

**СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ
ТА УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯМ В МІКРОЕНЕРГОСИСТЕМІ
ТЕРИТОРІАЛЬНОЇ ГРОМАДИ З ВЛАСНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ**

С. М. Усенко, кандидат технічних наук, доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Є. О. Пономаренко, аспірант

Подільський державний університет

Р. В. Каплун, аспірант

Інститут загальної енергетики НАН України

В. В. Іващук, доктор технічних наук, доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: usenko@nubip.edu.ua

Анотація. У статті розглядається практичний аспект організації функціонування мікромережі житлового кооперативу власників домогосподарств як прототипу імплементації європейських принципів децентралізованого енергозабезпечення відповідно до нового Закону України "Про ринок електричної енергії".

Дослідження торкається аналізу особливостей структурування джерел мікроенергосистеми та принципів реалізації моніторингу та управління електроспоживанням на основі використання сучасних програмно-апаратних комплексів.

Доведені переваги використання хмарних технологій (Oracle) для обробки даних, формування балансів електроспоживання та прогнозування в реальному часі.

Автори дослідили можливості інтеграції різномірних джерел генерації (зовнішню мережу, дизель-генератор, сонячні електростанції, системи накопичення електроенергії) в єдину мікромережу з можливістю функціонування як при підключенні до зовнішньої мережі, так і в ізольованому режимі (в режимі енергоострова) з власною системою обліку та диспетчеризації. Запропоновано шляхи подальшого розвитку мікроенергетичних систем територіальних громад в Україні з урахуванням європейського досвіду та чинного нормативно-правового забезпечення.

Ключові слова: мікромережа, енергоострів, децентралізоване енергозабезпечення, система моніторингу, управління електроспоживанням, балансування потужності

Актуальність. Сучасні виклики енергетичної безпеки та перехід до сталого розвитку енергетики вимагають впровадження нових підходів до електропостачання та управління енергоспоживанням. Європейський Союз активно розвиває концепцію децентралізованого енергозабезпечення, яка передбачає створення локальних мікромереж (microgrid) з можливістю автономної роботи та впровадженням інтелектуального управління. Такі системи забезпечують підвищену надійність, ефективність та гнучкість енергопостачання кінцевих споживачів.

Трансформація ринку електроенергії протягом останніх років відкрила можливості для формування децентралізованої енергетики та впровадження з боку користувачів власних генеруючих установок.

З точки зору кінцевого споживача, сектор електроенергії залишається значною мірою централізованим: кінцеві користувачі мають дуже мало (якщо взагалі мають) вплив на динаміку великомасштабного енергетичного ринку, тому вони не мають іншого вибору, окрім як «приймати ціни», які пропонують електропостачальні компанії.

Україна, яка рухається в контексті євроінтеграційних процесів, оновила законодавчу базу енергетичного сектору, зокрема прийнявши новий Закон "Про ринок електричної енергії", який створив правові засади для впровадження сучасних форм енергозабезпечення, включаючи формування мікромереж нового типу та можливості їх функціонування як енергоостровів [1,2]. Це відкриває нові можливості для розвитку децентралізованих систем електропостачання, які відповідають принципам Четвертого енергетичного пакету ЄС та забезпечують вищу надійність електропостачання [3,4,5,8].

Практична реалізація таких законодавчих змін вимагає розробки та впровадження інноваційних технічних рішень, які забезпечують ефективний моніторинг та управління енергоспоживанням у локальних мережах. У цьому контексті особливої актуальності набуває дослідження успішних прикладів впровадження систем моніторингу та керування електроспоживанням в локальних мікроенергосистемах (МЕС), досвід функціонування яких може слугувати прикладом для подальшого поширення таких технологій [6,7,15].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Концепція мікромереж активно розвивається у світі як відповідь на необхідність підвищення надійності енергопостачання, інтеграції відновлюваних джерел енергії та оптимізації енергоспоживання. За даними глобального дослідження, проведеного StartUs Insights, виявлено 215 інноваційних стартапів, що розробляють рішення для обліку і керування енергоспоживанням у МЕС [9,11, 13].

Із прийняттям нового Закону України "Про ринок електричної енергії" створено законодавче підґрунтя для розвитку мікромереж в Україні. Важливим аспектом нормативно-правового регулювання є впровадження понять "prosumer" (споживач-виробник) та визначення правил функціонування мікромереж.

Основними напрямками розвитку мікромереж в Україні є:

- інтеграція систем накопичення енергії більшої ємності;
- впровадження алгоритмів прогнозування генерації та споживання з використанням штучного інтелекту;
- розробка механізмів автоматизованого балансування мікромереж;
- розширення функціональності систем моніторингу та управління електроспоживанням.

Мікромережі та інтеграція блоків розподілених енергетичних ресурсів створюють низку операційних викликів, які необхідно вирішити при проектуванні систем керування та захисту. Наявність блоків розподіленої генерації у мережі на низьких рівнях напруги спричиняє зворотні потоки потужності, що може призвести до ускладнень координації захисту, небажаних моделей потоків потужності, проблем з розподілом струму при пошкодженнях, ускладнень у керуванні напругою[10,12,14].

У цьому дослідженні розглянемо систему моніторингу та управління енергоспоживанням на прикладі житлового кооперативу "Затишний" на Київщині. Розроблена система здійснює постійний моніторинг потоків потужності з автоматичним коригуванням параметрів захисту ліній та фідерів кінцевих споживачів. Окрім того вона здатна виявляти точок поточкорозподілу потужності в

окремих фазах при роботі локальних джерел та коригувати роботу відповідних захисних пристроїв.

Як показує досвід, взаємодія між системами керування джерел розподіленої генерації може створювати перехідні процеси, параметри яких впливатимуть на статичну і динамічну стійкість МЕС у режимі енергоострова. Для вирішення цих питань в системі використовуються алгоритми прогнозування та адаптивного балансування режимів роботи мікромережі для мінімізації перехідних процесів.

Традиційні принципи диспетчеризації МЕС такого класу не є актуальними і вимагають суттєвого перегляду. У житловому кооперативі "Затишний" впроваджуються адаптивні моделі для прогнозування режимів роботи мікромережі з урахуванням метеорологічних прогнозів, статистичних даних про споживання та генерацію власними джерелами.

Науковою ідеєю дослідження є обґрунтування функціонування локальних мікромереж з різнорідними джерелами шляхом оптимального використання власних джерел та принципів балансування у випадку, коли споживачі або кінцеві користувачі стають підтвердженими активаторами попиту саме в короткостроковій перспективі, що дає можливість реалізувати операційні процеси як підходи до формування системи диспетчеризації низького рівня. Поєднання принципів управління з урахуванням нових механізмів координації функціонування джерел, формування попиту в реальному часі, вартості первинних палив та додаткових втрат, які супроводжуватимуть процес децентралізованого електрозабезпечення, дозволять досягти загальносистемних показників підвищеної надійності електропостачання і ефективності, у повній мірі зберігаючи право вибору щодо балансування мікромережі власними різнорідними джерелами.

Мета дослідження – аналіз структурування мікромереж житлового кооперативу як прикладу енергетичної спільноти з декількома різнорідними джерелами шляхом енергоінформаційного моніторингу та особливостей покриття попиту в умовах паралельної роботи із зовнішньою мережею та в острівному режимі для формування локальних систем диспетчеризації на рівні кінцевих користувачів.

Матеріали та методи дослідження. Програмно-аналітичний комплекс моніторингу та управління електроспоживанням побудований на апаратній платформі Embee, яка дозволяє зчитувати до 23000 миттєвих даних на добу з близько 300 точок обліку. Комплекс включає:

- лічильники електроенергії з дистанційним зчитуванням даних та можливістю віддаленого керування;
- сенсори електроенергії з дистанційним зчитуванням даних;
- контролери генераторів fogo з можливістю передачі даних;
- шлюз-дата концентратор даних zigbee/ethernet/gsm/3g;
- хмарний сервіс Oracle з обробки, зберігання даних та інтерфейсом для користувачів.

Ключовою перевагою платформи Embee є можливість збору більшої кількості даних порівняно з традиційними комунікаціями LoRa, PLC та іншими технологіями, що не можуть забезпечити таку швидкість передачі даних.

Система моніторингу забезпечує збір даних з лічильників електроенергії абонентів та сенсорів дизельних генераторів, облік споживання електроенергії з різних джерел генерації, формування балансів генерації та споживання, контроль миттєвих значень напруг, струмів, потужності, виявлення втрат в мережах та їх аналіз, аналіз кореляції електроспоживання з метеоумовами. Важливою функцією є контроль балансу потужності для виявлення і зменшення технічних та комерційних втрат.

Саме у такій парадигмі відносин лежить можливість досягати найвищої ефективності локальних (острівних) мікроенергосистем з полігенерацією. Збільшення частки децентралізованих мереж стане провісником формування нової архітектури регіональних енергосистем.

Програмно-технічний комплекс житлового кооперативу забезпечує широкі функціональні можливості для аналізу даних та їх візуалізації, а саме:

- побудова погодинних, добових, місячних та річних графіків споживання;
- аналіз часток електроенергії в балансі мікромережі від різних джерел;

- моніторинг якості електроенергії (діапазони коливань напруги, тривалість перехідних процесів);
- порушення статичної та динамічної стійкості мікроенергосистеми внаслідок небалансу потужності з боку джерел чи некерованої зміни попиту споживачів;
- прогнозування рівнів споживання з урахуванням сезонності.

Результати досліджень та їх обговорення. Об'єктом дослідження є система моніторингу та керування електроспоживанням житлового кооперативу "Затишний" в умовах підключення мікромережі до зовнішньої енергосистеми та в режимі енергоострова. Система електрозабезпечення включає близько 300 приватних будинків кінцевих користувачів, які обладнані сучасними засобами обліку електроенергії з віддаленим доступом, мають власні базові джерела генерації (дизель-генератори), приватні сонячні електростанції, системи накопичення електроенергії, теплові насоси у домогосподарствах - членів кооперативу.

Житловий кооператив розташований за межами міста, розосереджений на території 50,5 га, що обумовлює потребу у підвищенні надійності електропостачання і є актуальним завданням на основі впровадження концепції «розумної» мікромережі. Житловий кооператив об'єднаний спільною інфраструктурою, включаючи внутрішні електричні мережі, систему моніторингу та диспетчеризації оперативних переключень конфігурації мікромережі з можливістю зміни алгоритмів активізації власних джерел та підключення джерел членів кооперативу для перетоків електроенергії у внутрішню мережу.

Електропостачання житлового кооперативу забезпечується за допомогою комбінованої схеми, що включає:

- зовнішня мережа оператора системи розподілу (ОСР) з виділеною потужністю 3,5 МВА;
- автоматизовані дизель-генератори FOGO FDT 820 S потужністю 820 кВА / 656 кВт (номінальний режим) у кількості 2 установок;
- приватні сонячні електростанції членів кооперативу із сумарною встановленою потужністю близько 500 кВт (у 55 домогосподарствах);

- індивідуальні системи накопичення електроенергії у окремих споживачів (на 95 домогосподарств припадає близько 700 кВт·год ємності акумуляторних батарей).

Дизель-генератори є ключовими елементами забезпечення автономної роботи мікромережі у острівному режимі.

До основних характеристик дизель-генераторів можна віднести: модель двигуна: 2x DC13 072A 02-12, номінальна потужність 355 кВт x 2, тип палива - дизельне, витрата палива при 100 % навантаженні - 157,5 л/год.

Така структура дозволяє забезпечити надійне електропостачання об'єкту навіть в умовах аварійних ситуацій в зовнішній мережі, а також оптимізувати використання генерованої електроенергії з різних джерел, які мають різну собівартість. Перемикання між режимами роботи здійснюється за допомогою автоматичного введення резерву (АВР).

Узагальнена структура мікромережі та система енергоінформаційних зв'язків житлового кооперативу з власними джерелами показана на рис.1.

Важливим аспектом функціонування мікромережі є структура джерел електроенергії. Аналіз частки різних джерел в загальному балансі електроенергії житлового кооперативу демонструє значну сезонну варіацію:

1. Оператор системи розподілу забезпечує основну частку електроенергії протягом усього року (від 78,4 % до 92,6 %), з мінімумом у літні місяці та максимумом у зимові та перехідні періоди.

2. Дизель-генератори використовуються переважно у зимовий період (7,7-9,2 % від загального споживання) через часті відключення електроенергії, а його частка мінімальна влітку (2,8-3,3 %).

3. Сонячні електростанції забезпечують значну частку електроенергії у літній період (до 18,8 % у червні), тоді як у зимовий період їх внесок мінімальний (1,0-2,2 %).

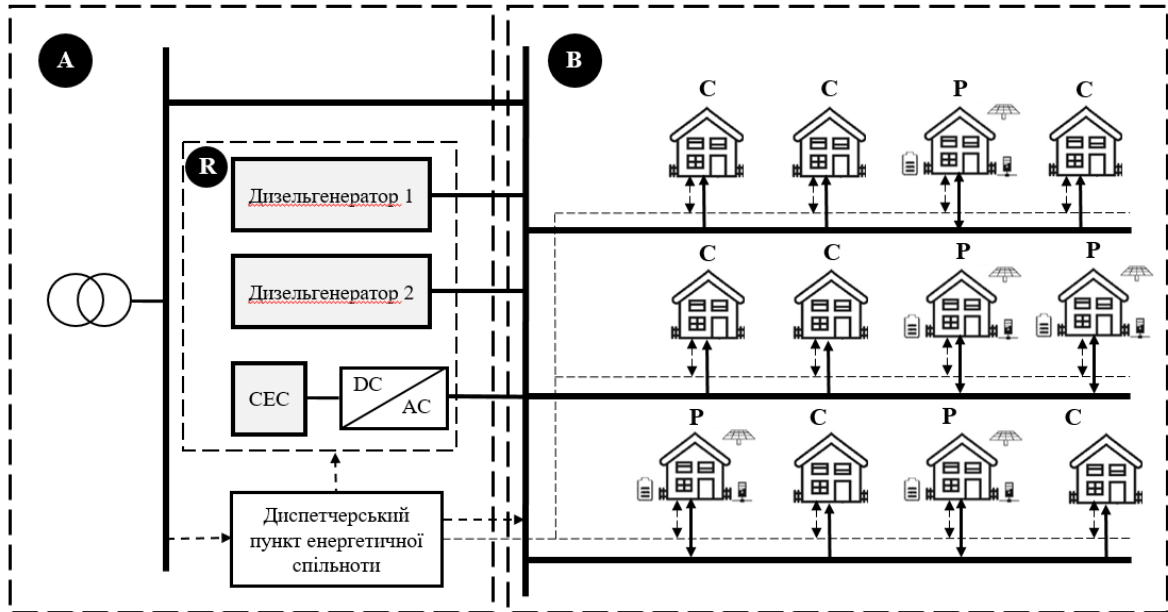


Рис. 1. Узагальнена структура мікромережі та енергоінформаційні зв'язки у системі електрозабезпечення житлового кооперативу («А» - множина доступних джерел для енергетичної спільноти; «В» - склад учасників енергетичної спільноти: «С» - кінцеві користувачі електричної енергії; «Р» - активні споживачі з власними джерелами та накопичувачами енергії; «R» - структура власних базових джерел енергетичної спільноти).

Важливим показником ефективності функціонування мікромережі є зростання частки відновлюваних джерел енергії в загальному балансі. За останні три роки спостерігається позитивна динаміка: частка сонячних електростанцій зросла з 5,7 % до 9,2 % завдяки встановленню нових потужностей та оптимізації використання існуючих.

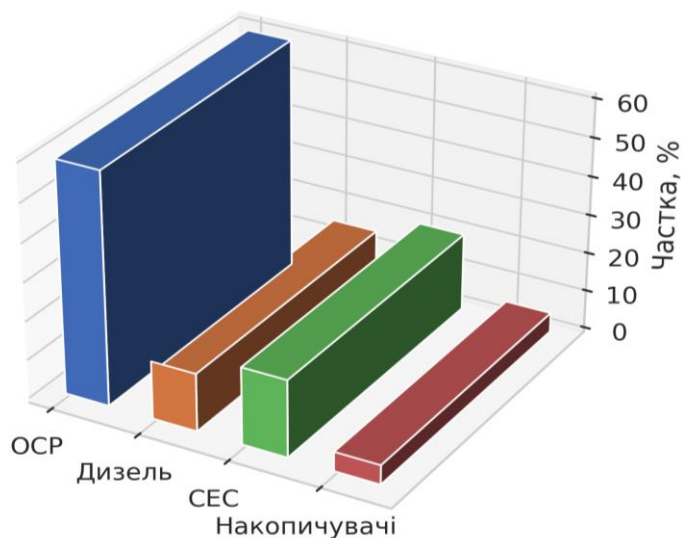


Рис. 2. Частка різних джерел у загальному балансі електроенергії

Важливим компонентом мікромережі є приватні сонячні електростанції споживачів. Аналіз даних моніторингу показує, що в певні періоди (переважно вдень при високій інсоляції) спостерігається від'ємний баланс споживання, коли локальна генерація від СЕС перевищує споживання, що призводить до зворотних потоків енергії.

За результатами аналізу даних моніторингу встановлено, що в період з 09:00 до 16:00 у ясні дні спостерігаються від'ємні значення активної потужності на ввідному АВР трансформаторної підстанції ТП-1157. Наприклад, у фазі 2 зафіксовані зворотні потоки потужності до -15 кВт.

Це створює як технічні виклики (необхідність контролю напруги та потужності), так і економічні можливості (зниження вартості електроенергії для споживачів кооперативу). Дані системи моніторингу дозволяють виявляти та аналізувати такі ситуації, що є критично важливим для ефективного управління мікромережею.

Для коректного обліку електроенергії при наявності зворотних потоків енергії обліковий лічильник на межі балансової належності з ОСР повинен мати можливість диференційованого обліку відпуску та споживання електроенергії. В іншому випадку, якщо лічильник обліковує електроенергію за модулем, це може призводити до завищених показників споживання електроенергії та, відповідно, до збільшення витрат на електроенергію кооперативу.

Окрім сонячних електростанцій, у житловому кооперативі активно використовуються теплові насоси для опалення та кондиціонування приміщень. Аналіз даних моніторингу показує, що в зимовий період споживання електроенергії тепловими насосами складає значну частку від загального споживання.

Графік річних даних балансу електроенергії демонструє чітку кореляцію між середньодобовою температурою повітря та добовим споживанням електроенергії. При зниженні температури повітря нижче 0 °С спостерігається збільшення споживання електроенергії на 30-40 % порівняно із середньорічними показниками.

Розглянемо характерні показники споживання в різні місяці року. Нижче наведено графік середньомісячного споживання електроенергії житлового кооперативу (рис. 3).

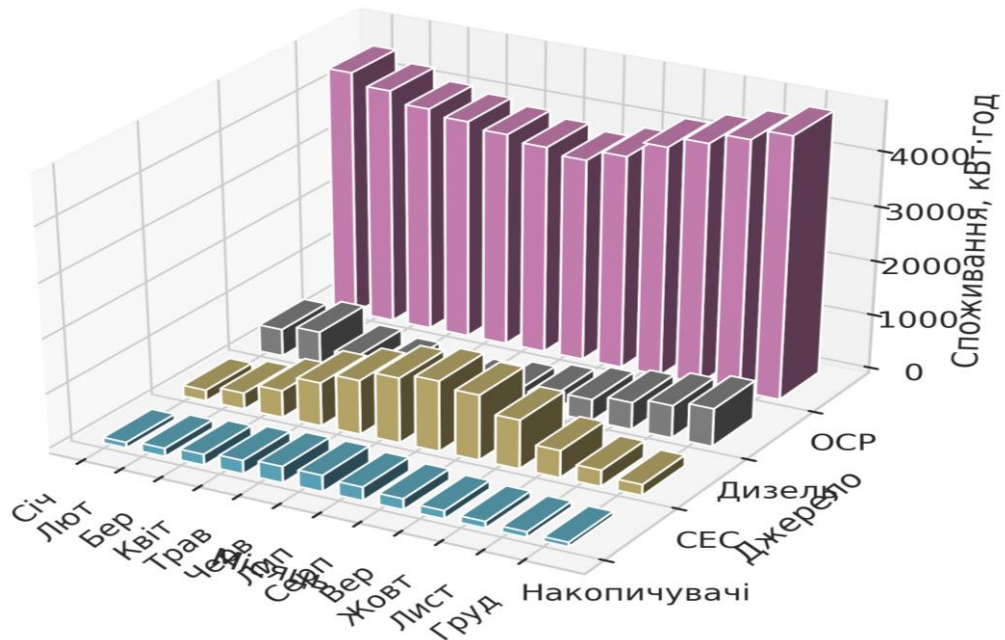


Рис. 3. Графік споживання електроенергії від різних джерел

Аналіз даних графіку дозволяє виділити три характерних періоди:

Зимовий період (грудень-лютий):

- найвище загальне споживання (460-485 МВт·год на місяць);
- максимальне середнє навантаження (635-690 кВт);
- мінімальна генерація від СЕС (4,8-9,4 МВт·год);
- найбільше споживання від дизель-генератора через часті відключення електроенергії (35-42 МВт·год);

- кореляція з низькими температурами повітря (-2,5 до -0,8 °С).

Літній період (червень-серпень):

- найнижче загальне споживання (308-339 МВт·год на місяць);
- мінімальне середнє навантаження (428-455 кВт);
- максимальна генерація від СЕС (58,4-65,2 МВт·год);
- найменше споживання від дизель-генератора (8,7-11,2 МВт·год);
- кореляція з високими температурами повітря (19,8-22,3°С).

Перехідні періоди (березень-травень, вересень-листопад):

- середні показники споживання та навантаження;
- поступова зміна частки генерації від СЕС;
- кореляція з середніми температурами повітря (3,2-16,5°C).

Виявлено чітку кореляцію між температурою повітря та споживанням електроенергії: при зниженні температури на 1°C споживання зростає в середньому на 12,5 МВт·год на місяць. Це пов'язано з використанням електроопалення (переважно теплових насосів) у холодний період року.

Для більш детального аналізу енергоспоживання розглянемо типові добові графіки навантаження для характерних місяців року.

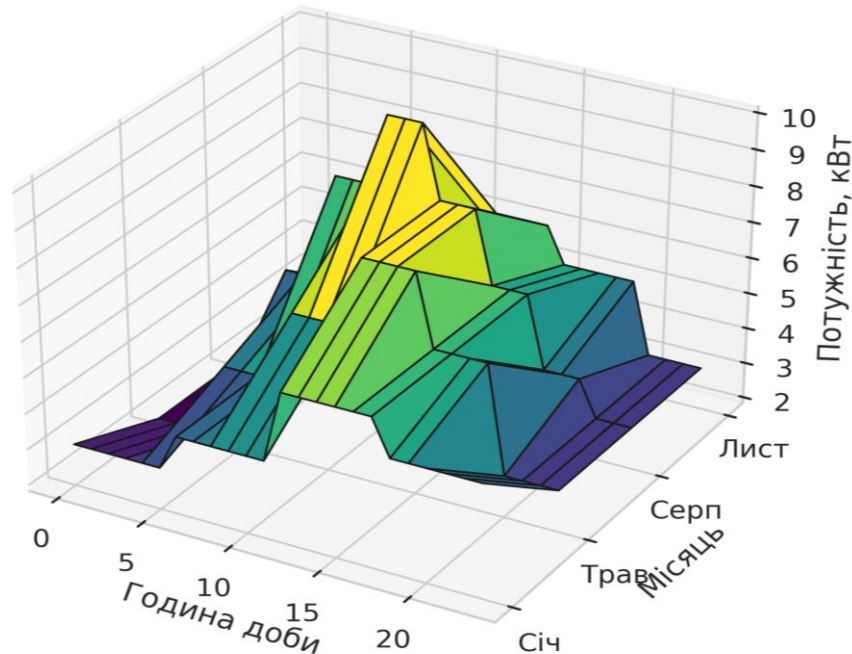


Рис. 4. Середньодобові графіки навантаження.

Аналіз даних графіку дозволяє виявити характерні особливості добових графіків навантаження:

зимовий період (січень)

- високе базове навантаження (близько 500 кВт у нічні години);
- два виражені піки споживання: ранковий (8:00) та вечірній (20:00);
- максимальне навантаження досягає 825 кВт;
- відношення максимального навантаження до мінімального: 1,76.

Літній період (липень):

- низьке базове навантаження (близько 300 кВт у нічні години);
- більш рівномірний графік з одним вираженим піком у вечірні години (20:00);
- максимальне навантаження досягає 525 кВт;
- відношення максимального навантаження до мінімального: 1,76.

Перехідні періоди (квітень, жовтень):

- проміжні значення базового навантаження;
- графік, подібний до зимового, але з меншими абсолютними значеннями;
- максимальне навантаження у квітні: 625 кВт, у жовтні: 615 кВт.

Важливо відзначити, що літній період (липень) спостерігається суттєвий вплив генерації сонячних електростанцій на загальний графік навантаження. В години максимальної сонячної активності (10:00-16:00) відбувається часткова компенсація споживання за рахунок локальної генерації, що призводить до зниження навантаження на загальну мережу.

На основі представлених вище графіків можемо зробити висновки, що

оператор системи розподілу забезпечує основну частку електроенергії протягом усього року (від 78,4 % до 92,6 %), з мінімумом у літні місяці та максимумом у зимові та перехідні періоди. Дизель-генератор використовується переважно у зимовий період (7,7-9,2 % від загального споживання) через часті відключення електроенергії, а його частка мінімальна влітку (2,8-3,3 %). Сонячні електростанції забезпечують значну частку електроенергії у літній період (до 18,8% у червні), тоді як у зимовий період їх внесок мінімальний (1,0-2,2%).

Важливим показником ефективності функціонування мікромережі є зростання частки відновлюваних джерел енергії в загальному балансі. За останні три роки спостерігається позитивна динаміка: частка сонячних електростанцій зросла з 5,7 % до 9,2 % завдяки встановленню нових потужностей та оптимізації використання існуючих.

Економічна ефективність мікромережі значною мірою залежить від собівартості електроенергії з різних джерел. Порівняння собівартості електричної енергії представлено на рис.4.

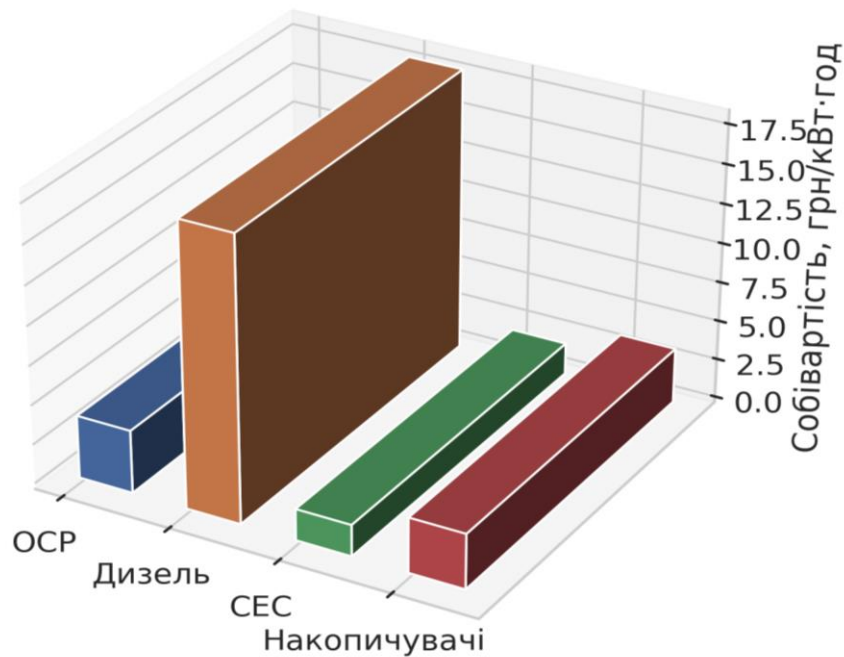


Рис. 5. Порівняння собівартості електроенергії з різних джерел

Для оптимізації використання різних джерел енергії в мікромережі житлового кооперативу застосовуються такі підходи:

- прогнозування генерації та споживання дозволяє оптимізувати використання сонячної енергії та мінімізувати необхідність запуску дизель-генератора;
- використання накопичувачів енергії (на даний момент на рівні окремих домогосподарств) для збереження надлишкової сонячної енергії та її використання в періоди пікового споживання;
- управління попитом шляхом стимулювання споживачів до перенесення використання енергоємних приладів на періоди надлишкової сонячної генерації або нічні години з нижчим тарифом.

Загальна економія коштів від застосування цих підходів складає 15-20 % від вартості спожитої електроенергії, що є суттєвим показником ефективності функціонування мікромережі.

Впровадження системи моніторингу та керування електроспоживанням дозволило досягти значних економічних ефектів для житлового кооперативу:

- зменшення технічних втрат в мережі з 10 % до 5 % завдяки моніторингу та аналізу балансів електроспоживання, що принесло річну економію близько 120 тис грн;
- система дозволила виявити несанкціоновані підключення та неправильну роботу лічильників, що дало економію близько 80 000 грн на рік;
- раціональне використання дизель-генератора тільки при необхідності дозволило зменшити витрати палива на 30 %, що становить близько 200 тис грн за рік;
- використання нічних тарифів для нагрівання води та опалення дозволило зменшити витрати на електроенергію на 10%, що дало економію близько 150 тис грн за рік

При цьому вартість впровадження системи моніторингу складала: розробка програмного забезпечення - 80 тис грн; додаткові модеми для експорту первинної інформації - 10 тис грн; параметризація лічильників на 2 тарифні зони (за один лічильник) - 7 тис грн; щомісячна оплата за хмарний сервіс - 4 тис грн.

Висновки і перспективи. Проведене дослідження демонструє успішний приклад впровадження системи моніторингу та керування електроспоживанням в мікроенегосистемі на прикладі житлового кооперативу. Ключовими факторами успішного впровадження є використання сучасної апаратної платформи Embee з високою швидкістю передачі даних і хмарного сервісу Oracle для обробки та аналізу даних, що забезпечує формування балансів електроспоживання та аналітику в режимі реального часу.

Загальний економічний ефект від впровадження системи моніторингу та керування електроспоживанням складає близько 550 000 грн на рік, що забезпечує окупність проекту протягом 2,5 років.

Важливим показником ефективності функціонування мікромережі є зростання частки відновлюваних джерел енергії в загальному балансі. За останні три роки спостерігається позитивна динаміка: частка сонячних електростанцій зросла з 5,7 % до 9,2 % завдяки встановленню нових потужностей та оптимізації використання існуючих.

Економічна ефективність мікромережі значною мірою залежить від собівартості електроенергії, яка генерується різнорідними джерелами.

Для оптимального балансування мікромережею з обраною структурою джерел в подальшому необхідно виконати такі завдання: прогнозування генерації та споживання в реальному часі для оптимізації використання електроенергії від сонячних електростанцій та накопичувачів. Пошук техніко-економічного рішення для мінімізації використання дизель-генераторів. Необхідно обґрунтувати використання накопичувачів енергії (на даний момент на рівні окремих домогосподарств) для збереження надлишкової сонячної енергії та її використання в періоди пікового споживання.

Управління попитом на рівні МЕС здійснювати шляхом стимулювання споживачів до перенесення використання енергоємних приладів на періоди надлишкової сонячної генерації або нічні години з нижчим тарифом. В основу розроблення алгоритмів диспетчеризації системи електрозабезпечення з обраними базовими джерелами та джерелами домогосподарств необхідно покласти принципи забезпечення живучості мікроенергосистеми в умовах енергоострова з приведеною мінімальною вартістю електроенергії.

Список використаних джерел

1. Закон України "Про ринок електричної енергії". (2017). Відомості Верховної Ради (ВВР), № 27-28, с.312. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19>
2. Системний оператор України. (2023). Кодекс систем розподілу. Режим доступу: <https://ua.energy/>
3. Hirsch, A., Parag, Y., & Guerrero, J. (2018). Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 402-411.
4. Hossain, E., Kabalci, E., Bayindir, R., & Perez, R. (2014). Microgrid testbeds around the world: State of art. *Energy Conversion and Management*, 86, 132-153.
5. Bayindir, R., Hossain, E., Kabalci, E., & Perez, R. (2016). A comprehensive study on microgrid technology. *International Journal of Renewable Energy Research*, 6(3), 1033-1049.
6. Zamora, R., & Srivastava, A. K. (2010). Controls for microgrids with storage: Review, challenges, and research needs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 2009-2018.

7. Yan, B., Wang, B., Zhu, L., Liu, H., Liu, Y., Ji, X., & Liu, D. (2017). A novel, stable, and economic power sharing scheme for an autonomous microgrid in the energy internet. *Energies*, 10(12), 1-17.
8. European Parliament. (2019). Directive (EU) 2019/944 on common rules for the internal market for electricity. *Official Journal of the European Union*, L 158/125.
9. Mengelkamp, E., Gärttner, J., Rock, K., Kessler, S., Orsini, L., & Weinhardt, C. (2018). Designing microgrid energy markets: A case study: The Brooklyn Microgrid. *Applied Energy*, 210, 870-880.
10. Lopes, J. A. P., Madureira, A. G., & Moreira, C. C. L. M. (2013). A view of microgrids. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 2(1), 86-103.
11. Gao, D. W. (2015). *Energy storage for sustainable microgrid*. Academic Press.
- Kroposki, B., Lasseter, R., Ise, T., Morozumi, S., Papatlianassiou, S., & Hatziargyriou, N. (2008). Making microgrids work. *IEEE Power and Energy Magazine*, 6(3), 40-53.
12. Parhizi, S., Lotfi, H., Khodaei, A., & Bahramirad, S. (2015). State of the Art in Research on Microgrids: A Review. *IEEE Access*, 3, 890-925.
13. Planas, E., Gil-de-Muro, A., Andreu, J., Kortabarria, I., & Martínez de Alegría, I. (2013). General aspects, hierarchical controls and droop methods in microgrids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 17, 147-159.
14. Rocabert, J., Luna, A., Blaabjerg, F., & Rodríguez, P. (2012). Control of Power Converters in AC Microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(11), 4734-4749.
15. Fang, X., Misra, S., Xue, G., & Yang, D. (2012). Smart Grid -- The New and Improved Power Grid: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 14(4), 944-980.

References

1. Закон Украйны "Pro rynek elektrychnoyi enerhiyi" [Law of Ukraine "On the Electricity Market"]. (2017). *Vidomosti Verkhovnoyi Rady (VVR)*, № 27-28, 312. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19>
2. Systemnyy operator Украйны. Kodeks system rozpodilu (2023). [System Operator of Ukraine. (2023). [Distribution Systems, Available at: <https://ua.energy/>
3. Hirsch, A., Parag, Y., & Guerrero, J. (2018). Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 402-411.
4. Hossain, E., Kabalci, E., Bayindir, R., & Perez, R. (2014). Microgrid testbeds around the world: State of art. *Energy Conversion and Management*, 86, 132-153.
5. Bayindir, R., Hossain, E., Kabalci, E., & Perez, R. (2016). A comprehensive study on microgrid technology. *International Journal of Renewable Energy Research*, 6(3), 1033-1049.
6. Zamora, R., & Srivastava, A. K. (2010). Controls for microgrids with storage: Review, challenges, and research needs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 2009-2018.

7. Yan, B., Wang, B., Zhu, L., Liu, H., Liu, Y., Ji, X., & Liu, D. (2017). A novel, stable, and economic power sharing scheme for an autonomous microgrid in the energy internet. *Energies*, 10(12), 1-17.
8. European Parliament. (2019). Directive (EU) 2019/944 on common rules for the internal market for electricity. *Official Journal of the European Union*, L 158/125.
9. Mengelkamp, E., Gärttner, J., Rock, K., Kessler, S., Orsini, L., & Weinhardt, C. (2018). Designing microgrid energy markets: A case study: The Brooklyn Microgrid. *Applied Energy*, 210, 870-880.
10. Lopes, J. A. P., Madureira, A. G., & Moreira, C. C. L. M. (2013). A view of microgrids. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 2(1), 86-103.
11. Gao, D. W. (2015). Energy storage for sustainable microgrid. Academic Press. from <https://www.energy.gov/oe/services/technology-development/smart-grid/role-microgrids-helping-advance-nations-energy-system>
12. Parhizi, S., Lotfi, H., Khodaei, A., & Bahramirad, S. (2015). State of the Art in Research on Microgrids: A Review. *IEEE Access*, 3, 890-925.
13. Planas, E., Gil-de-Muro, A., Andreu, J., Kortabarria, I., & Martínez de Alegría, I. (2013). General aspects, hierarchical controls and droop methods in microgrids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 17, 147-159.
14. Rocabert, J., Luna, A., Blaabjerg, F., & Rodríguez, P. (2012). Control of Power Converters in AC Microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(11), 4734-4749.
15. Fang, X., Misra, S., Xue, G., & Yang, D. (2012). Smart Grid -- The New and Improved Power Grid: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 14(4), 944-980.

SYSTEM OF MONITORING AND MANAGEMENT OF ELECTRICITY CONSUMPTION IN THE MICRO-ENERGY SYSTEM OF A TERRITORIAL COMMUNITY WITH OWN SOURCES

S. Usenko, E. Ponomarenko, R. Kaplun, V. Ivashchuk

Abstract. *The article considers the practical aspect of organizing the functioning of a microgrid of a housing cooperative of household owners as a prototype for implementing European principles of decentralized energy supply in accordance with the new Law of Ukraine "On the Electricity Market".*

The study deals with the analysis of the features of structuring microenergy system sources and the principles of implementing monitoring and management of electricity consumption based on the use of modern software and hardware complexes.

The advantages of using cloud technologies (Oracle) for data processing, forming electricity consumption balances and forecasting in real time are proven.

The authors investigated the possibilities of integrating heterogeneous generation sources (external network, diesel generator, solar power plants, electricity storage systems) into a single microgrid with the ability to operate both when connected to the external network and in isolated mode (in energy island mode) with its own metering and dispatching system. Ways for further development of micro-energy systems of territorial communities in Ukraine are proposed, taking into account European experience and current regulatory and legal support.

Key words: *microgrid, energy island, decentralized energy supply, monitoring system, electricity consumption management, power balancing*