблені та впроваджені прозорі (у відношенні до учасників агрегованої групи) організаційно-економічні механізми, які мають забезпечити виконання як технічної функції балансування, так і максимізувати економічну вигоду всіх учасників системи «агрегована група/просьюмери – агрегатор – оператор системи передачі».

Координація на другому рівні є важливою оскільки агрегатори не мають повної інформації про стан електричних мереж, обмежень і технічних умов. Краща координація між агрегаторами розподіленої генерації та оператором системи передачі можуть допомогти агрегаторам уникнути потенційних порушень, пов'язаних з перевантаженням мережі, напругою та безпековими вимогами¹⁷.

¹⁷ Matsuda-Dunn R., Leddy L., Hotchkiss E., Gautam M, Michael Abdelmalak M. (2023). What Role Do Aggregators Play in Power System Security and Resilience?: Preprint. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/CP6A40-85649. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy23osti/85649.pdf>

В роботах^{18, 19} нами були визначені основні напрямки діяльності з агрегації в електроенергетиці на основі розвитку розподіленої генерації, а в роботі²⁰ обґрунтовано архітектуру вертикально-інтегрованої системи енергоменеджменту житлового сектору/домогосподарств, побудованої на єдиному технологічному принципі збору, передачі та обробки інформації в координатах «вимірювання – аналіз – прогнозування – співставлення – регулювання – коригування». Пропонована архітектура є універсальною, а її окремі блоки можуть слугувати інформаційно-аналітичною базою щодо визначення базових показників енергоспоживання; прогнозування енергоспоживання з урахуванням зовнішніх та внутрішніх чинників впливу на об’єкти енергоспоживання; порівняльного аналізу обсягів споживання енергоресурсів на основі оцінки і аналізу відхилень. Разом з тим, ефективна взаємодія в системі «агрегована група/просьюмери – агрегатор – оператор системи передачі» можлива тільки на основі оптимізації як технічних так і економічних параметрів в режимі реального часу, таких, наприклад, як обмеження генерації, обмеження/стимулювання попиту, розвиток акумулюючих потужностей та ін. Саме це обумовлює необхідність більш глибокого дослідження ролі і місця агрегатора в умовах збільшення частки розподіленої генерації в загальному балансі електроенергії. В табл. 1 наведені визначення поняття «агрегатор».

Аналіз табл. 1 свідчить, що в Законі України «Про ринок електричної енергії»¹⁶ визначено, як одну із функцій агрегатора, послугу з балансування на ринку електричної енергії в межах агрегованої групи. При цьому, конструкція «та/або», на наш погляд, містить внутрішні протиріччя. Складно уявити, як агрегатор буде здійснювати балансування без виконання функцій регулювання купівлі-продажу електроенергії, регулювання виробництва та споживання. Натомість, в Directive (EU) 2019/944²⁶ агрегація обмежується функцією купівлі-продажу електроенергії в межах агрегованої групи на «...будь-якому ринку електроенергії».

¹⁸ Сотник М., Теліженко О., Шашков С., Єгоров Є. «Віртуальна електростанція»: загальна модель агрегації в електроенергетиці. *Grail of Science*. 2023. №34. С. 33–42. DOI: <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.08.12.2023.02>.

¹⁹ Теліженко О. М., Шашков С. В. Напрямки діяльності з агрегації в електроенергетиці на основі розвитку розподіленої генерації (2023). *Вісник Херсонського національного технічного університету / Управління та адміністрування*. 2023. № 4(87). С. 299–304. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.4.36>.

²⁰ Сотник М., Теліженко О., Курбатова Т., Венцьозан Д. Архітектура системи енергетичного менеджменту житлового сектору/домогосподарств. *Grail of Science*. 2024. № 39. С. 56–66. DOI: <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.10.05.2024.005>.

Визначення поняття «агрегатор»

Джерело	Визначення
1	2
[21]	Агрегатор є учасником енергетичного ринку розумних енергетичних систем, який «пропонує послуги з агрегування виробництва енергії з різних джерел (генераторів) і діє на мережу як єдине ціле, включаючи локальне агрегування попиту (управління реакцією на попит) і постачання (управління генерацією)». Агрегатор може надавати малим споживачам послуги, включаючи залучення споживачів, управління рахунками, енергоефективність, розподілене керування енергією ²¹ .
[22]	Роль агрегатора полягає в тому, щоб забезпечити гнучкість просьбомерів. Агрегатор здійснює нагляд за своїми споживачами в частині виробництва та споживання електроенергії, розрахунків і виконання контрактів ²² .
[23]	Агрегатор здійснює координацію учасників агрегованої групи, як правило, шляхом централізованої оптимізації. Агрегатори здійснюють торгівлю електроенергією та надають допоміжні послуги. В залежності від дизайну ринку, агрегатор також можна розуміти як об'єкт, який координує діяльність учасників агрегованої групи в певній області мережі в сенсі MicroGrid ²³ .
[24]	Агрегація визначається як акт групування окремих агентів в енергосистемі (тобто споживачів, виробників, просьбомерів), щоб діяти як єдине ціле на ринку електроенергії (як оптовому, так і роздрібному) або при купівлі/продажу послуг оператора системи. Агрегатор діє як посередник між кінцевими споживачами електроенергії та власниками розподілених джерел електроенергії та учасниками енергосистеми, які бажають обслуговувати цих кінцевих споживачів або використовувати послуги, що надаються цими розподіленими джерелами енергії ²⁴ .
[25]	Незалежні агрегатори об'єднують багато домогосподарств, які стають гравцями на ринку електроенергії.

²¹ Zhou K., Yang S. Smart Energy Management. *Comprehensive Energy Systems*. 2018. Vol. 5. P. 423–456. DOI:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809597-3.00525-3>.

²² Merino J. Fostering DER integration in the electricity markets. *Distributed Energy Resources in Local Integrated Energy Systems: Optimal Operation and Planning*: Book / Merino J., Gómez I., Fraile-Ardanuy J., Santos M., Cortés A., Jimeno J., Madina C. Elsevier Inc. 2021. P. 175–205. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823899-8.00008>.

²³ Koch S. Assessment of Revenue Potentials of Ancillary Service Provision by Flexible Unit Portfolios. *Energy Storage for Smart Grids: Planning and Operation for Renewable and Variable Energy Resources (VERs)*: Book. 2014, Academic Press. P. 35–66. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2012-0-06954-2>.

²⁴ Burger S., Chaves-Ávila J. P., Batlle C., Pérez-Arriaga I.J. A review of the value of aggregators in electricity systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 77. P. 395–405. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.014>.

1	2
	Аналіз у звіті JRC зосереджується на запровадженні незалежних агрегаторів реагування на попит для малих кінцевих користувачів і визначає чинники та перешкоди для цього ²⁵ .
[26]	Стаття 2 – Визначення Пункт (18) – «агрегація» означає функцію, що виконується фізичною або юридичною особою, яка об'єднує навантаження кількох споживачів або вироблену електроенергію для продажу, купівлі чи аукціону на будь-якому ринку електроенергії ²⁶ .
[16]	Стаття 1 – Визначення термінів 101) агрегатор – незалежний агрегатор або інший учасник ринку електроенергії, який здійснює діяльність з агрегації; 102) агрегація – діяльність на ринку електричної енергії, що здійснює суб'єкт господарювання, пов'язана з об'єднанням електроустановок, призначених для виробництва та/або споживання, та/або зберігання електричної енергії з метою купівлі-продажу електричної енергії, надання допоміжних послуг та/або послуг з балансування на ринку електричної енергії; 105) незалежний агрегатор – учасник ринку, що здійснює діяльність з агрегації та який неафілійований з електропостачальником та/або постачальником універсальних послуг споживача, електроустановки якого агрегуються таким учасником ринку.

В науковій літературі²¹⁻²⁵ обґрунтовується широкий спектр функцій агрегатора, – від посередницьких функцій до координації учасників агрегованої групи, як правило, шляхом централізованої оптимізації. Цілком очевидно, що така оптимізація є комплексною та такою, що забезпечує балансування в межах агрегованої групи та максимізує економічні вигоди її учасників.

На наш погляд, слід погодитися з висновками роботи²⁷, в якій автор зазначає, що «...агрегована група за своєю структурою та моделлю об'єднання учасників – є найбільш юридично наближеною до вже відомого явища на ринку – балансуєчої групи. Так само, як в балансуєчій групі відповідальним за баланс є один суб'єкт (той хто створив таку

²⁵ EU electricity market transformation is underway: meet the independent aggregators / Joint Research Centre. 2022. URL: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/eu-electricity-market-transformation-underway-meet-independent-aggregators-2022-11-08_en

²⁶ On common rules for the internal market for electricity and amending Directive 2012/27/EU (recast): Directive (EU) 2019/944 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32019L0944>

²⁷ Федотов М. Віртуальна електростанція або агрегатор – новий вид діяльності на ринку електричної енергії. Особливості діяльності з агрегації електричної енергії. *Fedotov Partners*. 2024. URL: <https://www.fedotovpartners.com/post/virtualna-elektrostantsiya-abo-agregator-noviy-vid-diyalnosti-na-rinku-elektrichnoyi-energiyi-osoblivosti-diyalnosti-z-agregatsiyi-elektrichnoyi-energiyi>

групу), так і в агрегованій групі – агрегатор здійснює діяльність з агрегації електроустановок всіх учасників такої групи».

2. Роль агрегатора та основні підходи до агрегації

Збільшення частки розподіленого та відновлюваного виробництва електричної енергії суттєво ускладнює, і без того складну, задачу забезпечення операторами системи розподілу надійного та безпечного постачання електроенергії. Крім того, кінцеві споживачі/просьюмери стають активними учасниками енергетичної системи і, отже, енергетичного переходу. Управління такою енергетичною системою вимагає все більш скоординованих дій між операторами системи розподілу та операторами систем передачі для забезпечення гнучкості мережевих послуг та ефективної роботи електричних мереж. В цьому відношенні надзвичайно важливим є аналіз результатів проекту CoordiNet²⁸, мета якого полягала у розробці та впровадженні різних схем координації щоб продемонструвати, як співпраця між усіма зацікавленими сторонами може усунути існуючі перешкоди для гнучкості участі на ринку для клієнтів і малих учасників ринку/просьюмерів, підключених до розподільчих мереж. У проєкті CoordiNet було обґрунтовано декілька схем координації «оператор системи передачі – оператор системи розподілу – споживач» відповідно до чотирьох вимірів: системне врахування потреб гнучкості, основний покупець гнучкості, кількість ринкових рівнів і прямиї доступ до джерел гнучкості, розташованих на рівні розподілу. Структура агрегації, при цьому, базується на наступних основних принципах:

- агрегатори конкурують на лібералізованому ринку, і тому агрегаційні компанії можуть бути такими, що одночасно обслуговують потреби різних ринків і систем;

- агрегатори вважаються дерегульованими компаніями, не пов'язаними з регульованими агентами, такими як оператор системи передачі та оператор системи розподілу;

- агрегатор, як агент, який представляє постачальників послуг гнучкості на ринках, є відповідальним за управління технічними аспектами технологій розподіленої генерації та пристроїв, які використовуються для забезпечення гнучкості, щоб максимізувати економічні результати;

- об'єкти розподіленої генерації мають, як правило, специфічні технічні характеристики, якими потрібно оптимально керувати, задля забезпечення гнучкості розподільчих мереж.

²⁸ CoordiNet – INTERFACE Recommendations Towards Harmonized European Flexibilities Markets / European Distribution System Operators (E. DSO). 2022. URL: <https://www.edsoforsmartgrids.eu/edso-publications/coordinet-interrface-recommendations-towards-harmonized-european-flexibilities-markets//>

На наш погляд, дві основні ролі агрегатора можна визначити наступним чином. Перше – експерт з гнучкості. Агрегація – це, перш за все, розширення самого об'єкту розподіленої генерації (його адаптація) до вимог гнучкості розподільчих мереж. Агрегатор, таким чином, повинен репрезентувати, з високою точністю, переваги та обмеження об'єктів розподіленої генерації та «перетворити» їх на можливості. Крім того, агрегатор повинен бути гнучким і розвивати, принаймні одну з двох наступних навичок:

- можливість агрегувати велику кількість однотипних джерел розподіленої генерації (спеціалізація з агрегації);
- можливість агрегувати низку джерел розподіленої генерації з різними типами гнучкості (спеціалізація з оптимізації).

Друге – експерт ринку. Агрегатор повинен взяти на себе функцію експерта ринку від імені учасників агрегованої групи з метою отримати оптимізовану віддачу для своїх клієнтів і для себе.

Ці дві ролі тісно пов'язані та є такими, що разом формують успішну модель агрегації в електроенергетиці.

3. Рівні ринку та умови агрегації

Аналіз літературних джерел та нормативних документів дозволяє узагальнити основні функції агрегатора в залежності від ринкової архітектури (табл. 2).

Розвиток відновлюваних джерел енергії вимагає впровадження інструментів прогнозування попиту і пропозиції електроенергії, причому прогнозування на різних структурних рівнях ринку. Інформаційно-аналітичну підтримку такого прогнозування можуть забезпечити платформи, де ринкові агенти можуть обмінюватися енергетичними контрактами на фізичну поставку електроенергії та відповідних дій щодо забезпечення балансування електромереж з урахуванням факторів, які не були враховані на аукціонах на добу наперед, таких як зміна погодних умов обсягів споживання, перевагання мережі, аварій, обумовлених воєнними діями, тощо.

Невизначеність і нестабільність ринкових цін створюють значні ризики для традиційних бізнес-моделей комунальних підприємств: ф'ючерсні ринки, ринки на добу наперед (spot) і ринки реального часу, а також можливість розвивати нові бізнес-моделі, такі як модель балансування електричних мереж.

Необхідно зазначити, що в країнах ЄС прийнято єдиний «Регламент Комісії (ЄС) 2017/2195 від 23 листопада 2017 року, що встановлює вказівки щодо балансування електроенергії»²⁹, (структура регламенту

²⁹ Commission Regulation (EU) 2017/2195 of 23 November 2017 establishing a guideline on electricity balancing. *Official Journal of the European Union*. 2017. Vol. 60. P. 6–55. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=OJ:L:2017:312:FULL&from=EN>

наведена в табл. 3). Ці обов'язкові вимоги забезпечують належне функціонування інтегрованого ринку електроенергії в період балансування та регулюють діяльність операторів систем передачі, національних регуляторних органів та Агентство Європейського Союзу зі співробітництва регуляторів енергетики (European Union Agency for the Cooperation of Energy Regulators – ACER).

Таблиця 2

Конкретизація функцій агрегатора в залежності від архітектури ринку електроенергії

Архітектура ринку	Функції агрегатора
Віртуальна електростанція	<p>У побутовому секторі ефект від впровадження агрегаторів енергетичного ринку може бути досягнутий завдяки автоматизації будинків і їх цифровізації (розумні лічильники, термостати, пристрої для опалення та охолодження), що дозволяє узгоджувати пропозицію та попит на енергію в режимі реального часу, забезпечуючи інтеграцію у мережеві продукти та оптимізувати споживання енергії.</p> <p>Агрегатори можуть об'єднувати на енергетичних ринках розподілені джерела генерації як віртуальні електростанції, які контролюються центральною системою інформаційних технологій, де містяться дані, пов'язані з прогнозами погоди, цінами на електроенергію на оптових ринках, а також загальними тенденціями постачання та споживання енергії. Агрегатор може надавати різні мережеві послуги, такі як регулювання частоти, оперативна резервна потужність тощо, оптимізуючи відповідний портфель розподілених енергетичних ресурсів.</p>
Роздрібний ринок	<p>Агрегатори можуть реалізувати роздрібний ринковий механізм на рівні розподілу, який координує гнучкість розподілених джерел енергії, використовуючи переваги концепції трансактивної енергії (система економічних і контрольних механізмів, що дозволяє динамічно балансувати попит і пропозицію в усій електричній інфраструктурі, використовуючи вартість як ключовий параметр).</p>
Агрегатори блокчейнів	<p>Агрегація генеруючих ресурсів місцевих громад для участі в ринках потужності та балансуванні дозволяє технології блокчейн пропонувати нові можливості, пов'язані із сертифікацією виробництва з відновлюваних джерел енергії, відстеженням, контролем мережі, координацією розподілених ресурсів (генератори, батареї, гнучкі навантаження тощо), захист системи (від явищ зворотного потоку потужності, надмірного підвищення напруги, від'єднання генераторів і браку виробництва тощо).</p>

Джерело: складено на основі^{30, 31, 32}

³⁰ Aggregators Innovation Landscape Brief / International Renewable Energy Agency. 2019. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Feb/IRENA_Innovation_Aggregators_2019.PDF

Структурні елементи Регламенту

Структурні елементи	Зміст
Правила для постачальників послуг балансування та сторін, відповідальних за балансування	Положення та умови, пов'язані з балансуванням, визначені на національному рівні, повинні забезпечувати справедливі, прозорі та недискримінаційні правила для всіх суб'єктів, залучених до балансуєчих ринків, забезпечуючи адекватну та чесну конкуренцію.
Обмін балансуєчою потужністю та міжзональним розподілом потужності	Ці правила дозволяють операторам спільно закуповувати та використовувати балансуєчу потужність, формуючи ширшу співпрацю, отримуючи вигоду від економічного резерву, що забезпечує ресурси за межами їхньої території.
Загальні європейські платформи балансуєчої енергії	Інтеграції ринків балансуєчої енергії сприяють європейські платформи, які застосовують загальний список послуг для забезпечення економічно ефективної активації заявок на балансуєчу енергію по всій Європі.
Гармонізація врегулювання дисбалансу	Врегулювання дисбалансу є національним механізмом, і його гармонізація на європейському рівні забезпечує послідовне застосування правил у державах-членах. Це гарантує, що учасники ринку мають однакові стимули для постачання енергії, підвищуючи загальну ефективність балансуєчих ринків.
Правила розрахунків між операторами системи передачі	Регламент гарантує, що всі обміни між операторами системи передачі врегульовуються за загальними правилами, що гарантує справедливий і недискримінаційний підхід.

Джерело: складено на основі³².

Наведені в табл. 3 структурні елементи Регламенту³² впроваджені на рівні об'єднаної енергетичної системи України в частині її балансування з енергетичною системою ЄС. Разом з тим, за своєю змістовною сутністю, вони є універсальними та такими, що потребують відповідної адаптації та впровадження на рівні локальних енергетичних мереж, що, в свою чергу, потребує значних технічних та організаційних зрушень. При цьому, необхідно враховувати, що методологія гармонізації

³¹ Haider R., D'Achiardi D., Venkataramanan V., Srivastava A., Bose A., Annaswamy A. M. Reinventing the utility for distributed energy resources: A proposal for retail electricity markets. *Advances in Applied Energy*. 2021. Vol. 2. no. 100026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2021.100026>

³² Di Silvestre M. L., Gallo P., Guerrero J. M., Musca R., Sanseverino E. R., Sciumè G., Vásquez J. C., Zizzo G. Blockchain for power systems: Current trends and future applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. Vol. 119. no. 109585. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109585>.

процесів для розподілу міжзональної потужності та обміну балансуючою потужністю або спільного використання резервів ACER постійно вдосконалюється³³. Ця методологія визначає, як розподілити міжзональну потужність для обміну балансуючою потужністю або спільне використання резервів, зокрема:

- для оптимізованого процесу розподілу, який базується на фактичній ринковій вартості міжзональної потужності для обміну енергією та для обміну балансуючою потужністю або спільного використання резервів відповідно до статті 40 Регламенту³²;

- для ринкового процесу розподілу, який базується на прогнозованій ринковій вартості міжзональної потужності для обміну енергією та фактичній ринковій вартості міжзональної потужності для обміну балансуючою потужністю або спільного використання резервів («ринковий розподіл») відповідно до статті 41 Регламенту³².

Перманентне вдосконалення нормативних документів ЄС щодо балансування енергетичних мереж є ще одним важливим фактором функціональної підготовки фахівців агрегаторів груп розподіленої генерації.

Однак структура ринку не є єдиним аспектом, який необхідно враховувати під час прийняття рішень агрегатором. Агрегатори повинні максимізувати сукупний дохід членів агрегованої групи. Саме тому, враховуючи об'єктивну внутрішню невизначеність в агрегованих групах, агрегатори мають зважувати на:

- здійсненність рішення з урахуванням обмежень учасників агрегованої групи;

- можливості або альтернативні витрати на забезпечення виконання прийнятих рішень (це досить складний процес, оскільки вимагає, серед іншого, прогнозування майбутніх витрат на впровадження прийнятих рішень, визначення функції нейтральності ризику для порівняння майбутніх можливостей (які все ще не визначені) з фактичними поточними, порівняння та прийняття економічно обґрунтованих рішень).

Не менш важливим фактором ефективної роботи агрегаторів, особливо тих, які об'єднують просьюмерів/домогосподарства, є суттєво вищий рівень невизначеності останніх. Так, наприклад, в роботі³⁴

³³ Decision on the HCZCA methodology: Annex I. Methodology for harmonising processes for the allocation of cross-zonal capacity for the exchange of balancing capacity or sharing of reserves in accordance with Article 38(3) of the Commission Regulation (EU) 2017/2195 of 23 November 2017 establishing a guideline on electricity balancing / European Union Agency for the Cooperation of Energy Regulators. 2023. 30 p. URL: https://www.acer.europa.eu/sites/default/files/documents/Individual%20Decisions_annex/ACER_Decision_11-2023_on_HCZCAM-Annex%20I.pdf.

³⁴ Sasaki K., Aki H., Ikegami T. Application of model predictive control to grid flexibility provision by distributed energy resources in residential dwellings under

обґрунтовуються моделі та алгоритми прогнозного керування для забезпечення гнучкості мережі з розподіленими енергетичними ресурсами в житлових будинках в умовах невизначеності. Авторами запропонована модель прогнозованого керування (Model Predictive Control – MPC), яка містить набір комп’ютерних алгоритмів керування, побудованих на прогнозуванні майбутньої реакції процесу генерації електроенергії на зміну зовнішніх (ринкових, метео-кліматичних) та внутрішніх (техніко-технологічних) факторів.

Ще одним, розповсюдженим в країнах ЄС, інструментом комплексного регулювання/оптимізації електричної мікромережі є технологія однорангової торгівлі енергією (Peer-to-Peer – P2P)³⁵. Для підвищення ефективності розподілу енергетичних ресурсів під час P2P-торгівлі енергією, до ринку рекомендується залучити постачальника послуг енергобалансу яким, крім інших незалежних комерційних організацій, може виступати агрегатор відповідної агрегованої групи. При цьому, агрегатор повинен мати власні системами накопичення енергії великої ємності або залучити організацію з допоміжними джерелами живлення, яка бере участь на ринку P2P для отримання прибутку.

4. Програмно-аналітичне забезпечення агрегування

Важливою прикладною задачею балансування об’єднаної енергетичної системи України (у відповідності до пункту 41 ст. 1 Закону України «Про ринок електричної енергії» [16][17]) є розробка/впровадження програмного забезпечення з проєктування та підтримки оптимальних енергетичних параметрів в системі «активний споживач/проекомер – агрегатор – оператор системи передачі».

У відповідності до пункту 5 ст. 68 Закону України «Про ринок електричної енергії» «Оператор системи передачі з метою балансування обсягів виробництва та споживання електричної енергії та/або врегулювання системних обмежень надає постачальникам послуг з балансування команди на збільшення (зменшення) їхнього навантаження, ...»¹⁶.

Як правило, системні обмеження розділяють на три категорії:

– технологічні, сутність яких полягає у збільшенні кількості об’єктів гнучкої генерації або акумуляування енергії, збільшення пропускної здатності енергосистеми;

– регулювання попиту, сутність якого полягає, наприклад, у встановленні гнучких (в межах доби) максимальних граничних цін

uncertainty *Energy*. 2022. Vol. 239, Part B. no. 122183. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122183>

³⁵ Wang Z., Yu X., Mu Y., Jia H., Jiang Q., Wang X. Peer-to-Peer energy trading strategy for energy balance service provider (EBSP) considering market elasticity in community microgrid. *Applied Energy*. 2021. Vol. 303. no. 117596. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117596>.

електроенергії на внутрішньодобовому ринку, гнучкому ціноутворенні (ціна платежу) за позитивний/негативний небаланс, запровадження тарифів на електричну енергію, які стимулюють побутових споживачів зменшувати електроспоживання у пікові години доби та переносити використання побутових електроприладів на години нічного мінімуму електроспоживання³⁶ та ін.;

– тимчасове обмеження виробництва електроенергії об'єктами розподіленої генерації (в тому числі і відновлюваними джерелами), якщо виникає загроза безпечній роботі системи або коли локальні лінії електропередачі не здатні пропускати додаткові обсяги електроенергії³⁷.

Впровадження програмного забезпечення дозволяє в режимі реального часу обмінюватися інформацією між просьюмерами, агрегатором та оператором системи передачі. Програмні комплекси мають бути своєрідними центрами інформаційно-управлінської системи, яка, на основі відповідних організаційно-технічних рішень, забезпечує необхідну функціональність агрегованої групи та постачання енергії нормативної якості з мінімальними експлуатаційними витратами.

Однією із перспективних концепцій балансування обсягів виробництва та споживання електричної енергії при зростанні частки розподіленої генерації є запровадження «розумних мереж» (Smart Grid). Зокрема, в роботі³⁸ запропонована система індикаторів стійкості «розумних мереж», які характеризують їх здатність знижувати рівень аварійності та кількість випадків відмов системи, самовідновлюватися після аварій та підтримувати необхідні для її функціонування параметри, гарантувати безпечність за рахунок застосування протиаварійних систем. Автором запропоновані та обґрунтовані методичні підходи до компаративного аналізу наявних систем оцінювання ефективності «розумних мереж» на основі врахування основних їх характеристик (стійкість, інформаційна, економічна, технічна та комунікативна ефективність, екологічність, наявність у структурі «розумних мереж» електротранспортної інфраструктури)³⁹.

³⁶ Сафаров Ф., Олефір Д., Привалов Ю, Блінов І., Євген Парус Є. (2024). Управління попитом – ключ до енергетичної безпеки України. *Енергобізнес*. 2024. URL: <https://e-b.com.ua/upravlinnya-popitom-klyuc-do-energeticnoi-bezpeki-ukrayini-5909>

³⁷ Майснер Ф., Штіве К. Вимушені обмеження виробництва електроенергії з відновлюваних джерел як один з варіантів забезпечення гнучкості Проект для обговорення: Аналітична записка [PP/04/2019]. BE Berlin Economics GmbH. 2019. 21 с. URL: <https://www.lowcarbonukraine.com/wp-content/uploads/Renewable-electricity-curtailment-10172019-PP-ukr.pdf>

³⁸ Вакуленко І. Розгортання розумних енергетичних мереж як елемент системи модернізації енергетичного сектору економіки України. *Науковий вісник Полісся*. 2021. № 2(18). С. 97–106. DOI: [https://doi.org/10.25140/2410-9576-2019-2\(18\)-97-106](https://doi.org/10.25140/2410-9576-2019-2(18)-97-106).

³⁹ Вакуленко І. А. Організаційно-економічні засади запровадження розумних енергомереж в енергетичному секторі України : автореф. дис. ... канд. екон. наук :

Апробованим на практиці та таким, що дозволяє оптимізувати роботу об'єктів розподіленої генерації відновлюваних джерел є програмний пакет Clean Energy Project Analysis (RETScreen)⁴⁰ з різними функціональними версіями. Зокрема, програмний пакет RETScreen Expert дозволяє комплексно ідентифікувати, оцінювати й оптимізувати технічну й фінансову життєздатність потенційних проєктів з відновлюваної енергії та енергоефективності, а також вимірювати й перевіряти фактичну ефективність об'єктів і визначати можливості зі збереження та виробництва енергії. Слід зазначити, що «Режим перегляду» в RETScreen Expert є безкоштовним і надає доступ до всіх функціональних можливостей програмного забезпечення. Програмне забезпечення містить великий інтегрований навчальний матеріал, включаючи електронний підручник⁴¹.

В роботі⁴² проведено системний аналіз програмних продуктів для моделювання електричних мереж, зокрема PSS®SINCAL Siemens, ETAP Operation Technology, Power Factory DIGSILENT GmbH. На думку авторів, для умов України, найбільш прийнятною є програма PSS®SINCAL Siemens до базових модулів якої належать: розрахунок встановленого режиму; розрахунок струмів короткого замикання; гармоніки; стійкість системи; електромагнітні перехідні процеси. Розрахунок балансу потужності, струмів та напруги в мережі дозволяють вирішувати різні завдання при плануванні, проєктуванні та оперативному управлінні електричними мережами, а саме: планування нових ділянок мереж, а також аналіз та оптимізацію існуючих мереж; визначення напруги у всіх вузлах для симетричних та несиметричних мереж; визначення відповідності нормативним вимогам щодо допустимої мінімальної та максимальної напруги; визначення завантаження обладнання; перевірка та планування переключень у мережі; оптимізація налаштувань регульованого обладнання; комплексний аналіз мереж передачі та розподілу; аналіз технічних втрат.

Широке застосування щодо моделювання та оптимізації автономних і підключених до мережі гібридних відновлюваних електричних систем

08.00.03. Суми, 2020. 22 с. URL: https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/80781/3/avtoref_Vakulenko.pdf;jsessionid=70D7E2E634EFC063808DA457695FCCBE

⁴⁰ RETScreen® Clean Energy Management Software / Government of Canada, 2023 URL: <https://natural-resources.canada.ca/maps-tools-and-publications/tools/modelling-tools/retscreen/7465>

⁴¹ Clean Energy Project Analysis: RETScreen Engineering & Cases is an electronic textbook / Ottawa – Ontario: Natural Resources Canada. 2005. 456 p. URL: <https://publications.gc.ca/site/eng/9.690261/publication.html>

⁴² Шевченко С. Ю., Данильченко Д. О., Кузнецов Д. С. Використання програмного забезпечення для підвищення ефективності моделювання енергетичних мереж. *Наукові праці ДонНТУ. Серія : «Електротехніка і енергетика»*. 2022. № 1(26). С. 17–28. DOI: <https://doi.org/10.31474/2074-2630-2022-1-17-28>.

знайшов програмний пакет Hybrid Optimization by Genetic Algorithms (HOGA)⁴³. Програмний пакет HOGA складається з двох версій:

- iHOGA призначений для систем потужністю від кількох Вт до 5 МВт;

- MHOGA призначений для енергосистем без обмежень потужності.

Програмний пакет забезпечує моделювання та оптимізацію (враховуючи деградацію фотоелектричних модулів, вітряних турбін та акумуляторів тощо), багатоцільову оптимізацію, моделювання в часі до 1 хвилини, аналіз чутливості, аналіз ймовірностей тощо. Пакет включає в себе стратегії керування, які можна оптимізувати для автономних систем або для підключених до мережі систем (керування енергією акумуляторів для заряду/розряду в залежності від зміни ціни на електроенергію в межах доби).

Програмне забезпечення iHOGA / MHOGA включає розширені моделі оптимізації (генетичні алгоритми), що забезпечує можливість отримання оптимальної системи за дуже малий час обчислення.

Перелічені вище програмні продукти дозволяють моделювати та оптимізувати об'єкти розподіленої генерації, які побудовані на основі відновлюваних джерел. Разом з тим, об'єкти розподіленої генерації можуть бути гібридними, – містити у своєму складі, наприклад, когенераційні установки, генератори різних типів, блочно-модульні котельні та ін.

Для таких умов широке застосування знайшов програмний комплекс Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources (HOMER)⁴⁴, який дозволяє моделювати та оптимізувати роботу гібридної мікромережі. Програмний комплекс включає три блоки:

- симуляція (за своєю суттю HOMER є імітаційною моделлю), що дозволяє моделювати систему для всіх можливих комбінацій обладнання з часовим інтервалом від однієї хвилини до однієї години;

- оптимізація – програмний комплекс дозволяє досліджувати всі можливі комбінації типів систем за один цикл, а потім сортує системи відповідно до обраної змінної процесу оптимізації;

- аналіз чутливості – програмний комплекс дозволяє оцінювати вплив техніко-технологічних, метео-кліматичних та еколого-економічних змінних і зрозуміти, як оптимальна система змінюється з цими змінами.

Оскільки програмне забезпечення є доволі складним та потребує відповідних витрат на його придбання, навчання персоналу, формування локальних баз даних, перед остаточним прийняттям рішення щодо впровадження відповідної програми слід ознайомитися зі звітом

⁴³ iHOGA / MHOGA. Simulation and optimization of stand-alone and grid-connected hybrid renewable systems. URL: <https://ihoga.unizar.es/en/>

⁴⁴ HOMER software – the trusted global standard in hybrid power system modeling / UL Solutions HOMER Software. URL: <https://homerenergy.com/>

Міжнародної енергетичної агенції – (International Energy Agency – IEA) «Оцінка IEA програмних засобів для проектування та оптимізації автономних мікромереж»⁴⁵. Звіт дозволить допомогти інженерам і проектувальникам обрати програмні засоби на початковому етапі проектування та оптимізації розподіленої генерації відповідно до завдань проектування.

Серед вітчизняних розробок програмного забезпечення слід звернути увагу на роботу⁴⁶ в якій, на системному рівні, досліджуються питання оптимізації процесів керування попитом на електричну енергію шляхом оптимізації режимів роботи споживача, оптимізації добового графіка електроспоживання комплексу багатоквартирних будинків. Крім того, автором розроблено програмно-алгоритмічний комплекс «Помічник диспетчера» для проведення оцінки рівнів неоптимальності локальної системи електропостачання.

Не зважаючи на наявність широкого спектру програмно-аналітичних комплексів для проектування, управління та оптимізації електричних мереж, їх практичне впровадження у вітчизняну практику є вкрай незадовільним. Особливо це стосується розподіленої генерації та відповідних мікромереж агрегованих груп, до яких входять просьюмери-домогосподарства. І головним завданням тут є створення передумов для формування технічної та апаратно-програмної інфраструктури комунікацій на енергетичному ринку у відповідності до вимог ДСТУ ІЕС 62325-451-4:2017⁴⁷. Без проведення такої роботи концепція розподіленої генерації (окрім моделі «енергетичний острів») може призвести до зворотного ефекту, – практичну неможливість балансування енергетичних мереж.

ВИСНОВКИ

В умовах збільшення частки розподіленої генерації роль агрегатора в системі «просьюмер – агрегатор – оператор системи передачі», в частині взаємовідносин агентів на ринку небалансів, стає все більш важливою та такою, яка буде безпосередньо впливати на розширення просьюмерської енергетики.

⁴⁵ IEvaluation of Software Tools for Standalone Microgrid Design and Optimization: Report IEA-PVPS T18-03:2024. International Energy Agency. 2024. 72 p. URL: <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2024/03/IEA-PVPS-TASK-18-Report-Software-Tools-.pdf>

⁴⁶ Опришко, В. П. Оцінювання ефективності керування попитом в системах електропостачання з активним споживачем: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.01. Київ, 2019. 185 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/29532>

⁴⁷ ДСТУ ІЕС 62325-451-4:2017 «Інфраструктура комунікацій на енергетичному ринку. Частина 451-4. Бізнес-процес врегулювання небалансів, контекстна та збірна модель для Європейського ринку (ІЕС 62325-451-4:2017, ІДТ)». [Чинний від 2018-04-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. 15 с. URL: <https://f.eruditor.link/file/2963645/>

Ефективна взаємодія в системі «агрегована група/просьюмери – агрегатор – оператор системи передачі» можлива тільки на основі оптимізації як технічних так і економічних параметрів мережі в режимі реального часу таких, наприклад, як обмеження генерації, обмеження/стимулювання попиту, розвиток акумулюючих потужностей та ін. Така оптимізація має бути комплексною та такою, що забезпечує балансування в межах агрегованої групи та максимізує економічні вигоди її учасників.

Дві основні ролі агрегатора можна визначити наступним чином: експерт з гнучкості (агрегатор повинен забезпечити агрегацію великої кількості однотипних джерел розподіленої генерації (спеціалізація з агрегації) або агрегацію низки джерел розподіленої генерації з різними типами гнучкості (спеціалізація з оптимізації)); експерт ринку (агрегатор повинен взяти на себе функцію експерта ринку від імені учасників агрегованої групи з метою отримати оптимізовану віддачу для своїх клієнтів і для себе).

Не зважаючи на наявність широкого спектру програмно-аналітичних комплексів для проектування, управління та оптимізації електричних мереж, їх практичне впровадження у вітчизняну практику залишається вкрай незадовільним. Актуальним завданням є створення передумов для формування технічної та апаратно-програмної інфраструктури комунікацій на енергетичному ринку у відповідності до вимог ДСТУ ІЕС 62325-451-4:2017. Без проведення такої роботи впровадження розподіленої генерації (окрім моделі «енергетичний острів») може призвести до зворотного ефекту, – практичної неможливості балансування енергетичних мереж.

АНОТАЦІЯ

Досліджується роль і місце агрегатора в системі «агрегована група/просьюмери – агрегатор – оператор системи передачі» в частині взаємодії агентів на ринку небалансів. Враховуючи, що інтереси учасників агрегованої групи можуть бути протилежними, така взаємодія має базуватися на принципах колабораційних альянсів. Систематизовані функції агрегатора, – від посередницьких до координації учасників агрегованої групи на основі централізованої оптимізації. Доведено, що оптимізація є комплексною та такою, яка має забезпечувати балансування в межах агрегованої групи та максимізувати економічні вигоди її учасників. Обґрунтовується необхідність розробки/впровадження програмного забезпечення з проектування та підтримки оптимальних енергетичних параметрів в системі «агрегована група/просьюмери – агрегатор – оператор системи передачі». Проведено аналіз програмних продуктів для моделювання електричних мереж

побудованих на основі відновлюваних джерел, зокрема PSS@SINCAL Siemens, ETAP Operation Technology, Power Factory DiG SILENT GmbH, iHOGA / MHOGA та Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources (HOMER). Вказується на необхідність створення передумов для формування технічної та апаратно-програмної інфраструктури комунікацій на енергетичному ринку. Зроблено висновок, що без проведення такої роботи впровадження розподіленої генерації (окрім моделі «енергетичний острів») може призвести до зворотного ефекту, – практичної неможливості балансування енергетичних мереж.

Література

1. Стратегія розвитку розподіленої генерації на період до 2035 року і затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2024–2026 роках: Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18.07.2024 р. № 713-р. / Офіційний вісник України. 2024. № 73, стаття 4366, код акта 126287/2024. URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/proskhvalennia-strategii-rozvytku-rozpodilenoj-heneratsii-na-period-do-2035-roku-i-zatverdzhennia-s713180724>. (дата звернення 26.08.2024).

2. Про спільні правила внутрішнього ринку електричної енергії та внесення змін до Директиви (EU) 2012/27: Директива (EU) 2019/944 Європейського Парламенту і Ради від 5 червня 2019 р. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32019L0944>

3. Про внесення змін до плану заходів щодо виконання зобов'язань в рамках Договору про заснування Енергетичного Співтовариства: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 7 липня 2023 р. № 642-р / Офіційний вісник України. 2023. № 72, стор. 282, стаття 4137, код акта 119655/2023. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/642-2023-%D1%80#Text> (дата звернення 26.08.2024).

4. Про затвердження плану заходів з виконання рекомендацій Європейської Комісії, представлених у Звіті про прогрес України в рамках Пакета розширення Європейського Союзу 2023 року: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 09.02.2024 р. № 133-р / Офіційний вісник України. 2024. № 21, стор. 561, стаття 1368, код акта 123335/2024. URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/prozatverdzhennia-planu-zakhodiv-z-vykonannia-rekomendatsii-ievropeiskoi-komisii-predstavlenykh-u-t90224> (дата звернення 26.08.2024).

5. Реєстр виробників електроенергії з альтернативних джерел. *Energy Map*. 2024. URL: https://map.ua-energy.org/uk/resources/a837d379-008d-47e2-bfcf-985428050090/?fbclid=IwZXh0bgNhZW0CMTEAAAR1One3v6tn51-ek11mZiVdhT3CnuDIDGNDezBexk_WHfjB1-pgRnzZ8ETU_aem_AYYr9YRtxRLr4ikJbgHuCDNMzmiCgA4T5xdQw93b6f7iS5nF5xQmgWP0PybBkKLe9oWqMVCKbi2JsiweMZrRZb1j (дата звернення 26.08.2024).

6. Білозерова Л. Сонячна генерація: змінюються масштаб та географія об'єктів. *Energy Map*. 2024. URL: https://ua-energy.org/uk/posts/trufonivska-ses-foto-dtek_ (дата звернення 26.08.2024).

7. Яворська Н. Директор Центру досліджень енергетики Олександр Харченко: «В Україні вже встановлені десятки МВт газової генерації, але нам потрібні тисячі». *Енергореформа*. 2024. URL: https://reform.energy/news/direktor-tsentru-doslidzhen-energetiki-oleksandr-kharchenko-v-ukraini-vzhe-vstanovleni-desyatki-mvt-gazovoi-generatsii-ale-nam-potribni-tisyachi-22706_ (дата звернення 26.08.2024).

8. Регіони України отримали 80 когенераційних установок. *Energy Map*. 2024. URL: <https://ua-energy.org/uk/posts/rehionu-ukrainy-otrymaly-80-koheneratsiinykh-ustanovok> (дата звернення 26.08.2024).

9. Тільки одна з 96 установок для забезпечення електроенергії та тепла від USAID була встановлена, – голова Спілки споживачів комунальних послуг. *Еспресо*. 2024. URL: <https://espresso.tv/ekonomika-tilki-odna-z-96-ustanovok-dlya-zabezpechennya-elektroenerгии-ta-tepla-vid-usaid-bula-vstanovlena-golova-spilki-spozhyvachiv-komunalnykh-poslug> (дата звернення 26.08.2024).

10. Про затвердження Змін до деяких постанов НКРЕКП: Постанова НКРЕКП від 22.02.2024 р. № 370 / Оприлюднення на офіційних веб-сайтах органів державної влади України від 22.02.2024 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0370874-24#Text> (дата звернення 26.08.2024).

11. Про затвердження Правил ринку: Постанова НКРЕКП від 14.03.2018 р. № 307 / Урядовий кур'єр від 22.06.2018 р. № 117. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0307874-18#n3261> (дата звернення 26.08.2024).

12. Про затвердження Змін до Правил ринку: Постанова НКРЕКП від 26.06.2024 р. № 1211 / Оприлюднення на офіційних веб-сайтах органів державної влади України від 27.06.2024 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v1211874-24#n2> (дата звернення 26.08.2024).

13. Про внесення змін до деяких законів України щодо відновлення та «зеленої» трансформації енергетичної системи України: Закон України. *Відомості Верховної Ради України* від 13.12.2023 р., № 82, стор. 2, стаття 301. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3220-20#Text> (дата звернення 26.08.2024).

14. Про затвердження Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року та плану заходів з його виконання: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 13 серпня 2024 р. № 761-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-%D1%80#Text> (дата звернення).

15. Про альтернативні джерела енергії: Закон України. *Відомості Верховної Ради України* від 13.06.2003 р., № 24, стаття 155. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15#Text> (дата звернення).

16. Про ринок електричної енергії: Закону України. *Відомості Верховної Ради України* від 14.07.2017 р., /27-28/, стор. 5, стаття 312. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text>. (дата звернення 26.08.2024).

17. Matsuda-Dunn R., Leddy L., Hotchkiss E., Gautam M, Michael Abdelmalak M. (2023). What Role Do Aggregators Play in Power System Security and Resilience?: *Preprint*. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/CP6A40-85649. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy23osti/85649.pdf>

18. Сотник М., Теліженко О., Шашков С., Єгоров Є. «Віртуальна електростанція»: загальна модель агрегації в електроенергетиці. *Grail of Science*. 2023. № 34. С. 33–42. DOI: <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.08.12.2023.02>

19. Теліженко О. М., Шашков С. В. Напрямки діяльності з агрегації в електроенергетиці на основі розвитку розподіленої генерації (2023). *Вісник Херсонського національного технічного університету / Управління та адміністрування*. 2023. № 4(87). С. 299–304. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.4.36>.

20. Сотник М., Теліженко О., Курбатова Т., Венцюзюань Д. Архітектура системи енергетичного менеджменту житлового сектору/ домогосподарств. *Grail of Science*. 2024. № 39. С. 56–66. DOI: <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.10.05.2024.005>.

21. Zhou K., Yang S. Smart Energy Management. *Comprehensive Energy Systems*. 2018. Vol. 5. P. 423–456. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809597-3.00525-3>.

22. Merino J. Fostering DER integration in the electricity markets. *Distributed Energy Resources in Local Integrated Energy Systems: Optimal Operation and Planning*: Book / Merino J., Gómez I., Fraile-Ardanuy J., Santos M., Cortés A., Jimeno J., Madina C. Elsevier Inc. 2021. P. 175–205. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823899-8.00008>.

23. Koch S. Assessment of Revenue Potentials of Ancillary Service Provision by Flexible Unit Portfolios. *Energy Storage for Smart Grids: Planning and Operation for Renewable and Variable Energy Resources (VERs)*: Book. 2014, Academic Press. P. 35–66. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2012-0-06954-2>.

24. Burger S., Chaves-Ávila J. P., Batlle C., Pérez-Arriaga I. J. A review of the value of aggregators in electricity systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 77. P. 395–405. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.014>.

25. EU electricity market transformation is underway: meet the independent aggregators / Joint Research Centre. 2022. URL: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/eu-electricity-market-transformation-underway-meet-independent-aggregators-2022-11-08_en

26. On common rules for the internal market for electricity and amending Directive 2012/27/EU (recast): Directive (EU) 2019/944 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32019L0944>

27. Федотов М. Віртуальна електростанція або агрегатор – новий вид діяльності на ринку електричної енергії. Особливості діяльності з агрегації електричної енергії. *Fedotov Partners*. 2024. URL: <https://www.fedotovpartners.com/post/virtualna-elektrostanciya-abo-agregator-noviy-vid-diyalnosti-na-rinku-elektrichnoyi-energiyi-osoblivosti-diyalnosti-z-agregaciyi-elektrichnoyi-energiyi> (дата звернення 26.08.2024).

28. CoordiNet – INTERFACE Recommendations Towards Harmonized European Flexibilities Markets / European Distribution System Operators (E. DSO). 2022. URL: <https://www.edsoforsmartgrids.eu/edso-publications/coordinet-interrface-recommendations-towards-harmonized-european-flexibilities-markets/>

29. Aggregators Innovation Landscape Brief / International Renewable Energy Agency. 2019. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Feb/IRENA_Innovation_Aggregators_2019.PDF

30. Haider R., D’Achiardi D., Venkataramanan V., Srivastava A., Bose A., Annaswamy A. M. Reinventing the utility for distributed energy resources: A proposal for retail electricity markets. *Advances in Applied Energy*. 2021. Vol. 2. no. 100026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2021.100026>

31. Di Silvestre M. L., Gallo P., Guerrero J. M., Musca R., Sanseverino E. R., Sciumè G., Vásquez J. C., Zizzo G. Blockchain for power systems: Current trends and future applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. Vol. 119. no. 109585. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109585>.

32. Commission Regulation (EU) 2017/2195 of 23 November 2017 establishing a guideline on electricity balancing. *Official Journal of the European Union*. 2017. Vol. 60. P. 6–55. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=OJ:L:2017:312:FULL&from=EN>

33. Decision on the HCZCA methodology: Annex I. Methodology for harmonising processes for the allocation of cross-zonal capacity for the exchange of balancing capacity or sharing of reserves in accordance with Article 38(3) of the Commission Regulation (EU) 2017/2195 of 23 November 2017 establishing a guideline on electricity balancing / European Union Agency for the Cooperation of Energy Regulators. 2023.

30 p. URL: https://www.acer.europa.eu/sites/default/files/documents/Individual%20Decisions_annex/ACER_Decision_11-2023_on_HCZCAM-Annex%20I.pdf

34. Sasaki K., Aki H., Ikegami T. Application of model predictive control to grid flexibility provision by distributed energy resources in residential dwellings under uncertainty *Energy*. 2022. Vol. 239, Part B. no. 122183. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122183>.

35. Wang Z., Yu X., Mu Y., Jia H., Jiang Q., Wang X. Peer-to-Peer energy trading strategy for energy balance service provider (EBSP) considering market elasticity in community microgrid. *Applied Energy*. 2021. Vol. 303, no. 117596. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117596>.

36. Сафаров Ф., Олефір Д., Привалов Ю, Білінов І., Євген Парус С. (2024). Управління попитом – ключ до енергетичної безпеки України. *Енергобізнес*. 2024. URL: <https://e-b.com.ua/upravlinnya-popitom-klyuch-do-energeticnoyi-bezpeki-ukrayini-5909> (дата звернення).

37. Майснер Ф., Штіве К. Вимушені обмеження виробництва електроенергії з відновлюваних джерел як один з варіантів забезпечення гнучкості Проект для обговорення: Аналітична записка [PP/04/2019]. BE Berlin Economics GmbH. 2019. 21 с. URL: <https://www.lowcarbonukraine.com/wp-content/uploads/Renewable-electricity-curtailment-10172019-PP-ukr.pdf>

38. Вакуленко І. Розгортання розумних енергетичних мереж як елемент системи модернізації енергетичного сектору економіки України. *Науковий вісник Полісся*. 2021. № 2(18). С. 97–106. DOI: [https://doi.org/10.25140/2410-9576-2019-2\(18\)-97-106](https://doi.org/10.25140/2410-9576-2019-2(18)-97-106)

39. Вакуленко І. А. Організаційно-економічні засади запровадження розумних енергомереж в енергетичному секторі України : автореф. дис. ... канд. екон. наук : 08.00.03. Суми, 2020. 22 с. URL: https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/80781/3/avtoref_Vakulenko.pdf;jsessionid=70D7E2E634EFC063808DA457695FCCBE

40. RETScreen® Clean Energy Management Software / Government of Canada, 2023 URL: <https://natural-resources.canada.ca/maps-tools-and-publications/tools/modelling-tools/retscreen/7465>

41. Clean Energy Project Analysis: RETScreen Engineering & Cases is an electronic textbook / Ottawa – Ontario: Natural Resources Canada. 2005. 456 p. URL: <https://publications.gc.ca/site/eng/9.690261/publication.html>

42. Шевченко С. Ю., Данильченко Д. О., Кузнецов Д. С. Використання програмного забезпечення для підвищення ефективності моделювання енергетичних мереж. *Наукові праці ДонНТУ. Серія : «Електротехніка і енергетика»*. 2022. № 1(26). С. 17–28. DOI: <https://doi.org/10.31474/2074-2630-2022-1-17-28>

43. iHOGA / MHOGA. Simulation and optimization of stand-alone and grid-connected hybrid renewable systems. URL: <https://ihoga.unizar.es/en/>

44. HOMER software – the trusted global standard in hybrid power system modeling / UL Solutions HOMER Software. URL: <https://homerenergy.com/>

45. IEvaluation of Software Tools for Standalone Microgrid Design and Optimization: Report IEA-PVPS T18-03:2024. International Energy Agency. 2024. 72 p. URL: <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2024/03/IEA-PVPS-TASK-18-Report-Software-Tools-.pdf>

46. Опришко, В. П. Оцінювання ефективності керування попитом в системах електропостачання з активним споживачем : дис. ... канд. техн. наук: 05.14.01: Київ. 2019. 185 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/29532>

47. ДСТУ ІЕС 62325-451-4:2017 «Інфраструктура комунікацій на енергетичному ринку. Частина 451-4. Бізнес-процес врегулювання небалансів, контекстна та збірна модель для Європейського ринку (ІЕС 62325-451-4:2017, IDТ)». [Чинний від 2018-04-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. 15 с. URL: <https://f.eruditor.link/file/2963645/>

Information about the authors:

Telizhenko Oleksandr Mykhailovych,

Doctor of Economic Sciences, Professor,

Chief researcher

Research Institute of Energy-Efficient Technologies of Sumy State

University

116, Kharkivska str., Sumy, 40000, Ukraine

Sotnyk Mykola Ivanovych,

Doctor of Technical Sciences, Professor,

Head of the Department of Applied Hydroaeromechanics

Sumy State University

116, Kharkivska str., Sumy, 40000, Ukraine

Shashkov Serhii Valeriyovych,

Candidate of Economic Sciences,

Senior Researcher of the Scientific and Educational Center for Modeling

Processes in Complex Systems, Department of Applied Mathematics and

Modeling of Complex Systems

Sumy State University

116, Kharkivska str., Sumy, 40000, Ukraine