

Кулапін Олександр, асистент кафедри «Електричні станції», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Тел. (068) 532 75 60, e-mail: oleksandr.kulapin@ieec.khpi.edu.ua. ORCID: 0000-0001-9283-6910

Махотіло Костянтин, доцент кафедри «Електричні станції», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». Тел. (050) 029 75 09, e-mail: kostiantyn.makhotilo@khpi.edu.ua. ORCID: 0000-0001-7081-071X

Івахнов Андрій, асистент кафедри «Електричні станції», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». Тел. (066) 029 34 22, e-mail: andrii.ivakhnov@khpi.edu.ua. ORCID: 0000-0001-8280-0033

Гриценко Владислав, асистент кафедри «Електричні станції», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». Тел. (066) 129 65 90, e-mail: vladyslav.hrytsenko@ieec.khpi.edu.ua. ORCID: 0000-0002-4499-0603

Федорчук Станіслав, ст.викладач кафедри «Електричні станції», Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут". тел. (095) 290 19 66, e-mail: stanislav.fedorchuk@khpi.edu.ua. ORCID: 0000-0001-7676-8313

Булгаков Олексій, асистент кафедри «Електричні станції», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». Тел. (050) 280 24 02, e-mail: olexii.bulhakov@khpi.edu.ua. ORCID: 0000-0002-3244-420X

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

ФУНКЦІЇ ОПЕРАТОРА РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ ПРИ ОДНОРАНГОВІЙ ТОРГІВЛІ У ГРУПІ ПРОСЬЮМЕРІВ

***Анотація.** У статті розглядається тема взаємної торгівлі між просьюмерами на одному рівні. За допомогою збільшення об'єму розподіленої генерації в електромережі виникає можливість знизити перетікання потужності, що, в свою чергу, допомагає зменшити втрати потужності та напругу. Це відкриває можливість для просьюмерів стати учасниками енергетичного ринку, і для звичайних споживачів – отримувати електроенергію за цінами, які нижчі за базові тарифи, встановлені енергопостачальними компаніями. Стаття приділяє увагу аналізу торгівлі електроенергією між просьюмерами і звичайними споживачами, а також ролі операторів розподілених систем у цьому процесі. Описано концепцію однорангової торгівлі та системну модель. Досліджено вплив різних видів просьюмерів, їх економічні стимули та санкції за порушення правил. Детально розглядається модель просьюмера, що включає навантаження, відновлювані джерела енергії, систему накопичення енергії для її зберігання та комутаційне обладнання. Зазначено, що метою ринкового врегулювання є розв'язання централізованої проблеми, яку може вирішити центральний оператор з доступом до приватної інформації споживачів. Запропонований метод використовує ринок гнучкості низької напруги, на якому споживачі підключені до одного фідера. Вони утворюють між собою спільноту просьюмерів і беруть участь у ринку гнучкості. Обмеження споживачів рівнем низьковольтних мереж знижує гнучкість, але дозволяє підвищити ефективність обчислень. Крім того, просьюмери в точці з'єднання можуть конкурувати один з одним, щоб забезпечити агреговану гнучкість на низькому рівні напруги. ОПГ забезпечує необхідну гнучкість однорангового ринку з огляду на обмеження напруги та перевантаженість розподільчих мереж.*

***Ключові слова:** однорангова торгівля, споживання домогосподарств, моделювання навантаження, просьюмер, зберігання енергії, відновлювані джерела енергії*

Kulapin Oleksandr, dept. assistant “Electric Power Stations”, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, tel. (068) 532 75 60, e-mail: oleksandr.kulapin@ieec.khpi.edu.ua. ORCID: 0000-0001-9283-6910

Makhotilo Kostiantyn, associated-prof. of dept. “Electric Power Stations” National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, тел. (050) 029 75 09, e-mail: kostiantyn.makhotilo@khpi.edu.ua. ORCID: 0000-0001-7081-071X

Ivakhnov Andrii, dept. assistant “Electric Power Stations” National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, tel. (066) 029 34 22, e-mail: andrii.ivakhnov@khpi.edu.ua. ORCID: 0000-0001-8280-0033

Hrytsenko Vladyslav, dept. assistant “Electric Power Stations” National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, tel. (066) 129 65 90, e-mail: vladyslav.hrytsenko@ieec.khpi.edu.ua. ORCID: 0000-0002-4499-0603

Fedorchuk Stanislav, senior lecturer of dept. “Electric Power Stations” National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, tel. (095) 290 19 66, e-mail: stanislav.fedorchuk@khpi.edu.ua. ORCID: 0000-0001-7676-8313

Bulhakov Olexii, dept. assistant “Electric Power Stations” National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, tel. (050) 280 24 02, e-mail: olexii.bulhakov@khp.edu.ua. ORCID: 0000-0002-3244-420X
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kyrychova Str., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002.

FUNCTIONS OF THE DISTRIBUTED SYSTEM OPERATOR IN PEER-TO-PEER TRADING IN THE PROSUMER GROUP

Abstract. The article discusses the topic of mutual trade between prosumers at the same level. By increasing the amount of electricity distributed in the grid, it becomes possible to reduce the flow of electrical power in the grid, which in turn helps to reduce power losses and reduce voltage. This opens up an opportunity for prosumers to become participants in the Energy Market, and for ordinary consumers to receive electricity at prices that are lower than the basic tariffs set by energy supply companies. The article pays attention to the analysis of electricity trade between prosumers and ordinary consumers, as well as the role of distributed system operators in this process. The concept of peer-to-peer trading and the system model are described. The influence of different types of prosumers, their economic incentives and sanctions for violation of the rules is studied. The prosumer model is discussed in detail, including loads, renewable energy sources, battery system for energy storage, and switching equipment. It is noted that the purpose of market regulation is to solve a centralized problem that can be solved by a central operator with access to consumers' private information. The proposed method uses a low-voltage flexibility market in which consumers are connected to a single feeder. They form a community of prosumers among themselves and participate in the flexibility market. Limiting consumers to the level of low-voltage networks reduces flexibility, but allows to increase the efficiency of calculations. In addition, prosumers at the connection point can compete with each other to provide aggregate flexibility at low voltage levels. ORG provides the necessary flexibility of the peer-to-peer market in view of voltage limitations and congestion of distribution networks.

Keywords: peer-to-peer, household consumption, load modelling, prosumer, energy storage, renewable energy sources, distributed system operator

Вступ. Швидке поширення розподілених енергетичних ресурсів (PER) все більше впливає на виробництво, передачу та споживання електроенергії. При цьому вплив здійснюється як на рівні Micro-Grid (низьковольтних), так і міжрегіональних магістральних (високовольтних) мереж. Ці тенденції призвели до появи і швидкого збільшення числа нового класу споживачів-просьюмерів. Такі споживачі одночасно виробляють і споживають енергію. Значне збільшення їх кількості одночасно вимагає і веде до переходу до більш децентралізованої енергосистеми [1]. Їх діяльність потребує коригування з урахуванням характеристик централізованих мереж, режиму роботи електромереж, а також функцій оператора. За таких обставин оператор мережі повинен нести відповідальність одночасно за продаж енергії і за використання ліній електропередачі. Все це необхідно для просьюмерських спільнот, які могли б продавати енергію в мережу.

Викладення основного матеріалу. На даний момент у світі є багато країн, які субсидують та допомагають розвивати відновлювану генерацію. Однак деякі розвинені країни вирішили припинити свою політику субсидій на впровадження нових програм розподіленої генерації в зв'язку з тим, що існуюча техніко-правова база не в повній мірі відповідає високому попиту серед населення. Такі обмеження можуть призвести до значного падіння популярності відновлюваної генерації, економічних втрат для інвесторів у сфері відновлюваної енергетики та уповільнення розвитку розумних мереж.

Для переходу на низьковуглецеву енергетику вкрай важливо збільшити виробництво відновлюваної енергії, тому важливо знайти нові способи стимулювання побутових споживачів енергії [2,3]. З огляду на велику

кількість відновлюваних джерел електроенергії (ВДЕ), яка зростає, це проблема, яка може мати відповідний вплив на енергетичний ринок. Розподілені енергетичні ресурси радикально змінюють способи виробництва та споживання енергії, а традиційні споживачі енергії стають просьюмерами [4]. Збільшення відновлюваної енергетики на рівні побутових споживачів потребує нових ринкових підходів до ціноутворення, децентралізації, гнучкості енергетичного ринку та управління енергетичною інфраструктурою [5,6]. Необхідно створити локальні енергетичні ринки, де можна було б торгувати відновлюваною енергією на місцевому рівні без посередників, безпосередньо між споживачами [7].

Рішенням може стати peer-to-peer trading (P2P), що є альтернативою активній участі просьюмерів на енергетичному ринку. P2P дозволяє споживачам торгувати електроенергією зі своїми сусідами. Крім того, P2P-торгівля енергією дає кінцевим користувачам більшу гнучкість, більше можливостей для споживання чистої енергії та допомагає перейти до низьковуглецевої енергетичної системи. Крім того, інші учасники ринку електроенергії можуть скористатися такими перевагами, як нижчий піковий попит на електроенергію, нижчі витрати на технічне обслуговування та експлуатацію, а також підвищення надійності електричної системи [8–11]. В даний час значна кількість публікацій присвячена торгівлі енергоносіями між споживачами та енергетичними компаніями. Стрімке зростання числа ВДЕ і просьюмерів все більше позначається на енергетичному ринку, який був створений на базі централізованих систем. Згідно з останніми дослідженнями [8–10] P2P-торгівля енергією, покращує це, та підтримується баланс у виробництві та споживанні енергії за рахунок більшої різноманітності виробників енергії. Це також дозволяє провести децентралізацію енергетичного ринку [7], що забезпечує підвищену безпеку системи та зменшення збоїв у ланцюжку поставок.

Сполучені Штати Америки є одним зі світових лідерів, який постійно підтримує політику відновлюваної генерації. Прикладом такої підтримки є програма Virtual Net Metering (VNM), яка допомагає субсидувати рахунки для державних об'єктів відновлюваної енергетики. Енергія, що виробляється в системі, розподіляється між різними користувачами, тому просьюмери можуть отримувати додатковий прибуток у разі надмірного виробництва енергії. У світі вже існують однорангові (P2P) платформи, які інтегровані в мережу. Наприклад, Pico [12,13], спеціалізується на розробці цифрових платформ для енергетичного сектору. Вони пропонують інноваційні рішення для сприяння розвитку відновлюваної енергетики та енергоефективності. Одним з основних сервісів є платформа для торгівлі енергетичними даними між виробниками, споживачами та розподільчими компаніями. Vandebroun Company [14,15] яка спеціалізується на сонячній та вітровій енергетиці та пропонує своїм клієнтам можливість вибору джерела, з якого буде подаватися електроенергія.

В [16], запропоновано модель P2P-ринку для одночасної торгівлі прогнозованою та стохастичною PV-потужністю. У цьому документі використовується гнучкість споживачів для контролю стохастичної фотоелектричної потужності. Однак потенціал гнучких ресурсів в управлінні мережевими обмеженнями не досліджується. В [17], запропоновано спільну модель P2P та балансуючого ринку. У цій роботі використовується балансуючий ринок у поєднанні з системою моніторингу перевантаження для розрахунку необхідної гнучкості від кожного споживача для гарантування дотримання обмежень мережі. Модель роботи в [18] розглядає основи спільного планування та торгівлі електроенергією просьюмерами на гнучкому ринку. Однак ринок гнучкості запускається лише для управління навантаженням розподільних трансформаторів, тоді як інші мережеві обмеження не враховуються.

З огляду на наведені вище приклади в існуючих роботах, необхідно дослідити структури в торгівлі енергією, в яких просьюмери зможуть брати участь в P2P-торгівлі енергією і взаємодіяти з Оператор Розподіленої Генерації (ОРГ) через гнучкий ринок. Дослідити використання акумуляторних систем накопичення енергії (АСНЕ) у децентралізованій торгівлі енергією на рівні розподілу. Також досліджується важливість використання АСНЕ для підтримки гнучкості та запобігання дисбалансу в мережі.

Просьюмери, як новий учасник енергетичних ринків. Обмеження які накладають відновлювальні джерела, вимагають від просьюмерів дуже високого рівня енергетичної ефективності будівлі, її інженерних систем, побутових приладів, і також високої енергетичної і екологічної свідомості мешканців.

При розгляді типового енергетичного балансу житлової будівлі, можна помітити що понад 70% енергоспоживання припадає на компенсацію теплових втрат системою опалення. В абсолютних значеннях, це складається у надто великі об'єми енергії, щоб забезпечувати їх лише за рахунок відновлювальних джерел. Більш того, навіть при забезпеченні системи опалення і гарячого водопостачання від традиційних викопних джерел, енергобаланс будинку просьюмера все одно включає в себе додаткові електричні витрати на насосах, системах автоматики, моторизованої запірної арматури, тощо. Ці витрати погодозалежні, і їх пік припадає на той час, коли продуктивність відновлювальних джерел мінімальна. Просте збільшення генеруючих і акумуляторних потужностей не виглядає привабливим рішенням для вирішення цих проблем, через те що неминуче призведе до підвищення надлишків генерації влітку, ускладнить балансування та збільшить вартість енергетичної установки. Виходячи з цього, можна зробити висновок, що для просьюмерів, вкрай важливо мати якомога менші витрати на опалення, охолодження, гаряче водопостачання і вентиляцію, щоб

мінімізувати їх частку в загальному енергобалансі, і скоротити залежність графіку навантаження від кліматичних умов.

Саме тому Образ сучасного просьюмера повинен базуватися на будівлі, яка максимально ефективно забезпечує комфорт, за рахунок мінімізації тепловтрат, використанню рекуперативної вентиляції, та попереднього підігріву свіжого повітря за рахунок ґрунтового теплообміннику. Найвідомішою концепцією яка це об'єднує – являється «Пасивний будинок» (нім. Passivhaus). Це будівельний стандарт, описаний такими критеріями [19]:

- Питома витрата теплової енергії на опалення, визначена розрахунками в програмі «Пакет планування Пасивного Будинку» (PHPP) ≤ 15 кВт·год/(м²·рік);
- або навантаження на опалення ≤ 10 Вт·м²;
- Спеціальні вимоги попиту охолодження будівлі ≤ 15 кВт·год/(м²·рік);
- Щорічний період перегріву (температура в приміщенні вище 25 °С) ≤ 10 %;
- Результат тесту на герметичність (N50) $\leq 0,6$ зміни повітря/год;
- Загальне споживання первинної енергії для всіх побутових потреб (опалення, гаряча вода й електрична енергія) ≤ 120 кВт·год/м²·рік (≈ 7500 кВт·год/людина).

Застосування підходів «пасивного» будівництва дозволяє досягти вражаючих результатів по скороченню витрат, пов'язаних з обігріванням і охолодженням приміщень, а саме, до 90% порівняно зі стандартним будівельним фондом і понад 75% порівняно із середніми новобудовами.

Також треба брати до уваги, що подальше розповсюдження і популяризація пасивних будинків в Європі вже має законодавче підґрунтя. Директива енергетичних показників у будівництві (Energy Performance of Buildings Directive) [20], яку було прийнято країнами Євросоюзу в грудні 2009 року, вимагає з 1 січня 2020 року наближення усіх нових будівель до енергетичної нейтральності (тобто будівництва як мінімум пасивних будівель).

Використання сонячних панелей, вітрогенераторів та акумуляторів для енергопостачання пасивного будинку, надає можливість утворення нульового, а іноді і плюсового енергетичного балансу. Такі будинки як правило називаються «Активними», тобто такими що виробляють (загалом протягом року) енергії більше ніж споживають. Важливо зазначити, що в українських кліматичних умовах, значно доцільніше виглядає використання електричних теплових насосів у якості основного теплогенератора для таких будинків. Саме утворення надлишків у енергобалансі будівлі, призводить до бажання їх продати в централізовані енергомережі, і це є основним підґрунтям для явища просьюмеризму.

Ринок однорангової торгівлі між просьюмерами. На даний момент базовим варіантом торгівлі електроенергією є односторонній процес. Це виражається в тому, що електроенергія зазвичай передається від великих

виробників до споживачів, а грошовий потік, навпаки, йде в протилежному напрямку. Створення P2P-торгівлі призведе до багатосторонньої торгівлі локальними мережами низької (і середньої) напруги, як показано на рис.1. При цьому на рис.1 показана модель однорангової торгівлі, яка включає споживачів, просьюмерів, енергетичну компанію та оператора ОРГ, де через лінії електропередачі проходить обмін енергією і інформацією між учасниками мережі та ОРГ.

Основою взаємодії ОРГ та споживачів на такому ринку може бути принцип аукціону. ОРГ буде формувати ціну, на послуги просьюмерів, динамічно, з урахуванням ринкової ситуації в будь-який момент часу. Головними умовами такої системи є:

- структура формування, яка дозволяє споживачам брати участь у ринку P2P та використовувати свої енергетичні активи для допомоги оператору ОРГ в управлінні мережевими обмеженнями;
- платформа продажів, заснована на спільноті просьюмерів, що дозволяє ОРГ забезпечувати безпечну роботу системи, отримуючи гнучкі послуги від просьюмерів;
- цінова політика призначена для динамічного ціноутворення на електроенергію з інтервалом в одну годину і менше з урахуванням ситуації на енергетичному ринку.

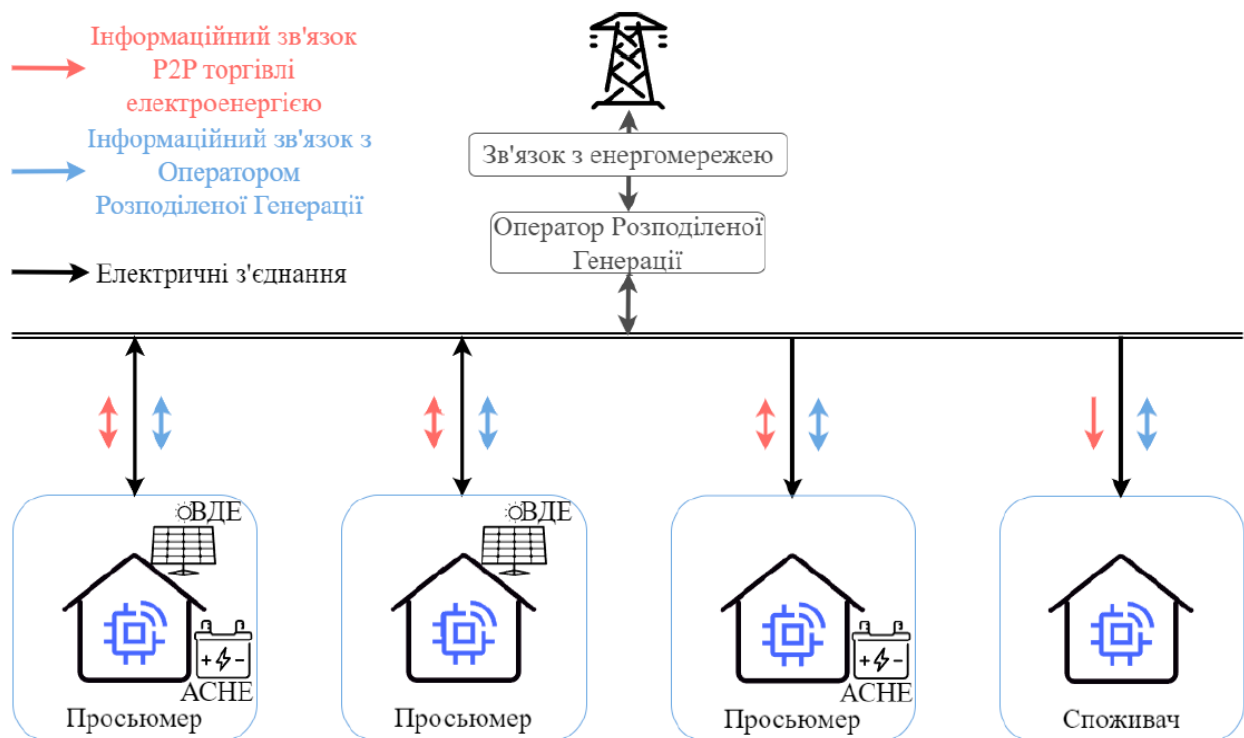


Рис. 1. Однорангова модель торгівлі енергією

Таким чином, масове збільшення просьюмерів, за кількох умов, може забезпечити більш децентралізовану та відкриту електричну мережу [1].

Збільшення використання відновлюваних джерел енергії на рівні домогосподарств потребує нових ринкових підходів до ціноутворення, децентралізації енергетичного ринку та управління енергетичною інфраструктурою [3–5]. Необхідно створити локальні енергетичні ринки, де вироблена або накопичена енергія може продаватися локально, безпосередньо між просьюмерами, споживачами та мережею. Мікромережа, утворена просьюмерами та споживачами, обмінюється енергією з електроенергетичною компанією. Обмін здійснюється через оператора розподільчої мережі. Однорангова торгівля енергією підвищить безпеку мережі та покращить місцевий баланс виробництва та споживання енергії за рахунок більшої різноманітності генераторів енергії.

Функції учасників ринку однорангової торгівлі. В моделі, що показана на рис.1, ОРГ виступає, в ролі незалежного ринкового оператора, який керує інтегрованим місцевим ринком енергії, допоміжними послугами та розподілом енергії и для P2P торгівлі. Головною функцією якого є керування ринками в кількох часових масштабах таких як, ринок реального часу та ринок на добу наперед.

ОРГ також керує обміном енергією з головною енергомережею, що вимагає координації з ринками операторів системи передачі енергії як показано у роботі [21]. В цьому дослідженні ми зосереджуємося на впровадженні ринку з інтервалом впровадження ціни 15 хвилин, коли ОРГ несе відповідальність за забезпечення достатньої потужності та гнучкості навантаження для підтримки стабільності та балансування мережі в режимі реального часу, з акцентом на координацію між P2P торгівлею та наданням допоміжних послуг для закупівлі. До функцій ОРГ також входить керування ринком допоміжних послуг (участь в первинному та вторинному регулюванні частоти). Також на ОРГ лягає задача ціноутворення та розрахунків за послуги на ринках однорангової торгівлі.

Головною функцією просьюмера є керування оптимальними параметрами своїх активів, тобто системи генерації, накопичувачів енергії та навантаженням. З цією метою розподілені енергетичні ресурси, які розглядаються на вищезгаданих ринках однорангової торгівлі енергією діляться на розподілену генерацію з можливостями продажу активної потужності та гнучке навантаження з можливостями гнучкого споживання активної потужності. Усі учасники ринку вважаються економічно раціональними, отже, вони прагнуть максимізації свого індивідуального економічного надлишку. В принципі, кожен просьюмер має можливість брати участь в одному з ринків або в обох ринках одночасно шляхом розподілу ресурсів відповідно.

Модель однорангової торгівлі енергією. Кожен просьюмер може бути покупцем (споживачем) або продавцем (виробником), в залежності від його навантаження і профілю генерації. На ринку P2P споживачі спілкуються з усіма іншими споживачами, щоб досягти згоди щодо кількості та ціни

енергії в кожній угоді. Просьюмери можуть домовлятися з декількома торговими партнерами одночасно. Метою таких переговорів є максимізація прибутку просьюмера, тобто різниці між витратами на покупку енергії з мережі і продажу її. Прибуток кожного просьюмера в P2P-торгівлі можна розрахувати за формулою (1):

$$F = \sum_w \sum [A_b(w, t_i) \cdot \Delta T - B_v(w, t_i) \cdot \Delta T + C(t_i)] \quad (1)$$

де $w = 1, N$ – номер просьюмера; N – кількість просьюмерів; i – номер періоду часу; ΔT – тривалість періоду, годин; $t_i = i \cdot \Delta T$ – період часу; $A_b(w, t_i)$ – складова продажів, що визначається за формулою (2); $B_v(w, t_i)$ – складова закупівлі, що визначається за формулою (3); $C(t_i)$ – стимулююча складова, що визначається за формулою (4).

$$A_b(w, t_i) = \lambda_{b,L}(t_i) \cdot P_{b,L}(w, t_i) + \lambda_{b,G}(t_i) \cdot P_{b,G}(w, t_i) \quad (2)$$

де $\lambda_{b,L}(t_i)$ – тариф на купівлю енергії у сусіда-просьюмера в період часу t_i , грошова одиниця/кВт·год; $P_{b,L}(w, t_i)$ – потужність, отримана від сусіда-просьюмера в період часу t_i , кВт; $\lambda_{b,G}(t_i)$ – тариф на закупівлю енергії з мережі в період t_i , грошова одиниця/кВт·год; $P_{b,G}(w, t_i)$ – потужність, отримана від мережі в період t_i , кВт.

$$B_v(w, t_i) = \lambda_{v,L}(t_i) \cdot P_{v,L}(w, t_i) + \lambda_{v,G}(t_i) \cdot P_{v,G}(w, t_i) \quad (3)$$

де $\lambda_{v,L}(t_i)$ – тариф на продаж енергії сусіду-просьюмеру в період t_i , грошова одиниця/кВт·год; $P_{v,L}(w, t_i)$ – потужність, продана сусідові-просьюмеру в період часу t_i , кВт; $P_{v,G}(w, t_i)$ – потужність, продана в мережу в період t_i , кВт; $\lambda_{v,G}(t_i)$ – тариф на продаж енергії в мережу в період t_i , грошова одиниця/кВт·год.

$$C(t_i) = C_{rw,DR}(t_i) \cdot x_{rw,DR}(t_i) - C_{pn,DR}(t_i) \cdot x_{pn,DR}(t_i) \quad (4)$$

де $C_{rw,DR}(t_i)$ – одноразова виплата просьюмеру за надання послуг зі зменшення або збільшення навантаження на мережу, грошова одиниця; $x_{rw,DR}(t_i)$ – двійкова змінна, що дорівнює 1, якщо просьюмер надав послуги з управління попитом в період t_i , в іншому випадку – 0; $C_{pn,DR}(t_i)$ – сплата штрафу просьюмером за порушення надання мережевих-послуг з управління попитом протягом періоду t_i , грошова одиниця; $x_{pn,DR}(t_i)$ –

двійкова змінна, що дорівнює 1, якщо просьюмер порушив правила надання послуг з управління попитом протягом періоду t_i , в іншому випадку 0.

Сумарна генерована або спожита потужність просьюмерів за кожен часовий інтервал є сумою угод з усіма торговими партнерами. При вирішенні оптимізаційної задачі:

$$F \rightarrow \max \quad (5)$$

Також необхідно враховувати реалізацію різного роду техніко-економічних обмежень. До них відносяться: забезпечення електропостачання самого просьюмера, підтримання балансу потужності всередині спільноти просьюмерів, обмеження передачі потужностей в мережу, обмеження стану і швидкості зміни зарядів акумуляторів, виконання умов надання послуг з управління попитом. Однак передбачається, що просьюмери завжди можуть продавати енергію, вироблену фотоелектричною системою або АСНЕ, в мережу за мінімальною фіксованою ціною. Де робота мережі виконує функцію гарантованого покупця. Таким чином, у випадку з клієнтом функція витрат передбачає мінімально прийнятну ціну продавця, яка повинна бути вищою за фіксовану мінімальну ціну з мережі. Ринковий розрахунок в P2P-трейдингу спрямований на пошук оптимального розподілу енергії між споживачами з метою максимізації прибутку, формула (5). Фактично пошук оптимального розподілу здійснюється по трьох головним параметрам просьюмера: встановлена потужність ВДЕ, ємність систем накопичення (АСНЕ) та його власне споживання.

Метою ринкового врегулювання є розв'язання централізованої проблеми, яку може вирішити центральний оператор з доступом до приватної інформації споживачів. Координація торгівлі оператором мережі здійснюється наступним чином. ОРГ отримує профіль планування споживача та вирішує проблему потоку електроенергії на основі чистої планової потужності споживачів. В умовах, коли обмеження розподільчої мережі не задовольняється, через перевантаження або інші надзвичайні ситуації, оператор мережі бере на себе управління перетоками потужності. Запропонований метод використовує ринок гнучкості низької напруги, на якому споживачі підключені до одного фідера. Вони утворюють між собою спільноту просьюмерів і беруть участь у ринку гнучкості. Обмеження споживачів рівнем низьковольтних мереж знижує гнучкість, але дозволяє підвищити ефективність обчислень. Крім того, просьюмери в точці з'єднання можуть конкурувати один з одним, щоб забезпечити агреговану гнучкість на низькому рівні напруги. ОРГ забезпечує необхідну гнучкість однорангового ринку з огляду на обмеження напруги та перевантаженість розподільчих мереж.

Ринок гнучкості P2P – це ринок, заснований на спільноті для кожного джерела дистриб'юторської мережі. На основі запиту на гнучкість від

оператора ОРГ споживачі можуть поділитися гнучкістю з іншими споживачами, які знаходяться в тому ж фідері, щоб підтримувати обмеження мережевої безпеки. Відповідно до гнучкості торгової системи, заснованої на спільноті, споживачі мають більше свободи для забезпечення необхідної гнучкості. Іншими словами, якщо деякі просьюмери, не можуть забезпечити гнучкість, інші просьюмери в спільноті можуть її забезпечити. Крім того, така гнучка торгова система, заснована на спільноті, створює конкурентне середовище для виробників, які забезпечують гнучкість, що призводить до цінової гнучкості, прийнятної для всіх виробників.

Результати моделювання. Модель просьюмера показана на рис. 2. Дана модель в ключовому навантаженні, ВДЕ, АСНЕ і комутаційному обладнанні. Основним елементом мікромережі є акумулятор. Таким чином, для просьюмерів налаштування пропускної здатності АСНЕ є основним завданням. Ємність акумулятора залежить від стратегії планування мікромережі та пов'язана з реакцією просьюмера на попит та ціну ресурсів. Просьюмер АСНЕ може використовуватися як джерело або навантаження для двонаправленого обміну енергією з мікромережею.

В якості тестового об'єкта дослідження були обрані дві сім'ї, що складаються з двох працюючих дорослих і двох дітей-підлітків. Склад і характеристики побутової техніки обох сімейств відповідає сучасним уявленням про комфорт і розвиток побутової техніки. У моделі просьюмера використані дані, засновані на результатах роботи [22].

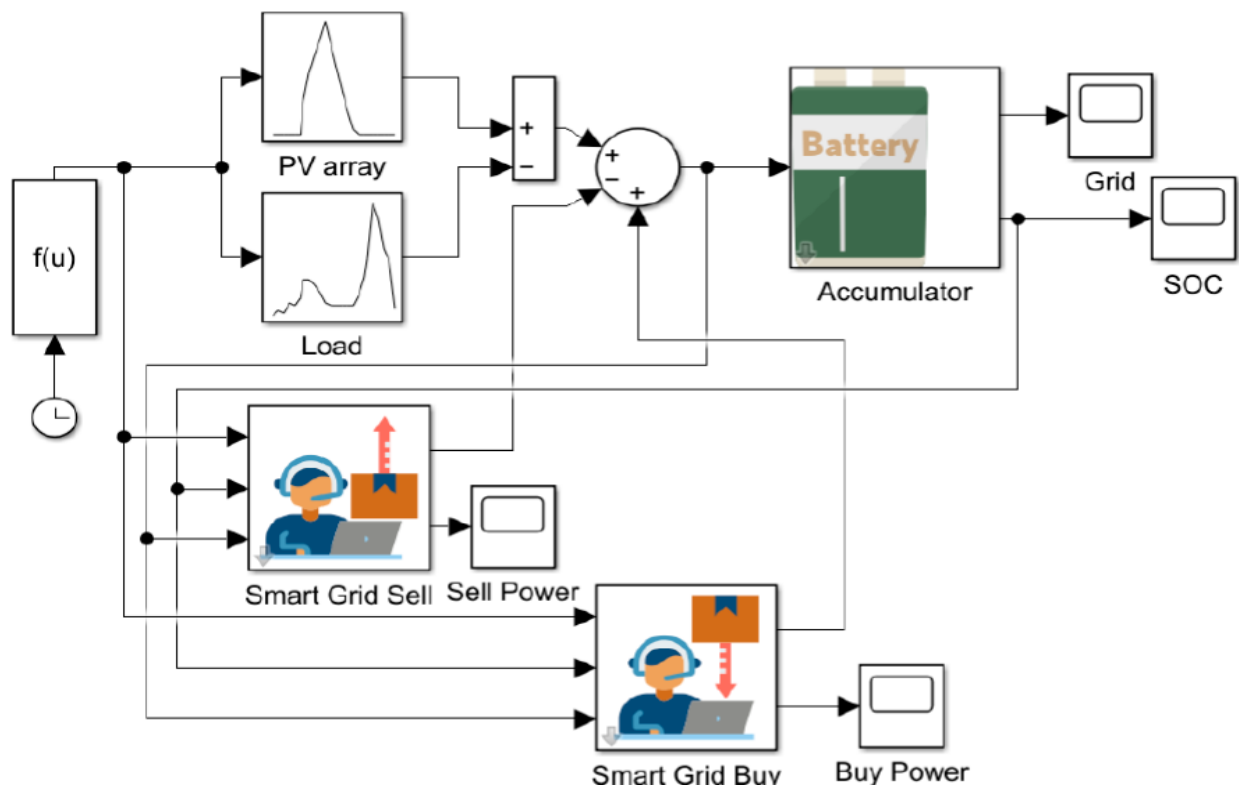


Рис. 2. Модель просьюмера

Стратегія споживання електроенергії спрямована на максимізацію вигоди просьюмера. Основна ідея полягає в наступному, вранці АСНЕ розряджається для покриття власного навантаження просьюмера, а дефіцит потужності, що залишився, компенсується купівлею електроенергії з мережі або сусіднього домогосподарства. У другій половині дня навантаження забезпечується генерацією. Дефіцит навантаження, що залишився, компенсується закупівлею електроенергії на гнучкому ринку. В порівнянні з жорстким навантаженням, гнучке навантаження має сильну здатність реагувати на попит, тому може реагувати на зміну ціни на електроенергію. Моделювання проводиться для одного типу просьюмерів при різній номінальній потужності дахової сонячної електростанції. Номінальна потужність варіюється від 2 до 120 кВт. Для моделювання процесу оптимізації використовувалося програмне забезпечення Matlab. Дослідження показало, що при встановленій потужності сонячної електростанції на рівні 5 кВт необхідна ємність накопичувача енергії становила 14 кВт·год. При подальшому збільшенні потужності PV оптимальна потужність АСНЕ зменшується. При встановленій потужності сонячної електростанції вище 12 кВт необхідна потужність АСНЕ не змінюється і дорівнює 13 кВт·год. Це пов'язано з тим, що потужності встановленої СЕС достатньо для покриття навантаження просьюмера. Який показує аналогічний результат використання АСНЕ, як і в [23].

Висновки. У статті розглянуто перспективну структуру торгівлі енергоносіями на рівні розподілу в межах прибудинкової території. У ньому головну роль відіграють системи накопичення електроенергії, які дозволяють передавати в часі накопичену вироблену або взятую з мережі енергію. Також можна бути впевненим, що експлуатація такої системи без АСНЕ призведе до зниження гнучкості та постійного дефіциту або профіциту в мережі. Таким чином, споживачі можуть торгувати P2P-енергією за допомогою децентралізованих переговорів. Споживачі, які взаємодіють з ОРГ, можуть надавати послуги гнучкості на ринках гнучкості громад на основі аукціонів. Крім того, просьюмери можуть забезпечити гнучкість, якої вимагає ОРГ. Таким чином, з огляду на гнучкість ринку, не тільки підтримується напруга розподільчої мережі в прийнятному діапазоні, але і запобігає перевантаженню в лініях.

Наступний етап дослідження передбачає створення більш детальної моделі для виробників з урахуванням невизначеності Application of the concept of energy hubs to ensure power balance in the Power Grid та адаптивних стратегічних пропозицій виробників.

Список використаної літератури:

1. Masaud T., Warner J., El-Saadany E. A Blockchain-Enabled Decentralized Energy Trading Mechanism for Islanded Networked Microgrids. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 211291–211302.

2. Filgueira Á., Lima A., Castelo Jose Sarto. Adoption intention of photovoltaic solar systems. *Rev. Adm. UFSM*. 2022. Vol. 15. P. 137–157.
3. Koster D. et al. Single-Site Forecasts for 130 Photovoltaic Systems at Distribution System Operator Level, Using a Hybrid-Physical Approach, to Improve Grid-Integration and Enable Future Smart-Grid Operation. *Sol. RRL*. 2023. Vol. 7, № 8. P. 2200652.
4. Luo Y. et al. Autonomous cooperative energy trading between prosumers for microgrid systems. *39th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks Workshops*. 2014. P. 693–696.
5. Kerscher S., Arbolea P. The role of DSOs, retailers, utilities, and aggregators in the new distribution network paradigm. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. 2022.
6. Kulapin O. et al. Prospects of Using Prosumers to Analyze the Potential of Demand Management. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2022. P. 1–7.
7. Hönen J., Hurink J., Zwart B. *A Classification Scheme for Local Energy Trading*. 2022.
8. Efthymiopoulos N. et al. FLEXGRID – A novel smart grid architecture that facilitates high-RES penetration through innovative flexibility markets towards efficient stakeholder interaction. 2021. Vol. 1. P. 128.
9. Lopez H. K., Zilouchian A. Peer-to-peer energy trading for photo-voltaic prosumers. *Energy*. 2023. Vol. 263. P. 125563.
10. *Peer-to-peer electricity trading - Innovation Landscape Brief*. Abu Dhabi: IRENA, 2020.
11. Morstyn T., McCulloch M. Peer-to-Peer Energy Trading. *Analytics for the Sharing Economy: Mathematics, Engineering and Business Perspectives*. 2020. P. 279–300.
12. Mujeeb A., Hong X., Wang P. Analysis of Peer-to-Peer (P2P) Electricity Market and Piclo's Local Matching Trading Platform in UK. *2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*. 2019. P. 619–624.
13. Piclo — The UK's leading independent marketplace for flexible energy systems. URL: <https://www.piclo.energy/> (accessed: 27.06.2023).
14. Shan S., Li Y., Li H. Motivations behind P2P energy trading: a machine learning approach. *Int. J. Chin. Cult. Manag.* Inderscience Publishers. 2022. Vol. 5, № 3. P. 189–202.
15. Vandebrom - Duurzame energie van Nederlandse bodem. URL: <https://vandebron.nl/> (accessed: 27.06.2023).
16. Pena-Bello A. et al. Integration of prosumer peer-to-peer trading decisions into energy community modelling: 1. *Nat. Energy. Nature Publishing Group*, 2022. Vol. 7, № 1. P. 74–82.
17. Cali U., Fifield A. Towards the decentralized revolution in energy systems using blockchain technology. *Int. J. Smart Grid Clean Energy*. 2019. P. 245–256.
18. Andoni M. et al. Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2019. Vol. 100. P. 143–174.
19. What is a Passive House? URL: https://passipedia.org/basics/what_is_a_passive_house (accessed: 06.11.2023).
20. Energy performance of buildings directive. URL: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en (accessed: 06.11.2023).
21. Gerard H., Rivero E., Six D. Basic schemes for TSO-DSO coordination and ancillary services provision Checked by WP leader [Daan Six] Approved by Project Coordinator [Gianluigi Migliavacca (RSE)]. *Issue Record Status and version FINAL About SmartNet*. SmartNet. 2016. Vol. D1.3. 100 p.
22. Kulapin O., Makhotilo K. Improved behavioral load model of the household prosumer. *Energy*. Tbilisi, Georgia: JSC “Telasi”. 2021. Vol. 2 (98)/2021. P. 120–125.
23. Кулапін О. В., Махотіло К. В. *Моделювання смарт-мережі споживачів-просьюмерів з фотоелектричними системами*. Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут,” 2019.

References:

1. Masaud T., Warner J., El-Saadany E. A Blockchain-Enabled Decentralized Energy Trading Mechanism for Islanded Networked Microgrids. *IEEE Access*, 2020, Vol. 8, pp. 211291–211302.
2. Filgueira Á., Lima A., Castelo Jose Sarto. Adoption intention of photovoltaic solar systems. *Rev. Adm. UFSM*, 2022, Vol. 15, pp. 137–157.

3. Koster D. et al. Single-Site Forecasts for 130 Photovoltaic Systems at Distribution System Operator Level, Using a Hybrid-Physical Approach, to Improve Grid-Integration and Enable Future Smart-Grid Operation. *Sol. RRL*, 2023, Vol. 7, № 8, pp. 2200652.
4. Luo Y. et al. Autonomous cooperative energy trading between prosumers for microgrid systems. *39th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks Workshops*, 2014, pp. 693–696.
5. Kerscher S., Arboleya P. The role of DSOs, retailers, utilities, and aggregators in the new distribution network paradigm. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, 2022.
6. Kulapin O. et al, pprospects of Using Prosumers to Analyze the Potential of Demand Management. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, 2022, pp. 1–5.
7. Hönen J., Hurink J., Zwart B. *A Classification Scheme for Local Energy Trading*. 2022.
8. Efthymiopoulos N. et al. FLEXGRID – A novel smart grid architecture that facilitates high-RES penetration through innovative flexibility markets towards efficient stakeholder interaction. 2021, Vol. 1, pp. 1287.
9. Lopez H. K., Zilouchian A. Peer-to-peer energy trading for photo-voltaic prosumers. *Energy*, 2023, Vol. 263, pp. 125563.
10. *Peer-to-peer electricity trading - Innovation Landscape Brief*. Abu Dhabi: IRENA, 2020.
11. Morstyn T., Mcculloch M, ppeer-to-Peer Energy Trading. *Analytics for the Sharing Economy: Mathematics, Engineering and Business Perspectives*, 2020, pp. 279–300.
12. Mujeeb A., Hong X., Wang P. Analysis of Peer-to-Peer (P2P) Electricity Market and Piclo’s Local Matching Trading Platform in UK. *2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, 2019, pp. 619–624.
13. Piclo — The UK’s leading independent marketplace for flexible energy systems. Available at: <https://www.piclo.energy/> (accessed: 27.06.2023).
14. Shan S., Li Y., Li H. Motivations behind P2P energy trading: a machine learning approach. *Int. J. Chin. Cult. Manag.* Inderscience Publishers, 2022. Vol. 5, № 3, pp. 189–202.
15. Vandebrom - Duurzame energie van Nederlandse bodem. Available at: <https://vandebron.nl/> (accessed: 27.06.2023).
16. Pena-Bello A. et al. Integration of prosumer peer-to-peer trading decisions into energy community modelling: 1. *Nat. Energy. Nature Publishing Group*, 2022, Vol. 7, № 1, pp. 74–82.
17. Cali U., Fifield A. Towards the decentralized revolution in energy systems using blockchain technology. *Int. J. Smart Grid Clean Energy*, 2019, pp. 245–256.
18. Andoni M. et al. Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2019, Vol. 100, pp. 143–174.
19. What is a Passive House? Available at: https://passipedia.org/basics/what_is_a_passive_house (accessed: 06.11.2023).
20. Energy performance of buildings directive. Available at: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en (accessed: 06.11.2023).
21. Gerard H., Rivero E., Six D. Basic schemes for TSO-DSO coordination and ancillary services provision Checked by WP leader [Daan Six] Approved by Project Coordinator [Gianluigi Migliavacca (RSE)]. *Issue Record Status and version FINAL About SmartNet*. SmartNet, 2016, Vol. D1.3, 100 p.
22. Kulapin O., Makhotilo K. Improved behavioral load model of the household prosumer. *Energy*. Tbilisi, Georgia. JSC “Telasi”, 2021, Vol. 2 (98)/2021, pp. 120–125.
23. Kulapin O. V., Makhotilo K. V. Modeling of smart network of consumers-prosumers with photovoltaic systems. National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute," 2019.

Надійшла до редакції 19.05.2023р.