

МОНІТОРИНГ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ В ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ

С.П. Денисюк^{*}, докт. техн. наук, Г.С. Белоха^{**}, канд. техн. наук, К.М. Гілевич^{***},
І.С. Чернешук^{****}

Національний технічний університет України Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського
пр. Берестейський, 37, Київ, Україна,
e-mail: pointage13@gmail.com

Локальна електроенергетична система є децентралізованою мережею, одним із завдань якої є оптимізоване керування розподіленими енергетичними ресурсами. Для досягнення ефективної інтеграції та взаємодії в роботі локальних систем на рівні житлових будинків та комерційних будівель слід розробити необхідний набір систем, алгоритмів, які об'єднуються в системи моніторингу. Транзактивна енергетична система дозволяє кільком взаємопов'язаним будівлям обмінюватися енергією для більшої енергоефективності. У статті представлено особливості моніторингу таких систем, методика оцінки ефективності локальної системи та оцінка нерівномірності графіків енергоспоживання при електроживленні елементів локальної системи. Розглянуто впровадження сучасних програм (механізмів) керування попитом (Demand Side Management) для участі у балансуванні попиту та пропозиції. Розглянуто застосування механізмів керування попитом для локальної системи з неінтрузивним моніторингом та з системою енергоменеджменту на основі підходів та методів транзактивної енергії. Проведені розрахунки показали можливість зниження вартості електроенергії для споживачів до 12,5 %. Бібл 14, рис. 2.

Ключові слова: неінтрузивний моніторинг, локальна електроенергетична система, розосереджені енергетичні ресурси, відновлювані джерела енергії.

Введення. Інтеграція відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) є одним із основних напрямків трансформації електроенергетичної системи. Традиційний централізований спосіб виробництва та керування електроенергією замінюється децентралізованим способом. Локальна електроенергетична система (ЛЕС) є децентралізованою мережею, одним із завдань якої є оптимізоване керування розподіленими енергетичними ресурсами (РЕР). Локальні системи складаються з джерел розподіленої генерації, систем зберігання енергії, навантаження та іншого обладнання. Будівлі як комерційні, так і житлові є найбільш поширеним навантаженням.

Активні споживачі, які є частиною локальних систем з власним ВДЕ, можуть брати участь у різних програмах реагування на попит (DSM – demand side management) та на ринках електроенергії завдяки сприятливим умовам і програмам стимулювання. Однак цими ВДЕ керують споживачі (або окремі власники), вони є самоконтрольованими з точки зору електромережі, тому звичайним програмам DSM часто не вдається повністю розкрити потенціал гнучкості таких активних споживачів [1].

Для модернізації мережі використовується концепція «Smart Grid». Житлові та комерційні будівлі отримують вигоду від модернізованої мережі, включаючи покращену безпеку, зниження пікових навантажень, більшу інтеграцію ВДЕ та зниження експлуатаційних витрат. Споживачі можуть ефективно керувати власним профілем енергоспоживання та швидко реагувати на сигнали ринку, особливо для будівель з РЕР та системою керування енергією «Smart Building». Окрім технологій Smart Grid та Smart Building для максимального розкриття потенціалу будівель Gridwise Architecture (GWAC) визначає ще один вид побудови локальних систем – Transactive Energy (Транзактивна енергія (ТЕ)), що є системою економічних механізмів і механізмів керування, які дозволяють динамічно балансувати попит і пропозицію в усій електричній інфраструктурі, використовуючи вартість як ключовий робочий параметр [2–4].

Споживачі збалансовують потреби та бажання з ціною, доступністю та зручністю використання електроенергії та відповідних пристроїв, а також збалансовують економічні цілі

своїх організацій з фізичними, нормативними та ринковими обмеженнями. GWAC узагальнили застосованість транзактивної енергії для житлових будинків – нові можливості вибору споживачів (клієнти можуть вибрати: брати участь у адаптації попиту для зниження загальних витрат на енергію, виробляти та продавати надлишкову енергію та послуги, купувати енергію з багатьох джерел на основі вартості, користуватися перевагами нових енергетичних послуг).

Для досягнення ефективної інтеграції та кооперації в роботі локальних систем на рівні житлових будинків та комерційних будівель необхідний набір систем, алгоритмів, який є частиною систем моніторингу та енергетичного менеджменту.

Міжнародними стандартами на організацію роботи локальних систем представлені вимоги стандарту щодо керування ними [5]:

- енергетичний менеджмент (год, хв): генерація електроенергії та прогноз навантаження, економічна та екологічна оптимізація диспетчеризації, ринкові транзакції, управління попитом, обмін потужністю та електроенергією з передовою мережею; збір і обробка даних, управління базами даних;

- моніторинг і контроль (хв, с): збір і обробка даних, управління базою даних; блокування несправності, локальний контроль якості електроенергії, керування перемикачем пристроїв, послідовність операцій, регулювання частоти/напруги під час нормальної роботи, контроль активної та реактивної потужності пристроїв, перемикач режимів, «чорний» пуск, відновлення системи, синхронізація часу; виявлення острівного режиму (наприклад, втрата основного захисту), контроль стабільності частоти (острівного режиму), динамічний контроль завад (від 50 мс до 2 с), контроль стабільності напруги.

У [6] розглянуто сучасний енергетичний менеджмент – це проактивна, організована та систематична координація закупівлі, перетворення, розподілу та використання енергії для задоволення вимог, беручи до уваги екологічні та економічні цілі.

Складові систем енергоменеджменту для локальних систем:

- моніторинг (фактичне виробництво енергії, фактичний попит на енергію, стан заряду накопичувача для зберігання енергії, невизначеність ціни);

- прогноз (виробництво енергії, попит на енергію, мобільне зберігання даних, невизначеність);

- керування якістю електроенергії (мінімізація втрат, показники якості електроенергії, надійність/комфортність);

- планування/диспетчеризація/вартість (операційні витрати, зменшення викидів парникових газів (ПГ), максимізація прибутку).

У рамках розвитку теорії моніторингу електроенергетичних систем в [7] запропоновано нову систему принципів та процедур, покладених в основу побудови систем Smart-моніторингу сучасних інтелектуальних децентралізованих електроенергетичних систем. Принципи побудови та реалізації Smart-моніторингу є поєднанням технічної (технологічної) та економічної ефективності.

При визначенні ефективного використання інтелектуальних пристроїв та систем моніторингу також важливо подумати про загальні способи, методи, якими інтегровані пристрої, системи, процеси, будівлі тощо можуть пропонувати цінні послуги, коли вони підключені до енергетичних ринків і операторів мереж і спілкуються з ними.

З точки зору енергетичних операцій і ринку, гнучкість диспетчеризації інтегрованих у мережу будівель може допомогти вирішити проблеми, що виникають через регіональні обмеження, перевантаження, стрибки цін і надлишок відновлюваної енергії.

Аналіз сучасного стану організації систем моніторингу показує, що основним завданням проектування систем енергоменеджменту та систем моніторингу житлових будинків є знаходження балансу між суперечливими цілями споживачів і керуванням електричними пристроями в будівлях для максимальної гнучкості використання на основі вподобань споживача.

Мета роботи – аналіз особливостей організації систем моніторингу ефективності роботи локальних енергетичних систем та будівель з вирішенням задачі балансування попиту

та пропозиції, використанням програм керування попитом та оцінці нерівномірності графіків енергоспоживання з використанням сучасних систем побудови локальних систем.

Матеріали досліджень.

Моніторинг і керування споживанням має дві різні мети. По-перше, з точки зору споживача або мешканця, наявність інформації про рівень використання приладів може призвести до зниження витрат через зменшення споживання енергії або можливих допоміжних послуг (запити на дисбаланс, регулювання навантаження або коливання цін на електроенергію тощо). По-друге, з точки зору інтелектуальної мережі або менеджера (агрегатора) мережі керуваність більшою кількістю навантажень надає більше можливостей дій для підтримки стабільності мережі, тобто більшій гнучкості та надійності (зменшення пікового попиту шляхом усунення використання електроенергії, або шляхом перенесення його на непіковий час тощо) шляхом ідентифікації навантаження та прогнозування споживання енергії навантаженням.

Методологія Smart моніторингу передбачає застосування системи неінтрузивного моніторингу навантаження (NILM) та складається з простішої апаратної частини та складнішого програмного забезпечення, ніж інтрузивний. Smart моніторинг передбачає розробку методів інтрузивного моніторингу та методів неінтрузивного моніторингу навантаження, необхідних для вирішення проблеми дезагрегування навантаження [8].

Неінтрузивний моніторинг є потужною технікою з потенціалом значного підвищення енергоефективності та зменшення споживання енергії. Він є методом аналізу даних про загальне електричне навантаження, отриманих шляхом вимірювання сили струму та напруги в одній точці, з наступним поділом загального навантаження на навантаження окремих пристроїв, які входять до складу навантажень будівель.

Системи моніторингу включають різні типи технологічних компонентів, включаючи інтелектуальні лічильники, локальні контролери, датчики, перемикачі навантаження та графічні інтерфейси користувача. Розумні лічильники та інтервальні лічильники діють як точка доступу для постачальників комунальних послуг та агрегаторів. Вони дозволяють вимірювати відхилення енергії через реакцію на попит для успішного виставлення рахунків та успішної розробки стимулів/винагород, але вони також можуть виступати як графічний інтерфейс. Графічні інтерфейси є важливими пристроями визначення профілів навантаження споживачів, оскільки вони дають змогу кінцевому споживачеві віддалено взаємодіяти зі своїми пристроями і, таким чином, вирішувати підключати йому навантаження або відключати.

Інтелектуальні лічильники в системі неінтрузивного моніторингу та системи енергоменеджменту будинку можна використовувати для надання споживачам зворотного зв'язку щодо споживання енергії в режимі реального часу безперервно або через регулярні проміжки часу.

Системи моніторингу та системи енергоменеджменту житлових будинків є критично важливим елементом для ефективного використання гнучкості побутових споживачів, оскільки це сприятиме активній участі споживачів у структурі ТЕ для досягнення економічної вигоди.

Виділимо основні функції систем моніторингу ефективності:

- збір і обробка даних, включаючи збір даних у реальному часі щодо розподіленої генерації, навантаження, трансформаторів і пристроїв компенсації реактивної потужності, а також розрахунок і аналіз отриманих даних;
- керування базами даних, включаючи безпосередню обробку, синхронізацію, резервне копіювання та відновлення отриманих даних, а також забезпечення інтеграції даних з іншими внутрішніми та зовнішніми програмами;
- оцінка та контроль якості електроенергії (збір інформації про вихід за діапазон показників напруги, коефіцієнта потужності, гармонік тощо; відповідний контроль якості електроенергії);
- регулювання активної та реактивної потужності, включаючи відключення навантаження (у разі потреби), розподіл навантаження та контроль активної та реактивної потужності в режимі реального часу в автоматичному або ручному режимі.

При організації систем моніторингу ефективності роботи необхідно приділити увагу вирішенню наступних задач:

- балансування попиту та пропозиції;
- впровадження сучасних програм (механізмів) керування попитом (Demand Side Management);
- оцінка нерівномірності графіків енергоспоживання за умов електроживлення елементів ЛЕС як на змінному, так і постійному струмі.

Будівлі як найбільші споживачі електроенергії повинні узгоджено працювати з мережею та реагувати на неї, а також бути гнучкими, щоб уникнути додаткового навантаження на баланс електромереж. Будівлі мають велику здатність до переносу навантаження, що дозволяє їм бути найбільш ефективними при балансуванні попиту та пропозиції. Навантаження в будівлях можна змінювати як за величиною, так і за часом відповідно до потреб локальної системи. Зміна використання електроенергії (або навіть експорт електроенергії в мережу) у будівлі може бути активовано автономно у відповідь на час використання та/або динамічне ціноутворення на електроенергію, або безпосередньо контролюватися оператором мережі (агрегатором). Потенціал будівель, які є частиною ТЕ, може бути використаний за допомогою взаємодії між будівлями та електромережею (B2G), інтеграції будівель і електромобілів (V2B) і обміну енергією між будівлями (B2B) [9-10].

Транзактивна енергетична мережа дозволяє кільком взаємопов'язаним будівлям (або певним об'єднанням будівель – кластерам) обмінюватися енергією для більшої енергоефективності. Дослідження показали, що будівельні кластери можуть досягти колективних інтересів (наприклад, мінімізація загальних витрат на енергію). Однак деяким окремим будівлям, можливо, доведеться пожертвувати своїми індивідуальними інтересами (наприклад, підвищенням вартості) заради колективних інтересів кластерів [2].

Особливістю моніторингу, заснованого на неінтрузивному моніторингу навантаження, є те, що лічильник такої системи моніторингу вимірює струм і напругу в одному місці розподільної електромережі будівлі та не вимагає прямого вбудовування в мережу, при цьому забезпечуючи точність вимірювання, що не поступається традиційним лічильникам. Лічильник NILM, використовуючи хмарні технології та спеціальні методи машинного навчання, розбиває інтегральні дані про споживання енергії, зібрані в одній точці мережі, на профілі споживання кожного пристрою [8].

NILM – це техніка моніторингу споживання енергії в будівлях без необхідності встановлення апаратного забезпечення на окремих приладах, що робить його економічно ефективним і масштабованим рішенням для підвищення енергоефективності та зниження споживання енергії.

Неоптимальність відбору від генератора та споживання навантаженнями електроенергії оцінимо з точки зору роботи локальної системи при живленні будівлі. Як критерій оцінки вибрано ступінь відхилення від рівномірного енергоспоживання по відношенню до середнього рівня передачі активної потужності за заданий інтервал часу. З цією метою застосовується реактивна потужність Фризе. Потужність Фризе дозволяє оцінити неоптимальність передачі електроенергії, а отже, й додаткових втрат. При деталізації втрат, зокрема причин їхньої зміни (зростання), важливим постає питання визначення причини появи чи зростання додаткових втрат. Найбільш укрупненим джерелом, яке сприяє появі додаткових втрат електроенергії, може бути як генератор, так і навантаження, що особливо актуальним є для локальних електроенергетичних систем [11].

Застосування модифікованої потужності Фризе Q_{Φ} дає змогу оцінити нерівномірність графіків енергоспоживання при електроживленні елементів ЛЕС як на змінному, так і постійному струмі.

Використовуючи метод оцінки неоптимальних рівнів генерації та споживання електроенергії будівлями за допомогою реактивної потужності Фризе Q_{Φ} , представимо розподіл цих навантажень на типи:

- великі (крупні одиничні або об'єднання будівель) навантаження – множина $\{A_i, i=1, \dots, n_A\}$;

– розпорошені (розосереджені побутові споживачі (багатоквартирні будинки) – $\{B_i, i = 1, \dots, n_B\}$.

Характеристика цих типів навантаження для оцінки елементів множин $\{A_i, i = 1, \dots, n_A\}$, $\{B_i, i = 1, \dots, n_B\}$.

Виділення чотирьох типів контрольованих перетинів:

- підключення централізованої мережі до ЛЕС (перетини «А–А»);
- підключення РЕР (перетини для РЕР змінного струму «В–В»; перетини для РЕР постійного струму «С–С»);
- підключення великих навантажень (перетини «D–D»);
- підключення кластерів – об'єднань розпорошених споживачів (багатоквартирних будинків) (перетини «С–С»).

Для кожного з виділених множин можна навести їхні характеристики та обмеження функціонування.

Наприклад, для перетинів «А–А» слід врахувати варіанти відбору: «оптимальність» на ненульовому інтервалі передачі енергії від централізованої мережі; «оптимальність» з врахуванням ненульового інтервалу передачі енергії від централізованої мережі, провести оцінку втраченої вигоди. А для перетинів «С–С» доцільно врахувати перехідні процеси та використовувати неінтрузивний моніторинг.

Для систем моніторингу представимо розроблену методику оцінки ефективності роботи ЛЕС. Під оцінкою ефективності будемо розуміти оптимізацію втрат електроенергії та оплати коштів за генерацію РЕР та споживання споживачами електроенергії. Результатом моніторингу є оптимізація енергетичних процесів.

Методика така:

- 1) Проведення попереднього збору даних. Оцінка того, що впливає на електроспоживання в будівлі (типи приладів (обладнання) та їхня кількість.
- 2) Введення інтегрованих показників ефективності: технічні (технологічні) та економічні.
- 3) «Розгортання» неоптимальності, починаючи від перетину підключення централізованої мережі до ЛЕС аж до кінцевих споживачів (вузла, де підключено кілька споживачів):

- визначення як неоптимальність може бути скомпенсована власними силами,
- внутрішня взаємокомпенсація у елемента.

- 4) Власна оптимізація, оптимізація з «сусідом» за технологією В2В.

- 5) Визначення балансуєної групи для усунення небалансу.
- Балансування: вузол нижнього рівня; вузол вищого рівня; підсистема (кластер) система в цілому (взаємокомпенсація чи взаємодоповнення).

Балансування попиту та пропозиції:

- елементи множини $\{A_i, i = 1, \dots, n_A\}$ у вузлі;
- всередині кожного з елементів множини $\{B_i, i = 1, \dots, n_B\}$.

- 6) Формування (побудова) квазіоптимальних (еталонних) режимів.

Визначення, яке навантаження формує найбільшу частку «неоптимальності» роботи ЛЕС стосовно точок підключення джерел живлення.

- 7) Формування керуючих впливів.

- 8) Розробка для мешканців та користувачів будівель рекомендацій щодо зменшення енергоспоживання (кошти; вирівнювання графіків електроспоживання тощо).

Роботу гнучких навантажень будівель, як говорилося раніше, можна зміщувати в часі. Наприклад, пральні машини, сушарки для білизни, посудомийні машини, насоси для басейнів тощо можна переключати на різні періоди часу в межах бажаного робочого вікна для зниження витрат. Система енергетичного менеджменту будівель планує роботу таких гнучких навантажень у бажаному вікні роботи, визначеному споживачем [2].

Рисунок 1 демонструє взаємозв'язок між джерелами гнучкості будівель РЕР, які є в локальних системах (або є частиною активних споживачів) та енергетичного арбітражу [2].

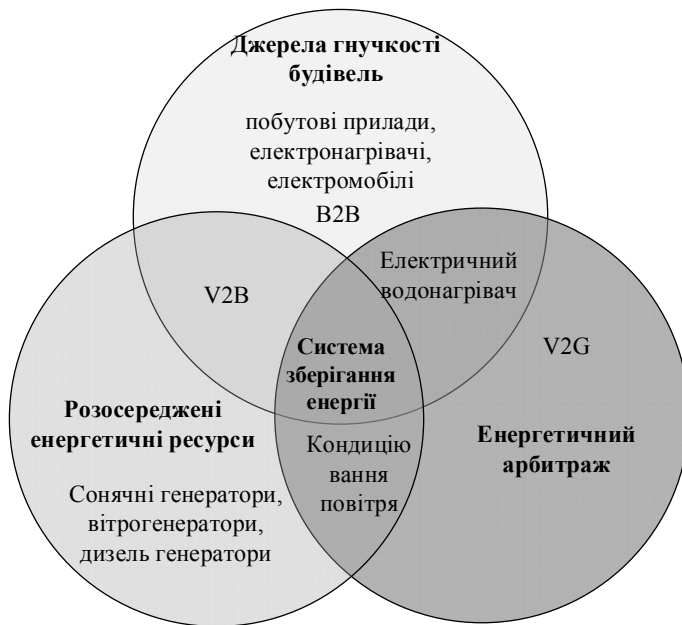


Рис. 1. Взаємозв'язок між джерелами гнучкості будівель РЕР

кладаючи зарядку електромобілів. Споживачі також можуть скоротити своє споживання з мережі, використовуючи свої локальні фотоелектричні генеруючі або накопичувальні блоки, такі як системи накопичення енергії в системах зберігання і EV у режимі передачі енергії від електромобіля до будівлі (V2B), щоб задовольнити свої потреби в електроенергії.

З іншого боку, житлові накопичувачі, такі як системи зберігання енергії і EV батареї в режимі електромобіль-мережа (V2G), можуть забезпечити гнучкість енергетичного арбітражу в електромережі, тобто накопичувати енергію в своїх накопичувачах і подавати її назад в мережу, коли це необхідно. Навантаження кондиціонування житлових приміщень є основними джерелами гнучкості в житлових будинках, але через значну залежність від температури навколишнього середовища ці навантаження зазвичай класифікуються як спонтанні навантаження, і вони є одними з ключових факторів щоденного та сезонного пікового попиту в житловому секторі.

Зазначимо можливі стратегії змінення навантаження будівель [12-14]:

1) Зниження навантаження (Peak shaving). Споживачі скорочують загальне споживання електроенергії без перенесення навантаження на будь-який інший період часу.

2) Перенесення навантаження (Load Shifting). Споживачі аналізують графіки навантаження за допомогою агрегатора та переносять споживання електроенергії на інші години.

3) Гнучке змінення навантаження (Flexible Load Shape). Основна ідея, на якій заснована ця стратегія, полягає в укладенні угод між агрегатором і споживачем, щоб споживач сформував необхідні графіки електричних навантажень в обмін на фінансові стимули.

4) Перенесення навантаження на час доби, коли низькі ціни (Energy arbitrage – енергетичний арбітраж).

Запропоновані стратегії зниження навантаження допоможуть агрегаторам та постачальникам координувати діяльність споживачів. На практиці агрегатор може виділити конкретний клас споживачів або стратегію зниження навантаження, а не охоплювати всі варіанти змінення навантажень.

При реалізації механізмів (алгоритмів) реагування на попит оцінимо неоптимальність споживання

$$W_{\text{nonm}} = \frac{1}{T_T} \int_0^{T_T} (p_{\text{cn}}(t) - p_{\text{onm}}(t))^2 dt, \quad (1)$$

Енергетичний арбітраж – це практика купівлі електроенергії, коли ціни низькі, з подальшим її зберіганням або перепродаж, коли ціни вищі з одержанням таким чином прибутку від різниці в ціні.

Поява технології передачі енергії від автомобіля до будівлі (V2B) дає можливість експортувати електроенергію з акумулятора в електромобілі (EV) у будівлі, щоб допомогти задовольнити потреби в електроенергії. Більшість РЕР можна контролювати і дозволяти традиційно пасивним побутовим споживачам грати активну роль в енергетичному балансі енергомережі та отримувати фінансові прибутки або стимули для своїх послуг гнучкості [2].

Інтелектуальна зарядка електромобіля від мережі (G2V) також може запропонувати гнучкість зміни попиту, від-

де T_T – інтервал, $p_{onm}(t)$ – оптимальний розподіл потужностей, одержаний за методикою, розглянутою вище, $p_{cn}(t)$ – графік споживання.

Характеристика зниження неоптимальності в результаті реалізації механізмів керування попитом будівель:

$$W_{nonm.k} = \frac{1}{T_T} \int_0^{T_T} (p_{cn}(t) - p_{DSM}(t))^2 dt. \quad (2)$$

Оцінка неоптимальності вигоди на інтервалі:

$$W_{nonm.в} = \frac{1}{T_T} \int_0^{T_T} (p_{DSM}(t) - p_{onm}(t))^2 dt. \quad (3)$$

Співвідношення між виразами (1) – (3) дозволяють оцінити ефективність реалізації конкретного механізму (алгоритму) керування попитом.

Для уточнення ефективності вибору та реалізації механізмів керування представимо вирази з використанням вартості електроенергії:

$$C_{nonm} = \frac{1}{T_T} \int_0^{T_T} (p_{cn}(t) - p_{onm}(t))^2 c(t)^2 dt; \quad (4)$$

$$C_{nonm.k} = \frac{1}{T_T} \int_0^{T_T} (p_{cn}(t) - p_{DSM}(t))^2 c(t)^2 dt; \quad (5)$$

$$C_{nonm.в} = \frac{1}{T_T} \int_0^{T_T} (p_{DSM}(t) - p_{onm}(t))^2 c(t)^2 dt. \quad (6)$$

Розглянемо як приклад використання механізмів DSM для локальної системи з неінтрузивним моніторингом та з системою енергоменеджменту на основі підходів та методів ТЕ. Локальна система складається з сонячного генератора, вітрогенератора, системи зберігання енергії та гарантованого джерела живлення. За навантаження слугуватимуть житлові будівлі з добовим графіком споживання (рис. 2 а), для якого розраховано вартість електроенергії за 1 кВт·год для кожного інтервалу (рис. 2 б) (таблиця, стовпчик 1). На вартість впливає розподіл потужностей по генераторам локальної системи, вартість вироблення енергії яких відрізняється.

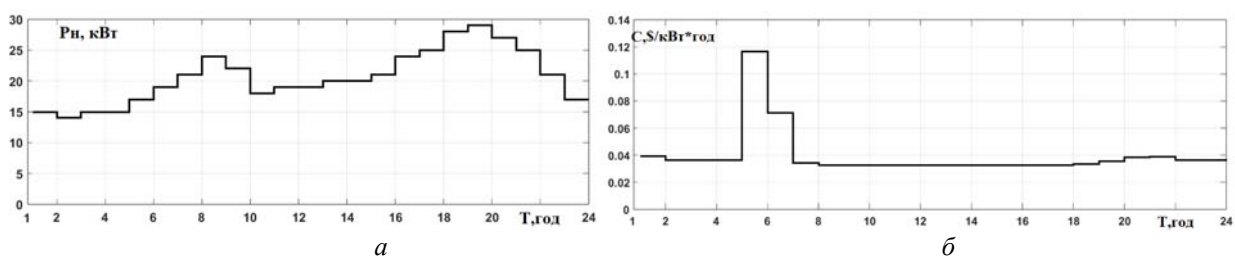


Рис. 2. Графіки добового споживання (а) та вартості (б) електроенергії

Аналізуючи графік, бачимо, що найбільша ціна за електроенергію на 5-7 інтервалах, оскільки це ранкові години, сонячна енергія майже відсутня, система зберігання розряджена, вітрової енергії недостатньо для забезпечення навантаження, тому електроенергію виробляє дизель-генератор. Середня добова вартість за 1 кВт енергії дорівнює 0,0397 \$/кВт·год.

Агрегатор згідно зі стратегією Load Shifting після проведеного аналізу пропонує споживачу оптимізувати графік навантаження шляхом перенесення потужності на інші інтервали часу, водночас середнє значення потужності залишається незмінним (таблиця, стовпчик 2). Процент змінення відносно базового графіку навантаження $C\%$ дорівнює 7,5%. Споживачі самі обирають кількість електроенергії, яку вони хочуть зменшити, виходячи із наданої їм пропозиції та економічної вигоди, яку вони отримають.

Параметри	Базовий графік	Load Shifting	Flexible Load Shape	Load Curtailment	Energy arbitrage
	1	2	3	4	5
Характеристики споживача					
P_{min} , кВт	14	13	13	13	10
P_{max} , кВт	29	29	28	29	29
$P_{сер}$, кВт	20,5	20,5	20,5	19,7	20,5
Витрати на генерацію					
C , \$/кВт·год	0,0397	0,0367	0,0358	0,0347	0,0347
C , %	-	7,5	9,8	12,5	12,5

Розглянемо варіант перерозподілу потужності згідно зі стратегією Flexible Load Shape. Розрахунки показують, що зменшились втрати відносно базового варіанту на 9,8 % (таблиця, стовпчик 3).

За умови використання стратегії Peak shaving зменшення навантаження відбулось у вечірні часи та частково у ранкові. Вартість електроенергії зменшилась на 12,5% (таблиця, стовпчик 4), водночас зменшилась середня потужність споживача.

При застосуванні стратегії Energy arbitrage, відбулось перенесення навантаження ранкових годин на денний час, де енергія найдешевша при максимальному використанні енергії сонячних генераторів, це призвело до зменшення вартості на 12,5%, але при цьому середня потужність не змінилась (таблиця, стовпчик 5).

Розглянутий приклад показує, що в локальних системах застосування сучасних програм керування попитом дозволяє отримувати фінансові вигоди.

Висновки. Системи моніторингу та системи енергоменеджменту житлових будинків та комерційних будівель є важливими елементами для ефективного використання гнучкості побутових споживачів, оскільки це сприятиме активній участі споживачів у структурі транзактивних енергетичних систем для досягнення економічної вигоди як для споживачів, так і для постачальників.

Неоптимальність відбору від генератора та споживання навантаженнями електроенергії оцінено з точки зору роботи локальної системи при живленні будівлі. Представлено методику оцінки нерівномірності процесів генерації розосереджених енергетичних ресурсів та споживання електроенергії в локальних електроенергетичних системах при вирішенні задачі балансування попиту та пропозиції.

Застосування сучасних програм керування попитом дозволяє змінювати споживчий попит на енергію за допомогою різних методів, таких як технічні (технологічні) заходи, фінансові стимули та зміна поведінки, зокрема, з використанням неінтрузивного моніторингу навантаження.

Представлені розрахунки для локальної електроенергетичної системи показали, що використання програм керування попитом дають змогу знизити вартість електроенергії за 1 кВт·год до 12,5 % залежно від обраних програм.

1. Morales-España Germán, Martínez-Gordón Rafael. Classifying and modelling demand response in power systems. *Energy*. 2022. №242. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122544>
2. Nizami Sohrab, Tushar Wayes, Hossain M.J., Yuen Chau, Saha Tapan, Poor H. Vincent. Transactive energy for low voltage residential networks: a review. *Applied Energy*. 2022. № 323. Pp. 1-19. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119556>
3. Olivares-Rojas J. C., E. Reyes-Archundia, J. A. Gutiérrez-Gnecchi, I. Molina-Moreno, J. Cerda-Jacobo and A. Méndez-Patiño, A transactive energy model for smart metering systems using blockchain. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*. 2021. № 7. Pp. 943-953. DOI: <https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2020.05670>
4. <https://gridwiseac.org/> (дата звернення 20.09.2024).
5. IEC TS 62898-3-4:2023 - Microgrids - Part 3-4: Technical requirements - Microgrid monitoring and control systems Released:8/25/2023

6. Кириленко О. В., Денисюк С. П., Блінов І. В. Енергетичний менеджмент: нові пріоритети XXI століття. *Енергетика: економіка, технології, екологія: науковий журнал*. 2024. № 1. С. 7-27. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2024.297508>
7. Кириленко, О., Стогній, Б., Денисюк, С. і Сопель, М. Smart-моніторинг електроенергетичних систем. *Технічна електродинаміка*. 2024. № 5. С. 048. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2024.05.048.4>
8. Чернещук І.С. Неінтрузивний моніторинг навантаження – перспективний напрямок моніторингу електроспоживання будівель. *Енергетика: економіка, технології, екологія: науковий журнал*. 2024. № 2. С. 106-118. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2024.303119>
9. Smart Buildings as a Transactive Energy Hub GWAC White Paper. URL https://gridwiseac.org/pdfs/Smart_Buildings_as_a_Transactive_Energy_Hub_August_2020_PNNL_30103_V1.pdf (дата звернення 20.09.2024)
10. R. Chandra, S. Banerjee and S. K. Panda. Building energy management system for transactive energy framework. *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*. Chennai, India. 2018. P. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/PEDES.2018.8707803>
11. Гілевич К.М. Аналіз рівнів неоптимальності режимів електричних мереж низької напруги при нерівномірності генерації та споживання електроенергії. *Енергетика: економіка, технології, екологія : науковий журнал*. 2024. № 2. С. 14-26. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2024.303068>
12. R. Deng, Z. Yang, M. -Y. Chow and J. Chen. A Survey on Demand Response in Smart Grids: Mathematical Models and Approaches. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2015. № 11. Pp. 570-582. DOI: <https://doi.org/10.1109/TII.2015.2414719>
13. Ponds, Kody & Arefi, Ali & Sayigh, Ali & Ledwich, Gerard. Aggregator of Demand Response for Renewable Integration and Customer Engagement: Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats. *Energies*. 2018. №11(9). DOI: <https://doi.org/10.3390/en11092391>
14. Белоха Г., Сичова В. Оптимізація графіків електричного навантаження агрегатором в локальних електроенергетичних системах. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2023. № 66. DOI: <https://doi.org/publishing2023.66.084>

MONITORING OF THE EFFICIENCY IN LOCAL ELECTRICITY SYSTEMS

S. Denysiuk, H. Bielokha, K. Hilevich, I. Cherneshchuk

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Beresteisky Ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine

e-mail: pointage13@gmail.com

The local electricity system is a decentralized grid, one of the tasks of which is the optimized management of distributed energy resources. To achieve effective integration and interaction in the work of local systems at the level of residential and commercial buildings, a set of systems and algorithms that are combined into monitoring systems is required. A transactive energy system allows multiple interconnected buildings to exchange energy for greater energy efficiency. The article presents the peculiarities of monitoring such systems, the method of assessing the efficiency of the local system and the assessment of the unevenness of the energy consumption schedules when powering the elements of the local system. The introduction of modern programs (mechanisms) of demand side management to participate in the balancing of supply and demand is considered. The application of demand management mechanisms for a local system with non-intrusive load monitoring and an energy management system based on transactive energy approaches and methods is considered. Bibl 14, fig. 2.

Key words: non-intrusive monitoring, local electricity system, distributed energy resources, renewable energy sources.

1. Morales-España Germán, Martínez-Gordón Rafael. Classifying and modelling demand response in power systems. *Energy*. 2022. №242. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122544>
2. Nizami Sohrab, Tushar Wayes, Hossain M.J., Yuen Chau, Saha Tapan, Poor H. Vincent. Transactive energy for low voltage residential networks: a review. *Applied Energy*. 2022. №323. Pp. 1-19. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119556>
3. Olivares-Rojas J. C., E. Reyes-Archundia, J. A. Gutiérrez-Gnecchi, I. Molina-Moreno, J. Cerda-Jacobo and A. Méndez-Patiño, A transactive energy model for smart metering systems using blockchain. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*. 2021. № 7. Pp. 943-953. DOI: <https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2020.05670>
4. <https://gridwiseac.org/> (Accessed at 20.09.2024).
5. IEC TS 62898-3-4:2023 - Microgrids - Part 3-4: Technical requirements - Microgrid monitoring and control systems Released:8/25/2023
6. Kyrylenko, O. V. Denisyuk, S. P. Blinov, I. V. Energy management: new priorities of the 21st century. *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya: naukovyy zhurnal*. 2024. №1. 1. P. 7-27. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2024.297508> (Ukr)
7. Kyrylenko, O., Stogniy, B., Denisyuk, S. and Sopel, M. Smart-monitoring of electric power systems. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2024. №. 5. P. 048. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2024.05.048.4> (Ukr)

8. Cherneshchuk I.S. Non-intrusive load monitoring – a promising direction of building electricity consumption monitoring. *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya: naukovyy zhurnal*. 2024. №2. P. 106-118. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2024.303119> (Ukr)
9. Smart Buildings as a Transactive Energy Hub GWAC White Paper. URL https://gridwiseac.org/pdfs/Smart_Buildings_as_a_Transactive_Energy_Hub_August_2020_PNNL_30103_V1.pdf (Accessed at 20.09.2024)
10. R. Chandra, S. Banerjee and S. K. Panda. Building energy management system for transactive energy framework. *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*. Chennai, India. 2018. P. 1-6, DOI: <https://doi.org/10.1109/PEDES.2018.8707803>
11. Hilevich K. M. Analysis of the levels of non-optimality of the modes of low-voltage electric networks in the case of non-uniformity of electricity generation and consumption. *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya: naukovyy zhurnal*. 2024. № 2. P. 14-26. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2024.303068> (Ukr)
12. R. Deng, Z. Yang, M. -Y. Chow and J. Chen. A Survey on Demand Response in Smart Grids: Mathematical Models and Approaches. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2015. № 11. Pp. 570-582. DOI: <https://doi.org/10.1109/TII.2015.2414719>
13. Ponds, Kody & Arefi, Ali & Sayigh, Ali & Ledwich, Gerard. Aggregator of Demand Response for Renewable Integration and Customer Engagement: Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats. *Energies*. 2018. №11(9) DOI: <https://doi.org/10.3390/en11092391>
14. Bielokha, H. and V. Sychova. Optimization of electric load schedules by an aggregator in local power systems. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2023. № 66. DOI: <https://doi.org/publishing2023.66.084> (Ukr)

Надійшла: 26.09.2024
Прийнята: 10.10.2024

Submitted: 26.09.2024
Accepted: 10.11.2024