

Кіянчук Владислав Михайлович, аспірант кафедри електричних станцій, +38(050)075-47-98, Vladyslav.Kiianchuk@ieee.khpi.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7765-3910)

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002.*

Махотіло Костянтин Володимирович, канд. техн. наук, старший науковий співробітник кафедри електричних станцій, 38(050)029-75-09, Kostiantyn.Makhotilo@khpi.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-7081-071X.

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002.*

ОРГАНІЗАЦІЯ РОБОТИ АГРЕГАТОРА ДЛЯ ІНТЕГРАЦІЇ ПОБУТОВИХ СПОЖИВАЧІВ У ПРОГРАМИ РЕАГУВАННЯ НА ПОПИТ

Анотація. У статті розглянуто засади функціонування агрегаторів при залученні побутових споживачів на ринок електричної енергії, а також їх значення для розвитку програм реагування на попит. Аналізуються та пропонуються ключові функції агрегаторів, етапи їх діяльності, регуляторні вимоги та особливості взаємодії з всіма учасниками ринку. Значну увагу приділено бізнес-моделям агрегаторів, витратам і доходам, а також технічним і економічним аспектам управління споживанням енергоресурсів. Визначено переваги автоматизації процесів і розвитку систем моніторингу та аналізу споживання.

Ключові слова: агрегатор, ринок електричної енергії, побутові споживачі, управління попитом, балансування.

Kiianchuk Vladyslav, postgraduate student of the Department of Power Plants, Vladyslav.Kiianchuk@ieee.khpi.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7765-3910.

*National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute
2, Kyrpychova str., 61001, Kharkiv, Ukraine*

Makhotilo Kostiantyn, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Department of Power Plants, Kostiantyn.Makhotilo@khpi.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-7081-071X.

*National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute
2, Kyrpychova str., 61001, Kharkiv, Ukraine*

THE ORGANIZATION OF AGGREGATOR OPERATIONS FOR INTEGRATING RESIDENTIAL CONSUMERS INTO DEMAND RESPONSE PROGRAMS

Annotation. This paper researches the fundamental principles of aggregator operations in integrating residential consumers into the electricity market and their role in advancing demand response programs. It explores and proposes the key functions of aggregators, the stages of their operations, regulatory requirements, and the dynamics of their interactions with all market participants. Special attention is given to the business models of aggregators, their cost and revenue structures, as well as the technical and economic aspects of energy resource management. The advantages of process automation and the development of monitoring and consumption analysis systems are identified.

Keywords: aggregator, electricity market, residential consumers, demand management, balancing.

Вступ. В електроенергетичній системі розвиток практики реагування на попит здійснюється за принципом поступовості: від великих споживачів до малих, включаючи домогосподарства [1]. Це обумовлює зростання значення цифрових технологій, зокрема платформних рішень, штучного інтелекту, Інтернету речей (IoT) та сучасних систем автоматизації. Для масштабування моделей управління попитом на електричну енергію агрегаторам необхідно впроваджувати інноваційні архітектурно-технологічні рішення.

Малі споживачі, які через обмежені ресурси не можуть брати участь на ринку електричної енергії самостійно, отримують можливість це робити завдяки агрегаторам. Останні перетворюють гнучкість споживання в ліквідні ринкові продукти, формуючи пул керованого навантаження, що діє як єдиний ресурс [2].

Цілі та задачі. Цілями роботи є визначення основних принципів організації роботи агрегатора побутових споживачів і використання електричних накопичувальних водонагрівачів (ЕНВ) для підвищення гнучкості енергетичної системи.

Раніше, в роботах [3], нами було досліджено та показано можливість використання побутових ЕНВ для надання послуг з реагування на попит в енергосистемі. Задачами цієї роботи є дослідження механізмів агрегування побутових споживачів для підвищення гнучкості енергетичної системи, визначення ролі агрегаторів у цьому процесі, аналіз регуляторних, технічних та економічних аспектів їхньої діяльності. Особлива увага приділяється аналізу існуючих підходів до залучення побутових споживачів до програм реагування на попит, визначенню ключових аспектів впровадження цифрових технологій для управління енергоспоживанням, а також оцінці ефективності бізнес-моделей агрегаторів і перспектив розвитку автоматизованих систем моніторингу та аналізу споживання енергоресурсів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Відповідно до чинного законодавства, агрегація є ліцензованим видом діяльності на ринку електричної енергії [5], що здійснюється суб'єктами господарювання. Вона передбачає об'єднання електроустановок, призначених для виробництва, споживання або

зберігання енергії, з метою її купівлі-продажу, надання допоміжних послуг та послуг з балансування в межах ринку електричної енергії. Агрегатор визначається як учасник ринку електричної енергії, який здійснює управління потужностями виробників, споживачів або операторів систем зберігання енергії для забезпечення надання допоміжних послуг та балансування енергосистеми.

З точки зору побутових споживачів, основна роль агрегатора полягає у наданні консультаційної підтримки та сприянні спрощенню їхньої участі на ринку електроенергії, мінімізації обмежень та максимізації фінансових вигод від використання ресурсів реагування на попит. Це передбачає врахування різних параметрів: часові періоди доступності ресурсу, тривалість надання послуг, умови попереднього повідомлення перед активацією, особливості винагороди (фіксована та змінна частини), а також можливі штрафні санкції у разі невиконання диспетчерських команд. Як незалежний постачальник послуг, агрегатор може діяти окремо від договорів на постачання електричної енергії, пропонуючи централізоване управління споживанням.

Серед основних завдань агрегатора, як гравця на енергетичному ринку є:

1. Пошук споживачів, які здатні гнучко змінювати споживання без шкоди для їхньої діяльності чи комфорту;
2. Оцінка наявних ресурсів реагування на попит у споживачів, а також розробка оптимальних алгоритмів їхньої участі в програмах;
3. Забезпечення споживачів необхідними пристроями автоматизації для зручності управління споживанням;
4. Виконання функцій агента на оптовому ринку, що дозволяє споживачам не розбиратися у складних правилах та не проходити процедури допуску на ринок;
5. Об'єднання ресурсів споживачів у групи, реєстрація їх у системі агрегатора для централізованого управління навантаженням.

Агрегатор також бере на себе відповідальність за управління ресурсами та фінансові розрахунки з учасниками на ринку. Після реєстрації учасників у власній системі агрегатор здійснює реєстрацію ресурсів у системах оператора системи передачі (ОСП) та системі управління ринком для їхньої участі на балансуєчому

ринку (БР). Окрім цього, він проводить сертифікацію потужностей на відповідність технічним вимогам Кодексу системи передачі (КСП) [6], що є умовою для участі на ринку допоміжних послуг (РДП).

З метою забезпечення операційної діяльності агрегатор, як зареєстрований учасник ринку з присвоєним ЕІС-кодом типу Х, зобов'язаний укласти відповідні договори. Зокрема, це договір про надання послуг з передачі електричної енергії, договір про надання послуг з диспетчерського (оперативно-технологічного) управління відповідно до КСП, а також договір про врегулювання небалансів електричної енергії з ОСП згідно з положеннями Правил ринку [7]. Порядок укладення цих договорів передбачає обов'язкове заповнення заяви-приєднання до відповідного договору

У ролі сторони відповідальної за баланс (СВБ) агрегатор несе фінансову відповідальність за небаланси своєї агрегованої групи виключно в частині виконання диспетчерських команд. Для регулювання взаємовідносин між агрегатором і споживачем передбачено укладання договору про участь в агрегованій групі. Відповідно до його умов, споживач бере на себе зобов'язання щодо обмеження споживання та дотримання відповідних технічних регламентів, а агрегатор забезпечує споживача необхідним обладнанням і компенсує надані послуги. Оплата може здійснюватися напряму агрегатором або через постачальника, який враховуватиме її при розрахунках за електричну енергію.

Типова форма договору, а також інформаційна та фінансова моделі взаємодії сторін повинні бути визначені в нормативно-правових актах. Для участі на БР та РДП агрегатор має отримати статус постачальника послуг балансування (ППБ) та постачальника допоміжних послуг (ПДП).

Бізнес модель агрегатора при залучені побутових споживачів до реагування на попит. Економічна ефективність програм реагування на попит залежить від балансу між витратами та доходами, що дозволяє створити прибуткову бізнес-модель. Хоча більшість досліджень зосереджено на розробці нових стратегій торгів і управлінні гнучкістю в реальному часі, кінцевий рівень

доходів агрегаторів визначається специфікою конкретних ринків та вибраною бізнес-моделлю [8].

Витрати на програми реагування на попит поділяються на дві основні категорії: капітальні витрати (CAPEX) та операційні витрати (OPEX). До капітальних витрат відносяться витрати на інфраструктуру зв'язку, необхідну для передачі даних між постачальниками гнучкості та агрегатором, і залежність цих витрат від початкової технічної бази. Операційні витрати включають витрати на обробку даних і активацію гнучкості, які можуть бути пов'язані з автоматизацією процесів для забезпечення надійного та передбачуваного реагування системи.

Крім того, вартість активації гнучкості залежить від типу об'єкта: для промислових об'єктів зменшення виробництва може бути високовартісним, тоді як для побутових споживачів ці витрати можуть бути значно меншими або навіть нульовими. Якщо постачальник гнучкості не може виконати зобов'язання, він може понести штрафні санкції, що також входить до операційних витрат [9]. Агрегування споживачів для надання послуг балансування та допоміжних послуг вимагає комплексного підходу з урахуванням кількох важливих аспектів [8], включаючи витрати на комунікації, обчислення, транзакції, активації та можливі штрафні санкції. Ці витрати можна класифікувати за двома основними категоріями: капітальні та операційні витрати, що детально аналізуються в подальшому. Нижче наведено детальний аналіз кожного з цих аспектів:

1. (CAPEX): Програми реагування на попит потребують наявності двостороннього каналу зв'язку між постачальником гнучкості (кінцевим споживачем) та диспетчером агрегованих ресурсів. Цей канал забезпечує передачу даних про поточне споживання енергії, а також отримання команд на активацію гнучкості. Вартість такої інфраструктури значно залежить від початкового стану системи на стороні споживача та кінцевих цілей комунікації. Слід зазначити, що для деяких ручних програм достатньо встановлення стандартних розумних лічильників, що суттєво зменшує витрати на комунікації;

2. Обчислення (OPEX): Обчислювальні витрати змінюються й залежать від рівня автоматизації процесів та кількості даних, що використовуються для

керування системою. Якщо контроль централізований, більша частина витрат лягає на агрегатора, а у випадку розподіленого управління витрати можуть розподілятися між різними системами управління енергоспоживанням. Рівень автоматизації прямо впливає на складність обчислювальних процесів і відповідно на витрати;

3. Транзакції (CAPEX): Це включає витрати на організацію транзакцій, таких як збір інформації про продукти та послуги, облік клієнтів, управління контрактами та виконання зовнішніх транзакцій. Ці витрати є фіксованими й залежать від того, наскільки агрегатор автоматизував свої бізнес-процеси;

4. Активації (OPEX): Вартість активації гнучкості є ключовим фактором. Якщо активація гнучкості, наприклад, призводить до зупинки промислового виробництва, витрати на таку активацію можуть бути високими. Натомість у випадку зменшення споживання накопичувальними водонагрівачами, витрати можуть дорівнювати нулю, оскільки таке зменшення не призводить до втрат для споживача;

5. Штрафні санкції (OPEX): У разі ненадання запитаної гнучкості або невиконання вимог ринку агрегатор може зазнати штрафних санкцій. Це включає додаткові витрати на компенсацію за небаланс електричної енергії, що збільшує операційну вартість.

Ці фактори визначають бізнес-модель та фінансову стратегію агрегатора. Агрегатор може виконувати роль як фінансового посередника, представляючи інтереси клієнтів, так і технічного оператора, який управляє обладнанням споживачів. Важливою основою ефективної роботи агрегатора є автоматизована система управління гнучкістю, здатна динамічно реагувати на ринкові сигнали та забезпечувати необхідну обчислювальну потужність. Підвищення автоматизації, розвиток телеметрії та вдосконалення управління ризиками допомагають знижувати операційні витрати та збільшувати прибутковість [10], що є ключовою метою сучасного енергетичного ринку.

Взаємодія агрегатора з учасниками ринку електричної енергії. Розглянемо наступну схему організації роботи агрегатора. Він залучає дрібних

споживачів з ЕНВ для об'єднання їх у єдину групу, яка бере участь на БР та РДП. Це дозволяє побутовим споживачам використовувати потенціал своїх електроприладів, пропонуючи їх для балансування як гнучкі енергетичні ресурси.

На першому етапі залучення кожен споживач проходить процедуру реєстрації в системі агрегатора, після чого відбувається оцінка його технічного потенціалу для надання послуг. Це передбачає збір даних про потужність електроустановок, їх режими роботи та можливості коригування споживання. Для управління агрегатор забезпечує оснащення електроустановок ЕНВ спеціалізованими пристроями керування, які дозволяють здійснювати віддалений моніторинг та контроль споживання електричної енергії. Агрегатор інтегрує всі пристрої у єдину систему, що дозволяє здійснювати оперативне управління гнучкістю агрегованої групи.

Наступний етап – реєстрація агрегованої групи як ресурсного об'єкта. Всі споживачі об'єднуються у єдину одиницю агрегації, що має статус ресурсу, здатного надавати послуги балансування. Цей ресурс реєструється у відповідних ринкових сегментах, що дає змогу агрегатору брати участь у аукціонах. Для участі у ринку агрегатор повинен здійснювати прогнозування споживання та можливого розподілу навантаження. Аналітичні моделі аналізують історичні дані, поточний стан системи, а також поведінкові аспекти споживачів. Це дозволяє визначити очікуваний рівень споживання та потенційні можливості для його регулювання.

Далі, на основі прогнозів агрегатор формує пропозиції для ринку. Зібрані дані про споживання використовуються для розробки графіків, що відповідають ринковим вимогам. Визначаються оптимальні обсяги та ціни для участі в аукціонах на БР та РДП. Завдяки системі моніторингу агрегатор може в режимі реального часу коригувати обсяги пропозицій відповідно до змін у споживанні або вимог ринку. Це дозволяє зменшити ризики та забезпечити максимальну відповідність ринковим потребам. Агрегатор подає планові графіки відбору потужності на відповідні ринкові платформи. Це включає розрахунок очікуваного

навантаження та визначення часових інтервалів, у яких агрегована група може змінювати рівень споживання.

На наступному етапі агрегатор подає пропозиції на аукціони БР та РДП. У разі прийняття пропозицій агрегатор зобов'язується дотримуватися узгоджених умов та забезпечувати гнучкість споживання відповідно до потреб оператора системи передачі (ОСП). Якщо ОСП видає диспетчерські команди щодо коригування споживання, агрегатор передає ці команди кінцевим споживачам через систему віддаленого керування. Керування здійснюється автоматично, що дозволяє швидко реагувати на ринкові зміни та забезпечувати точне виконання команд. Після виконання диспетчерських команд агрегатор здійснює моніторинг фактичного виконання зобов'язань. Зібрані дані про зміну навантаження використовуються для формування звітності та оцінки ефективності реалізації балансуєчих послуг.

На завершальному етапі агрегатор проводить фінансові розрахунки та розподіл доходів між учасниками агрегованої групи. Кожен споживач отримує винагороду пропорційно до його внеску в загальну гнучкість системи. Це дозволяє стимулювати споживачів до активної участі у програмі агрегатора та підвищувати ефективність управління електроенергією.

На рис. 1 представлено схему взаємодії споживачів з ЕНВ, агрегатора, постачальника, оператора системи розподілу (ОСР), ОСП та виробників.

Запропонована бізнес-модель аналізується з урахуванням її інтеграції в чинну структуру ринку електричної енергії, де управління попитом та включення агрегаторів передбачають складну систему договірних відносин між усіма учасниками.

Споживачі з ЕНВ укладають договір постачання електричної енергії з постачальником, що регулює їхні комерційні відносини, та договір про участь в агрегованій групі з агрегатором, який забезпечує гнучке управління навантаженням. ОСР здійснює фізичну доставку електричної енергії споживачам і веде комерційний облік, укладаючи відповідний договір розподілу та обліку.

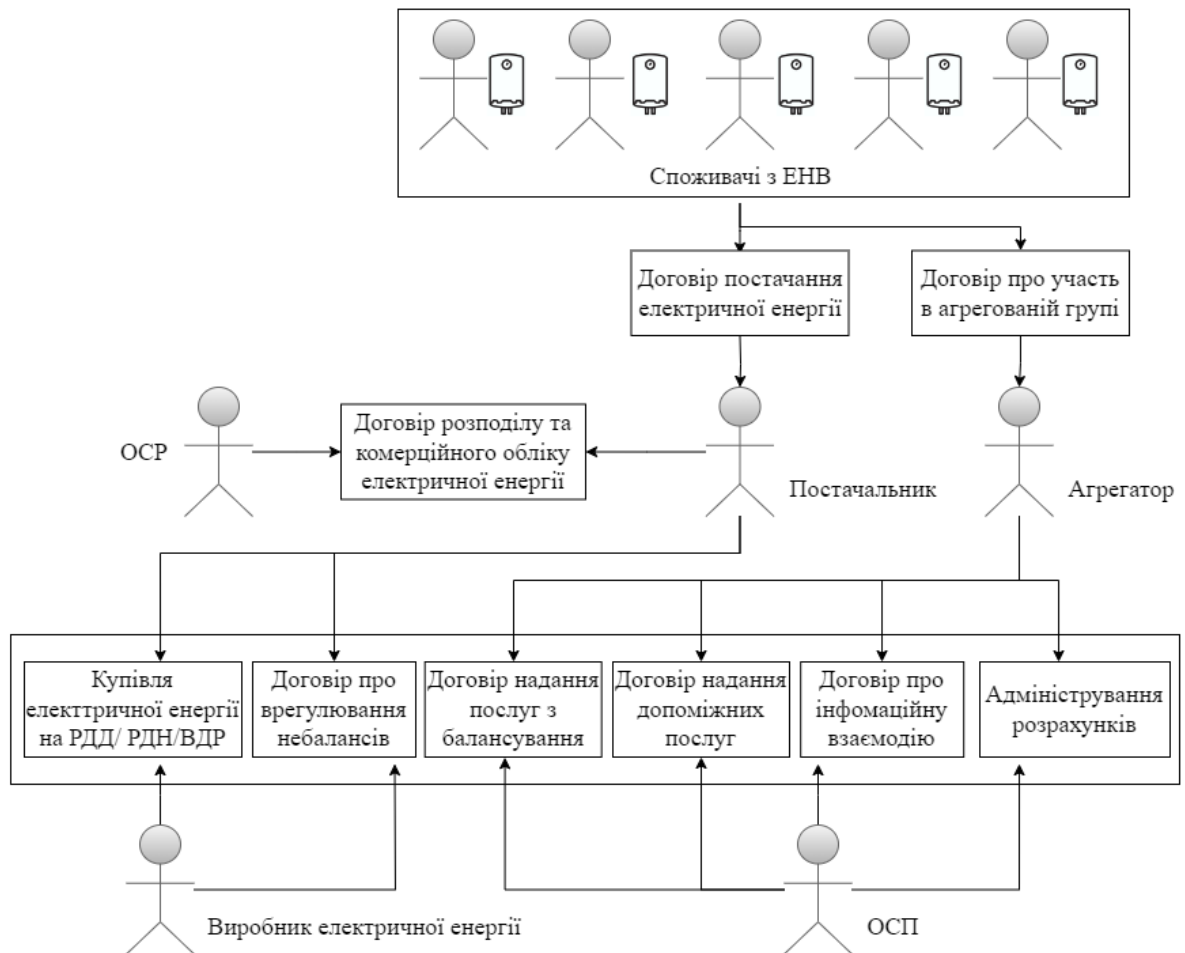


Рисунок 1 – Діаграма взаємозв'язків агрегатора з учасниками ринку

Агрегатор виконує низку ключових завдань. Він бере участь у регулюванні небалансів, зменшуючи розбіжності між прогнозованим та фактичним споживанням, а також надає послуги з балансування та допоміжні послуги. Він також забезпечує ефективну інформаційну взаємодію між учасниками ринку для координації змін у навантаженні та адмініструє розрахунки.

В межах діяльності з агрегації, агрегатор, використовуючи засоби моніторингу та керування електроживленням, забезпечує гнучке управління споживанням навантаження груп споживачів. Така модель дозволяє зменшувати споживання електричної енергії у певні проміжки часу з метою продажу керованого навантаження в ринок. За рахунок обмеження агрегованого споживання агрегатор надає послуги з балансування на БР, а також резерву потужності на РДП.

Ключовими аспектами роботи агрегатора є не лише технічна складова – виконання телеметрії та віддаленого керування – а й взаємодія з ринковими

механізмами, зокрема дотримання вимог і правил, які встановлює ринок. Для участі споживачів в агрегованих групах необхідно дотримуватись встановлених Правилами ринку умов, які регулюють права та обов'язки сторін.

Інфраструктура агрегатора. Автоматизовані системи керування навантаженням є центральним елементом у створенні ефективної інфраструктури для впровадження програм реагування на попит. Такі системи дозволяють агрегаторам відслідковувати споживання електричної енергії побутових споживачів у реальному часі, здійснювати дистанційне керування електроприладами, такими як накопичувальні водонагрівачі, та адаптувати їхню роботу до змін у навантаженні енергосистеми.

Одним із найбільш перспективних напрямків є інтеграція ЕНВ до систем реагування на попит через використання технологій Інтернету речей (IoT). Ці технології забезпечують зв'язок між приладами та агрегаторами через платформи віддаленого керування, що дозволяє автоматично змінювати режими роботи водонагрівачів залежно від ринкових сигналів. Завдяки цьому агрегатори можуть швидко реагувати на зміни попиту або пропозиції електричної енергії, здійснюючи дистанційне управління навантаженням на основі сигналів від оператора системи передачі.

Ефективне впровадження програм реагування на попит вимагає інтеграції агрегаторів із ринковою інфраструктурою. Використання гнучких ресурсів сприяє підтриманню стабільності енергосистеми, зниженню витрат на балансування та покращенню управління енергетичними ресурсами. Для участі в ринку агреговані потужності мають бути зареєстровані як ресурсні об'єкти. Це передбачає отримання ЕІС-кодів для кожного об'єкта та визначення віртуальних точок комерційного обліку.

Формування агрегованих груп здійснюється за регіональним принципом із прив'язкою до відповідного ОСР. Процес організації таких груп включає подання заявок споживачами, встановлення необхідного обладнання та облік їхнього електроспоживання. Після завершення цього етапу учасники реєструються у

системі агрегатора та закріплюються за агрегованими групами, що забезпечує централізоване управління ресурсами.

Інфраструктура агрегатора повинна мати дворівневу функціональну структуру:

1. Верхній рівень представлений сервером управління та інтеграції, який забезпечує автоматизацію управлінських процесів. Він відповідає за обробку даних, формування ресурсних графіків, моніторинг роботи системи та взаємодію з ринковими платформами;

2. Нижній рівень складається з інтелектуальних модулів енергокерування (ІМЕ), які встановлюються у кінцевих споживачів. Вони здійснюють моніторинг параметрів електроспоживання та дистанційне регулювання роботи підключених електроприладів.

Обмін інформацією між ІМЕ і сервером управління та інтеграції здійснюється через мережу передачі даних мобільного зв'язку. ІМЕ у режимі реального часу передають дані про споживання електричної енергії та отримують команди керування. Ці дані є основою для формування індивідуальних профілів споживання, прогнозування загального електроспоживання агрегованих груп і прийняття рішень щодо активації гнучкості.

Телеметричні дані, що надходять від ІМЕ, зберігаються в базі даних сервера управління. Вони використовуються для створення індивідуальних профілів споживачів, аналізу історичних даних, прогнозування споживання та визначення потенційної гнучкості. Крім цього, телеметричні дані забезпечують формування комерційного обліку для розрахунків небалансів, що є важливим компонентом у роботі агрегатора.

Для відповідності регуляторним вимогам агрегатор має зареєструватися як постачальник послуг комерційного обліку та укласти договір із адміністратором комерційного обліку. Це дозволяє виконувати збір, обробку та передачу даних телеметрії відповідно до нормативно-правових актів.

На етапі реєстрації ресурсів агрегатор проводить детальний аналіз та тестування об'єктів, включаючи випробування на відповідність критеріям

надання допоміжних послуг. Зібрані телеметричні дані дають змогу прогнозувати споживання, створювати ресурсні графіки та приймати рішення щодо активації гнучкості.

Моніторинг надання послуг на ринку допоміжних послуг здійснюється через передачу телеметричних даних до систем моніторингу ринку. Дані повинні відповідати встановленим вимогам щодо якості та формату, визначеним у нормативних документах.

Агрегатор взаємодіє із системою управління ринком через Інтернет, дотримуючись вимог до каналів зв'язку, протоколів обміну та інтерфейсів. Процес створення ресурсів передбачає поступову інтеграцію учасників, від укладання договорів між постачальниками та агрегаторами до реєстрації об'єктів у системі управління ринком.

Аналіз викликів та бар'єрів для участі побутових споживачів. Для ефективної роботи зі своїм "портфелем" учасників агрегатору важливо враховувати особливості мотивації та логіки дій побутових споживачів. Програми реагування на попит часто викликають складнощі у побутових споживачів через недостатню обізнаність про їхні переваги та механізми роботи. Багато побутових споживачів не мають достатньо інформації та не розуміють алгоритмів дій, що допомогли б їм економити без шкоди для комфорту, тому використовують прості, але менш ефективні методи зниження споживання. Через таке обмежене розуміння переваг та можливостей програм, значний потенціал ефективного керування навантаженням залишається незадіяним. Для агрегатора актуальним завданням є розробка зрозумілих і зручних стратегій, які побутові користувачі можуть легко інтегрувати у щоденну рутину, що допоможе підвищити їхнє розуміння та залученість у програми реагування на попит.

У дослідженні [11] моделюються ефективні стратегії зниження споживання електричної енергії в пікові періоди з використанням двох типів профілів поведінки споживачів: "наївної" та "розумної" стратегії. Моделювання проводилося для родини з двох дорослих, які використовують пральну машину вранці або ввечері. "Наївна" стратегія передбачає просте вимкнення світла та

телевізора, тоді як "розумна" пропонує перенесення використання енергоємної техніки на нічний час.

Результати симуляцій демонструють, що "розумна" стратегія суттєво знижує навантаження на мережу під час пікових годин. Так, при перенесенні прання на нічний період споживання в піковий час знижується до 71 %, а пікове навантаження скорочується на 2,21 кВт-год. У той же час "наївна" стратегія забезпечує зниження лише до 11 %, та супроводжується дискомфортом для споживача. Це підтверджує, що "розумна" стратегія є більш ефективною і практично не впливає на комфорт. Схожі висновки можна зробити і щодо можливих стратегій обмеження споживання ЕНВ.

З цього можна зробити висновок, що перенесення енергоємних процесів на позапікові години, автоматизоване сучасними приладами з функцією відкладеного старту, показало себе як простий і доступний підхід до реагування на попит. Це не лише економить кошти побутових споживачів, особливо при нічних тарифах, а й сприяє стабілізації електромережі, забезпечуючи масштабований і ефективний інструмент енергозбереження.

Задоволеність клієнтів безпосередньо залежить від їхньої поінформованості. Складні взаємодії між рівнями та режимами використання гарячої води, режимами роботи водонагрівачів, налаштуваннями температури, змішувальними клапанами та програмами реагування на попит можуть бути заплутаними для багатьох кінцевих користувачів. Дослідження [12] показало, що учасники програми не завжди були повністю обізнані про очікувані результати та свою роль у процесі.

Тому важливо використовувати кілька каналів комунікації з учасниками програми, з достатньою повторюваністю, щоб чітко пояснити їм цілі програми, їхню роль та способи отримання допомоги для вирішення будь-яких питань [13]. Крім того, підвищення рівня прозорості та доступності інформації сприяє зміцненню довіри споживачів до механізмів реагування на попит. Регулярний моніторинг задоволеності учасників, інтерактивні платформи зворотного зв'язку та персоналізовані рекомендації можуть допомогти мінімізувати бар'єри

сприйняття та забезпечити більш ефективну інтеграцію побутових споживачів у програми реагування на попит.

Двосторонній зв'язок між агрегатором і споживачем є ключовим компонентом програм керування водонагрівачами, оскільки він дозволяє оптимізувати процес нагріву води та підвищити точність роботи пристроїв. Такий зв'язок дає змогу водонагрівачам не тільки отримувати керуючі сигнали, але й надсилати зворотну інформацію про свій стан і реакцію на ці сигнали. Це забезпечує більш ефективне керування, контроль за виконанням команд та своєчасну діагностику можливих збоїв у роботі системи.

Системи агрегатора при залучені споживачів до програм реагування на попит. Системи енергоменеджменту сьогодні стають центральним інструментом стратегічного управління споживанням і розподілом електричної енергії. Їх використання дозволяє агрегаторам визначати оптимальні часові інтервали для купівлі та продажу електричної енергії на різних ринкових сегментах, базуючись на аналізі динаміки цін. Водночас важливим завданням таких систем є оптимальне централізоване управління, що мінімізує відхилення навантаження в портфелі агрегатора. Це досягається через гнучку реконфігурацію режимів роботи окремих споживачів.

В основі програм реагування на попит лежать два ключових фактори: фінансові вигоди та комфорт кінцевих споживачів. Ці аспекти залежать від тарифів і графіків споживання енергії. Використання методів управління попитом через цінові сигнали дозволяє мінімізувати безпосередню взаємодію між споживачами та операторами системи, забезпечуючи плавне регулювання споживання.

Для досягнення балансу між економічною ефективністю та комфортом споживачів агрегаторам слід розробляти спеціалізовані алгоритми оптимізації. Вони дозволяють не лише ефективно використовувати внутрішні ресурси системи, але й своєчасно інформувати споживачів про можливі відключення або зміни в графіках енергопостачання.

Ефективні алгоритми управління повинні забезпечувати стабільну роботу великої кількості пристроїв із різними характеристиками енергоспоживання у широкому часовому діапазоні. Головною метою є максимальне наближення фактичного графіка навантаження до заданої цільової кривої.

Двосторонній обмін інформацією між споживачами та постачальниками енергії створює додаткові можливості для інтеграції накопичувачів енергії та управління побутовими приладами, такими як системи опалення чи кондиціювання.

Однією з основних задач агрегатора, при плануванні торгових стратегій, є створення індивідуальних профілів споживання для кожного споживача. Це дозволяє аналізувати загальне навантаження на розподільчі мережі та прогнозувати можливі пікові ситуації. Адже одночасне використання енергії великою кількістю споживачів підвищує ризики аварій.

Інформаційна інфраструктура – це основа успішного функціонування систем реагування на попит. Розумні лічильники, які здатні передавати дані у реальному часі, забезпечують детальний аналіз споживання та оперативне прийняття управлінських рішень. Такі системи дають змогу розробляти адаптивні алгоритми управління, що автоматично налаштовують роботу «розумних» розеток, водонагрівачів чи інших пристроїв. Це сприяє оптимізації взаємодії між споживачами та постачальниками енергії.

Серед перспективних напрямів розвитку програм реагування на попит слід виділити:

- модернізацію інфраструктури житлових та комерційних об'єктів, включаючи інтеграцію «розумних» пристроїв;
- створення платформ для персоналізованих рекомендацій щодо участі у програмах енергоменеджменту;
- використання штучного інтелекту для прогнозування навантаження та управління стабільністю електромережі.

Хоча потенціал реагування на попит є значним [14], його повна реалізація залежить від рівня інформованості та фінансових стимулів для споживачів.

Подальші дослідження мають оцінювати ефективність таких програм у реальних умовах, демонструючи їхню здатність не лише балансувати мережу, але й надавати допоміжні послуги.

Висновки. В роботі проведено аналіз ключових аспектів залучення побутових споживачів до програм реагування на попит через механізм агрегації. Визначено основні принципи організації роботи агрегатора, яка враховує правила енергоринку. Описано організаційну модель взаємодії агрегатора з ринком електричної енергії України, яка охоплює регуляторні вимоги, механізми ліцензування, договірні зобов'язання та необхідну інфраструктуру. Визначено особливості участі агрегаторів на БР та РДП, а також проаналізовано механізми інтеграції побутових споживачів у ці ринки.

Досліджено основні аспекти впровадження цифрових технологій для забезпечення дистанційного моніторингу та керування агрегатором енергоспоживанням ЕНВ. Визначено пріоритетність застосування IoT-рішень та побудови двостороннього зв'язку між агрегатором і споживачами.

Проаналізовано особливості залучення домогосподарств до програм реагування на попит через механізм агрегації. Показана критична важливість надання споживачам прикладів ефективних стратегій управління власним навантаженням для збереження власного комфорту, підвищення рівня обізнаності щодо переваг і можливостей участі в програмах реагування на попит.

Програми реагування на попит відкривають нові можливості для підвищення енергоефективності та стабільності енергосистем. Але їх реалізація буде неможливою без агрегаторів, які мають відігравати ключову роль, інтегруючи інноваційні технології та цифрові рішення, які дозволяють споживачам брати участь у ринкових процесах без складнощів.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Bruninx K., Pandžić H., Le Cadre H., Delarue E. On the Interaction between Aggregators, Electricity Markets and Residential Demand Response Providers. IEEE Trans. Power Syst., 2020, № 35. P. 840–853.

2. Holmberg D.; Omar F. Characterization of Residential Distributed Energy Resource Potential to Provide Ancillary Services; National Institute of Standards and Technology: Gaithersburg. MD. USA, 2023.
3. Кіянчук В. М. Участь побутових споживачів на енергетичних ринках через керування попитом / В. М. Кіянчук, К. В. Махотіло // *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит / Energy saving. Power engineering. Energy audit*, 2023. № 9-10 (187-188). С. 6–35.
4. Kiiianchuk V. and Makhotilo K. "Modeling of Domestic Electric Water Heaters for Demand Response," *2024 IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. Kharkiv. Ukraine, 2024. P. 1–6. doi: 10.1109/KhPIWeek61434.2024.10878015.
5. Про внесення змін до деяких законів України щодо відновлення та "зеленої" трансформації енергетичної системи України: Закон України від 30 червня 2023 р. № 3220-IX. Відомості Верховної Ради України, 2023, № 82, ст. 301. [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3220-20> (дата звернення: 15.01.2025).
6. Кодекс системи передачі [Електронний ресурс] // Постанова НКРЕКП 14.03.2018 № 309. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0309874-18#Text> (дата звернення: 15.01.2025).
7. Правила ринку [Електронний ресурс] // Постанова НКРЕКП 14.03.2018 № 307. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0307874-18> (дата звернення: 15.01.2025).
8. Okur Ö.; Heijnen P.; Lukszo Z. Aggregator's business models in residential and service sectors: A review of operational and financial aspects. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2021. № 139. 110702.
9. Zoričić, D.; Knežević, G.; Miletić, M.; Dolinar, D.; Sprčić, D.M. Integrated Risk Analysis of Aggregators: Policy Implications for the Development of the Competitive Aggregator Industry. *Energies*, 2022. № 15. 5076.
10. Kubli M.; Canzi P. Business strategies for flexibility aggregators to steer clear of being “too small to bid”. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2021. № 143. 110908.
11. Kiiianchuk V. Analysing household consumers' demand response through behavioural load profiles. Technical Scientific Conference of Undergraduate, Master, PhD students, Technical University of Moldova, Chisinau, 5 April 2023. Chisinau, 2023. P. 80–83.
12. NEEA. NEEA Heat Pump Water Heaters for Demand Response and Energy Storage : звіт / Northwest Energy Efficiency Alliance, 2014. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [final-hpwh-dr-report-and-summary.pdf](#). (дата звернення: 15.01.2025).
13. Tantau A.; Puskás-Tompos A.; Fratila L.; Stanciu C. Acceptance of Demand Response and Aggregators as a Solution to Optimize the Relation between Energy Producers and Consumers in order to Increase the Amount of Renewable Energy in the Grid. *Energies*, 2021. № 14.3441.
14. IEA. IEA DR tracking report [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.iea.org/energy-system/energy-efficiency-and-demand/demand-response> (дата звернення: 15.01.2025).

REFERENCES:

1. Bruninx K., Pandžić H., Le Cadre H., Delarue E. On the Interaction between Aggregators, Electricity Markets and Residential Demand Response Providers. *IEEE Trans. Power Syst.*, 2020, № 35. P. 840–853.
2. Holmberg D.; Omar F. Characterization of Residential Distributed Energy Resource Potential to Provide Ancillary Services; National Institute of Standards and Technology: Gaithersburg. MD. USA, 2023.
3. Kiyanchuk, V. M., & Makhotilo, K. V. (2023). Participation of Household Consumers in Energy Markets Through Demand Management. *Energy Saving. Power Engineering. Energy Audit*, 2023. № 9-10 (187-188). С. 6–35.

4. Kiianchuk V. and Makhotilo K. "Modeling of Domestic Electric Water Heaters for Demand Response," *2024 IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. Kharkiv. Ukraine, 2024. P. 1–6. doi: 10.1109/KhPIWeek61434.2024.10878015.
5. Law of Ukraine No. 3220-IX of June 30, 2023, on Amendments to Certain Laws of Ukraine Regarding the Restoration and "Green" Transformation of Ukraine's Energy System. Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine, 2023, № 82, Article 301. [Electronic resource]. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3220-20> (Accessed: January 15, 2025).
6. Transmission System Code [Electronic resource] // Resolution of the National Commission for State Regulation of Energy and Public Utilities № 309 of March 14, 2018. – Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0309874-18#Text> (Accessed: January 15, 2025)
7. Market Rules [Electronic resource] // Resolution of the National Commission for State Regulation of Energy and Public Utilities № 307 of March 14, 2018. – Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0307874-18> (Accessed: January 15, 2025).
8. Okur Ö.; Heijnen P.; Lukszo Z. Aggregator's business models in residential and service sectors: A review of operational and financial aspects. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2021. № 139. 110702.
9. Zoričić, D.; Knežević, G.; Miletić, M.; Dolinar, D.; Sprčić, D.M. Integrated Risk Analysis of Aggregators: Policy Implications for the Development of the Competitive Aggregator Industry. *Energies*, 2022. № 15. 5076.
10. Kubli M.; Canzi P. Business strategies for flexibility aggregators to steer clear of being “too small to bid”. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2021. № 143. 110908.
11. Kiianchuk V. Analysing household consumers' demand response through behavioural load profiles. Technical Scientific Conference of Undergraduate, Master, PhD students, Technical University of Moldova, Chisinau, 5 April 2023. Chisinau, 2023. P. 80–83.
12. NEEA. NEEA Heat Pump Water Heaters for Demand Response and Energy Storage: report / Northwest Energy Efficiency Alliance, 2014. – [Electronic resource]. – Available at: [final-hpwh-dr-report-and-summary.pdf](#) (Accessed: January 15, 2025).
13. Tantau A.; Puskás-Tompos A.; Fratila L.; Stanciu C. Acceptance of Demand Response and Aggregators as a Solution to Optimize the Relation between Energy Producers and Consumers in order to Increase the Amount of Renewable Energy in the Grid. *Energies*, 2021. № 14.3441.
14. International Energy Agency. (n.d.). Demand Response. Available at: <https://www.iea.org/energy-system/energy-efficiency-and-demand/demand-response> (Accessed: January 15, 2025).

Надійшла до редакції 20.02.2025р.