

УДК 621.311.1

КАПЛУН В.В.<sup>1</sup>, КРАВЧЕНКО О.П.<sup>1</sup>, ВАСИЛЕНКО В.В.<sup>2</sup>,  
МАКАРЕВИЧ С.С.<sup>2</sup>, КАПЛУН Р.В.<sup>1</sup>

Київський національний університет технологій та дизайну<sup>1</sup>,  
Національний університет біоресурсів та  
природокористування України<sup>2</sup>

### АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОПТИМІЗАЦІЇ МІКРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ (MicroGrid) НА ОСНОВІ ДЖЕРЕЛ РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ

**Мета.** Аналіз та обґрунтування вибору методів математичного моделювання і багатокритеріальної оптимізації функціонування мікроенергетичних систем з джерелами розподіленої генерації з урахуванням графіків навантаження, якості електричної енергії, надійності роботи та умов експлуатації.

**Методика.** Використання багатьма дослідниками різних методів математичного моделювання для опису ефективності та надійності роботи MicroGrid базується різному уявленні про вибір архітектури та розподілу потоків електроенергії, а також інформації про поточний стан усіх її вузлів і агрегатів. Доцільність обрання того чи іншого методу полягає у можливості моделювати динамічне управління генерацією і електроспоживання, прогнозування поведінки системи у пікові періоди.

**Результати.** Одержані рекомендації щодо надання переваг математичному моделюванню MicroGrid з використанням евристичних методів оптимізації, таких як АСО та PSO, які дають можливість одержувати розв'язки на значно коротшому інтервалі часу і характеризується підвищеною стійкістю до збіжності результатів.

**Наукова новизна.** Аналіз одержаних результатів математичного моделювання функціонування MicroGrid при пошуку мінімальних або максимальних значень багатокритеріальних цільових функцій дав можливість встановити переваги методів АСО та PSO для оптимізаційної процедури з меншою кількістю вихідних параметрів, більшою варіативністю у порівнянні з іншими евристичними чи традиційними методами.

**Практична значимість.** Використанням евристичних методів оптимізації АСО та PSO дає можливість одержувати розв'язки на значно коротшому інтервалі часу і характеризується підвищеною стійкістю до збіжності результатів при моделюванні MicroGrid з джерелами розподіленої генерації.

**Ключові слова:** мікроенергетична система, MicroGrid, джерела розподіленої генерації, методи багатокритеріальної оптимізації.

**Вступ.** Принципи постіндустріального суспільства XXI століття та концепція всесвітньої глобалізації виявили нові суспільно-економічні напрями розвитку економіки, які визначальним чином вплинули і на виникнення нових концептуальних положень функціонування електроенергетики. В основі парадигми минулого XX століття, століття інтенсивної індустріалізації та науково-технічної революції, була закладена концепція максимального зосередження матеріальних, фінансових, енергетичних та людських ресурсів для виробництва промислових, сільськогосподарських чи інших видів продукції. Основним завданням електроенергетики на той час було досягнення ефективності електропостачання,

що вимагало високої концентрації промислових та енергетичних потужностей і пов'язаних з цим значних економічних витрат.

На сучасному етапі відбувається мінімізація цих витрат шляхом зворотного процесу – розосередження потужностей як промислових, так і енергетичних виробництв. Цей процес спричинив розвиток нових ідеологічних засад менеджменту та маркетингу в сфері енергетичних послуг. Разом з тим, інтенсивний розвиток інформаційних та мережевих технологій, мікропроцесорної та силової електроніки обумовив значний прогрес в досягненні максимальної ефективності енергоспоживання об'єктами, що живляться від декількох конкурентних джерел. Обидва ці процеси, як економічний, так і виробничий, стали передумовою виникнення нового сектору електроенергетики – інтелектуальної електроенергетики, заснованої на концепції інтелектуальних мереж SmartGrid [1].

Ці мережі являють собою автоматизовані системи, які здійснюють власну генерацію, моніторинг та розподіл потоків електричної енергії з урахуванням вимог споживача для досягнення максимальної ефективності енергоспоживання. За визначенням USA Department of Energy Grids 2030: «Інтелектуальна мережа SmartGrid – це повністю автоматизована енергосистема, що забезпечує двосторонній потік електричної енергії та інформації між електричними станціями і електроприладами» [2]. Необхідно зазначити, що у загальному вжитку мнемонічна абревіатура SMART використовується в проектному управлінні, менеджменті, персональному розвитку, як критерій оцінки задачі або мети. Утворена зі англійських слів *specific, measurable, attainable, relevant, time-bound* — конкретна, вимірювана, досяжна, доречна, визначена в часі. Використання цього терміну для опису технічних багатокомпонентних систем стосується критеріїв, що збільшують імовірність досягнення поставленої мети, а саме: Self-Monitoring (самоконтроль), Analysis (аналіз) and Reporting Technology (формування звітів).

Згідно цієї концепції, функціонування енергетичного сектору забезпечується як за рахунок централізованих, так і децентралізованих розподілених джерел енергії (Distributed Energy Resources, DER). При цьому спостерігається збільшення кількості джерел електроенергії, які розосереджені на певній території чи локальному об'єкті та об'єднані в єдину мікросистему, утворюючи при цьому MicroGrid. MicroGrid має переваги порівняно з централізованими системами електропостачання, оскільки відсутня необхідність будівництва нових генеруючих потужностей, протяжних ліній електропередач та розподільних мереж, що, в свою чергу, потребує значних капіталовкладень і додаткових втрат електроенергії. Система електропостачання в MicroGrid організована шляхом інтегрування малопотужних джерел енергії та максимальної їх адаптації до режимів електроспоживання. Створення таких систем дозволяє радикально змінити відношення споживачів до управління процесами генерації та розподілу електроенергії [3].

У загальному вигляді система MicroGrid складається з декількох джерел електроенергії, пристроїв її акумуляування та засобів регулювання потоків електроенергії. При цьому існує можливість оперативного підключення споживачів до загальної електромережі у випадку перевантаження та коливань напруги, що суттєво підвищує надійність електрозабезпечення. Основою для MicroGrid є система FREEDM (Future Renewable Electric Energy Delivery and Management) [4], яка базується на концепції побудови універсального маршрутизатора енергії (Energy Router, ER), який має здійснювати динамічне

управління розподілом енергії між локальними джерелами та споживачами [5]. ER представляє собою програмований мікроконтролер, в основі програмного забезпечення якого лежать алгоритми оптимізації функціонування та контролю MicroGrid в цілому. Математичний опис таких оптимізаційних алгоритмів в реальному часі є досить складним завданням. Головним чином це обумовлюється нелінійностями при визначенні навантажень, невизначеністю профілів навантаження та стохастичного характеру вхідних параметрів системи і змінних, що описують процес генерації електроенергії. У випадку підключення до загальної електромережі необхідно враховувати диференційні тарифи на електроенергію енергопостачальних компаній. На даний час тарифна політика енергопостачальних компаній в Україні не стимулює кінцевого споживача до радикальної зміни графіків електроспоживання, однак тарифні зони зовнішньої мережі доцільно враховувати при математичному моделюванні та розрахунках оптимізаційних алгоритмів функціонування MicroGrid. Проте необхідно зауважити, що в зв'язку з економічними реформами, які проводяться в Україні у відповідності до Протоколу про приєднання до Енергетичного Співтовариства та Угоди про асоціацію з ЄС, конкуренція між постачальниками електроенергії буде зростати через зменшення державного контролю над енергетичним ринком. Тому при техніко-економічному обґрунтуванні MicroGrid та оптимізації її алгоритмів, необхідно враховувати тенденції на енергетичному ринку загалом.

Особливим питанням при розробці MicroGrid є врахування шкідливих викидів в атмосферу при роботі локальних джерел електрогенерації ( дизель – генераторів, мікротурбін, паливних елементів) [6]. Екологічне законодавство в Європейському Союзі, США, Канаді та інших розвинутих країнах чітко визначає допустимі викиди шкідливих компонентів у атмосферу. Дані показники повинні також враховуватися при оптимізації роботи MicroGrid.

**Постановка задачі.** Ефективність та надійність роботи MicroGrid базується на пошуку її оптимальної архітектури відносно розподілу потоків електроенергії та інформації про стан всіх її вузлів. Задача оптимізації зводиться до мінімізації цільової функції за різними критеріями ефективності. На даний час досить широке коло дослідників пропонують та використовують різноманітні підходи до побудови математичних моделей функціонування мікроенергетичних систем з декількома джерелами розподіленої генерації.

Завданням даної статті є аналіз літературних джерел щодо методів розроблення математичних моделей функціонування та оптимізації режимів роботи MicroGrid.

**Результати дослідження.** В області електроенергетичних систем пріоритетним завданням є досягнення прийнятних економічних рішень. Ця задача полягає в розробці визначених конфігурацій електричних мереж для забезпечення необхідних вимог, які накладаються на оптимальне (ефективне) функціонування як кожного елемента мережі, так і системи загалом. Такі вимоги закладаються вихідними енергетичними параметрами, а саме: графіком навантаження споживачів, якістю електричної енергії, надійністю роботи електроенергетичної системи, умовами її експлуатації. Важливим параметром, який враховується при розробці оптимальної конфігурації електромережі є також безпека функціонування цієї системи як по відношенню до внутрішніх елементів системи, так і по відношенню до навколишнього середовища. В рамках досягнення необхідного оптимального економічного рішення для оптимізації процесів в електроенергетичній системі, функціонування якої контролюється визначеними параметрами (контроль напруги та

реактивної потужності, визначена локалізація контролюючих та управляючих пристроїв, тощо) були розроблені оптимізаційні алгоритми для забезпечення безперебійної роботи електроенергетичної системи на основі традиційних оптимізаційних методів для розв'язання задач такого типу. Розв'язок полягає в знаходженні мінімального або максимального значення цільової функції, яка включає в себе необхідні параметри функціонування електроенергетичної системи в допустимій області пошуку, яка обмежена вимогами, що накладаються на роботу цієї системи. В загальному вигляді ці методи класифікують наступним чином:

1. Методи лінійного програмування – прості оптимізаційні методи, в яких цільова функція і область пошуку визначаються лінійними залежностями. Методи лінійного програмування застосовувались для різних задач електроенергетики, таких як задачі знаходження економічного розподілу електроенергії, проектування і функціонування електроенергетичної системи, узгодженості її захисту, забезпечення графіка навантаження, оцінювання стану системи [7-9]. До методу лінійного програмування належить також методи цілочислового програмування, в яких всі або деякі змінні визначені як дискретні цілочислові величини. Цей метод використовується для оцінки безпеки енергетичних систем, для оптимізації та проектування ЛЕП, аналізу надійності, проектування розподілених систем та менеджменту навантаження [10-12].

2. Методи нелінійного програмування – оптимізаційні методи, в яких цільова функція задана нелінійною залежністю при допустимій області пошуку, яка може бути виражена як лінійними так і нелійними залежностями. Однак, вважається, що знаходження оптимального розв'язку нелінійної цільової функції з нелійними обмеженнями є дуже складною задачею. Тому при розв'язуванні такого типу задач область допустимого пошуку задається лінійною залежністю. Методи нелінійного програмування з лінійно обмеженою областю пошуку належать до лінійно обмежених задач методів нелінійного програмування. [13]. Цей метод інтенсивно використовується для оптимізаційних задач динамічної безпеки електричних систем, контролю перетоків реактивної потужності, проектування і функціонування електричних системи, оптимального потоку потужності в системі, оптимального розміщення засобів компенсації реактивної потужності та оптимальної локації джерел електроенергії [14-17].

3. Методи стохастичного програмування - оптимізаційні методи, які використовуються для розв'язання задач, що містять в собі невизначеність, в яких цільова функція задається імовірнісною функцією. Ці методи також називаються методами динамічного програмування [18]. Цей метод широко використовується для розв'язання задач оптимізації, але знаходження чисельного розв'язку вимагає значних обчислювальних розрахунків, які збільшують імовірність отримання квазіоптимальних результатів, які, здебільшого, обумовлені розмірністю змінних. Наприклад, цей метод був використаний для оптимізації потужності джерел генерації електроенергії та в задачі оптимального функціонування електричної системи на рівні розподіленої системи [19].

4. Евристичні методи оптимізації – оптимізаційні методи, в яких оптимальне значення цільової функції при допустимій області пошуку знаходиться методами нечіткої логіки при використанні алгоритмів, які реалізуються на основі систем штучного інтелекту. Головною особливістю цих методів є їх надзвичайна гнучкість при розв'язуванні задач

оптимізації, які мають область допустимого пошуку, що виражено різноманітними математичними обмеженнями (як лінійними, так і нелінійними). При цьому оптимальний розв'язок задається множиною простору розв'язків. До евристичних методів оптимізації належать: генетичний алгоритм (Genetic Algorithm, GA), алгоритм диференційної еволюції, алгоритм оптимізації мурашиної колонії (Ant Colony Optimization, ACO), алгоритм методу рою частинок (Particle Swarm Optimization, PSO) [20]. Згадані вище евристичні методи інспіровані алгоритмами, які реалізуються для опису функціонування біологічних систем. Зокрема, генетичний алгоритм та алгоритм диференційної еволюції базуються на уяві про загальні принципи механізмів еволюційної біології. Так, в процесі еволюції живих організмів, нащадки наслідують риси, які є оптимальними при заданих умовах [21]. При цьому генетичний алгоритм призначений для оптимізації функцій дискретних змінних, в ньому акцентується увага на рекомбінаціях геномів, тобто цей алгоритм оперує передачею генетичної інформації біологічної популяції. Алгоритм диференційної еволюції направлений на передачу фенотипної інформації.

При використанні генетичного алгоритму оптимальний розв'язок знаходиться швидко, проте цей метод має деякі негативні аспекти, а саме:

- збіжність наближається до локального розв'язку швидше, ніж до глобального. GA нехтує негативним розв'язком, проходячи лише через хороший. Ця особливість є основним недоліком еволюційних методів;

- складність проходження ряду динамічних даних;

- в окремих оптимізаційних задачах, при достатніх потужностях для обчислень, простіший метод оптимізації дає можливість досягнути кращого результату, ніж той, який реалізується за допомогою генетичного алгоритму.

І еволюційні процеси, і розгляд поведінкових ситуацій належить до біологічно-імітаційних алгоритмів при знаходженні оптимальних рішень. Серед цих методів для розв'язання задач оптимізації найкращі результати при знаходженні оптимального розв'язку цільової функції досягаються за допомогою методу оптимізації рою частинок (PSO) порівняно з іншими імітаційними алгоритмами [22]. Цей алгоритм інспірований спостереженнями за особливостями соціальної поведінки живих організмів в колективі (косяк риб, зграя птахів). Індивідуальна частинка колективу співвідносить своє оптимальне положення з найкращим колективним положенням рою. Головною властивістю цього методу є те, що складність і нелінійність задачі не впливають особливим чином на знаходження оптимального значення цільової функції [23].

До переваг алгоритму PSO можна віднести:

- алгоритм PSO краще реалізовується з меншою кількістю вихідних параметрів;

- використання пам'яті у алгоритмі PSO є більш ефективним за рахунок того, що кожна частинка здатна запам'ятовувати як своє найкраще попереднє положення, так і найкраще положення свого сусіда;

- алгоритм PSO характеризується ефективною варіативністю. Це обумовлено тим, що рій частинок використовує найбільш ефективну інформацію для визначення напрямку оптимального розв'язку, як це притаманно поведінці соціальних спільнот.

Приведені вище методи оптимізації при знаходженні мінімального або максимального значення цільової функції при накладених обмеженнях виявилися ефективними при розробці MicroGrid та моделювання її оптимального функціонування.

Як було сказано вище, MicroGrid є керованим компонентом SmartGrid і являє собою низьковольтну мережу невеликої потужності, яка спроектована для електрозабезпечення невеликого локального об'єкту (житла, торгівельної площі, промислової ділянки, тощо).

Математичний опис MicroGrid як оптимізаційної задачі у реальному часі є складним завданням. Головним чином це обумовлено нелінійностями в навантаженнях і в структурі тарифних ставок (наприклад - фіксована чи диференційована плата за обслуговування), необхідністю проведення розрахунків шляхом знаходження цілочисленних розв'язків при функціонуванні/відключенні джерел живлення (пристроїв генерації, акумулювання і перетворення енергії), невизначеністю майбутнього профілю навантаження, можливістю зміни структури MicroGrid, часом і вартістю запуску обладнання. Керування в MicroGrid направлене на забезпечення наступних параметрів:

- безпека системи і її оптимальне функціонування;
- зменшення шкідливих викидів в оточуюче середовище при функціонуванні системи;
- плавний перехід від одного режиму до другого без порушень системних обмежень та експлуатаційних вимог.

Забезпечення цих параметрів досягається наступними функціональними і керуючими компонентами MicroGrid:

1. Для забезпечення якості електроенергії необхідно суттєво вирівнювати баланс між активною і реактивною потужністю усередині MicroGrid за короткий період часу.

2. MicroGrid може функціонувати в двох експлуатаційних режимах: або автономно у межах локального об'єкту без зв'язку централізованою мережею, або в режимі роботи автономних джерел, які приєднані до централізованої мережі.

3. Генерація та акумулювання електроенергії повинно бути належним чином збалансоване з урахуванням необхідних вимог забезпечення графіка навантаження.

4. Економічно вигідна експлуатація забезпечується визначеним графіком генерації електроенергії, ефективним розподілом потужності та оптимізацією потоків енергії різних джерел.

5. Безпека системи підтримується шляхом аналізу наслідків аварій (відключень), можливих при даному режимі функціонування. Необхідно враховувати особливості роботи MicroGrid у аварійному режимі при зниженні навантаження шляхом обмеження або вимикання деяких компонентів системи, виходячи з вимог споживача.

6. Тимчасовий дисбаланс між генерацією і навантаженням повинен вирівнюватися шляхом динамічного прогнозування узгодження графіка навантаження з економічно обґрунтованим обсягом генерації системи, в тому числі і шляхом залучення користувача до управління попитом, в першу чергу через прийняття рішень щодо додаткової генерації або зменшення споживання в пікові періоди роботи MicroGrid.

7. Організація функціонування MicroGrid, якісного енергоменеджменту, захисту і контролю поведінки системи повинна базуватись на використанні телекомунікаційних інфраструктур з відповідними протоколами збору, обробки та передачі інформації.

Математичні методи оптимізації, які використовуються при проектуванні і моделюванні роботи електроенергетичних систем, також знайшли своє застосування і для MicroGrid. Аналогічно їх можна розділити, згідно класифікації, яка наведена нижче.

Методи лінійного програмування. В роботі [24] в рамках багатоцільової оптимізації розглядається сценарій, коли MicroGrid може функціонувати в паралельному режимі. В структуру MicroGrid входять фотоелектричні модулі, вітрові турбіни, електростанції з двигунами внутрішнього згорання, акумуляторні батареї. Крім того робота такої системи передбачає підключення до централізованої електромережі. Потреба в розгляді такого сценарію обумовлена можливими екстремальними факторами роботи, обумовленими порушеннями енергетичного балансу у MicroGrid та недостатньою надійністю джерел електроенергії. В цьому випадку задача управління ефективністю системи являє собою складну задачу багатоцільової оптимізації, для розв'язку якої доцільно використання методу лінійних зважених сум, який належить до інструментарію лінійного програмування, і дає можливість трансформувати її в одноцільову задачу оптимізації.

В роботі [25] розглядається система управління потоками енергії для забезпечення добового графіка навантаження з метою оптимізації експлуатаційних витрат MicroGrid на основі фотоелектричних модулів, які виконують функцію локальних джерел електроенергії. Запропоновані принципи оптимізації ґрунтуються на методах лінійного програмування поряд з евристичними методами. Огляд евристичних методів оптимізації буде викладено нижче, проте в заданому контексті необхідно зауважити, що отримані в цьому дослідженні результати продемонстрували можливість загального підвищення ефективності процесу оптимізації за рахунок комбінації різних алгоритмів функціонування елементів MicroGrid.

В роботі [26] автори постулюють, що для оптимізації функціонування та управління MicroGrid можливо використовувати систему цільових функцій, в якій оптимізується кожна окрема цільова функція, зокрема функції: "високої надійності для споживача", яка включає в себе термін експлуатації мережі, витрати на технічне обслуговування, наявність інтелектуальних вимірювальних пристроїв; "забезпечення користувачу найнижчої кінцевої ціни на електроенергію". Інструментарій лінійного програмування використовується для дослідження функції "високої надійності для споживача". Велика кількість компонентів мережі впливають на показники надійності в цілому. Ідея полягає в тому, що без детального врахування кожного компонента системи коректний опис MicroGrid неможливий. Тому деякі автори пропонують використовувати інтелектуальні давачі, які спроможні передбачати деякі порушення роботи в мікромережі та лінійні вимикачі, які зможуть обмежити поширення таких побічних ефектів на MicroGrid в цілому. Таким чином в описаному підході цільова функція надійності коректно максимізується шляхом звуження граничних обмежень, які накладаються на функцію, що оптимізується, як використанням інтелектуальних давачів, так і лінійних вимикачів. Цей приклад показує ефективність використання методів лінійного програмування шляхом зведення нелінійних граничних умов до лінійної конфігурації за допомогою використання апаратних компонентів для спрощення пошуку оптимуму заданої цільової функції.

Методи нелінійного програмування не знайшли широкого використання в оптимізаційних задачах для MicroGrid. В той же час, стохастичні методи програмування були описані при використанні модифікованої теорії ігор для знаходження оптимальних

значень заданої цільової функції в обмеженому просторі пошуку. Прикладом застосування стохастичних методів оптимізації для MicroGrid є робота [27], в якій розглядалися алгоритми оптимізації на основі теорії ігор. Основна мета цієї роботи полягала в одержанні узагальненого формулювання оптимальної робочої стратегії та економічної схеми оптимізації поруч зі зменшенням шкідливих викидів у атмосферу, які спричинені роботою двигунів внутрішнього згорання та паливних елементів. Поставлена задача формулюється у вигляді нелінійної задачі умовної оптимізації для того, щоб звести до мінімуму функцію вартості системи при обмеженнях, обумовлених попитом споживачів та безпекою системи з врахуванням витрат на експлуатацію, технічне обслуговування та зменшення шкідливих викидів. MicroGrid, для якої здійснюється така оптимізаційна задача, складається з вітрової турбіни, мікротурбіни, електростанції з двигуном внутрішнього згорання, фотоелектричних елементів, паливного елемента та акумулюючих пристроїв.

В роботі [28] представлена стохастична оптимізація на основі методу Монте-Карло як еталонного методу, який порівнювався з функціонуванням MicroGrid, модель роботи якої була реалізована на основі евристичного алгоритму.

Евристичні методи оптимізації для MicroGrid. Генетичний алгоритм (GA), алгоритм оптимізації мурашиної колонії (ACO), алгоритм методу рою частинок (PSO), які належать до евристичних методів оптимізації, були успішно використані для оптимізації роботи MicroGrid. В [29] був запропонований поліпшений GA для MicroGrid за рахунок його комбінації з методом імітації відпалювання для прискорення збіжності розв'язку оптимізаційної задачі. Мета роботи полягала в тому, щоб мінімізувати вартість функціонування ізольованої MicroGrid, що давало можливість одержувати максимальний прибуток при приєднанні до загальної мережі. Крім того, в роботі [30] був описаний багатоцільовий генетичний алгоритм для планування оптимального розміщення елементів розподіленої генерації (DG) та додаткових з'єднань системи між радіальними живлячими лініями для поліпшення надійності автономного функціонування MicroGrid. Автори за допомогою модельного аналізу системи запропонували алгоритм самонавчання (прогнозування поведінки) для зменшення часу комп'ютерних обчислень. Робота [31] присвячена моделюванню роботи MicroGrid, що складалася з вітротурбіни, фотобатарей, паливного елемента та мікротурбіни. В цій статті автори розглядали різні обмеження, що ґрунтуються на особливостях вартості використання обладнання та забезпечення графіка навантаження (прогнозування навантаження) і зміни погодних умов (прогнозування енергетичного потенціалу вітру і сонця) на основі використання GA для знаходження оптимального розв'язку при детерміновано обраному модельному ряді джерел та співвідношеннях установлених потужностей джерел.

Для оптимізації функціонування MicroGrid були також використані оптимізаційні еволюційні алгоритми [32]. Запропонована оптимізаційна стратегія управління роботою автономної MicroGrid, мета якої була сфокусована на можливостях мінімізації повної вартості функціонування при мінімізації шкідливих викидів в атмосферу і припущенні, що залучені поновлювані джерела енергії використовуються максимально ефективно. Для цього використаний еволюційний алгоритм, що здатний автоматично підлаштовуватися для пошуку оптимальних рішень для MicroGrid.



Використання диференціального еволюційного методу для оптимізації функціонування MicroGrid запропоноване у [33]. Була запропонована цільова функція вартості, яка враховує вартісне оцінювання шкідливих викидів у довкілля, а також поточні витрати на функціонування та технічне обслуговування. Алгоритм, який був використаний у цьому випадку, враховував зміну графіка навантаження у часі з відповідною зміною рівня заряду акумуляторів. З іншого боку використовувалися центральні контролери для відповідного реагування на змінні функціонування: погодні умови, інтенсивність сонячної радіації, швидкість вітру, експлуатаційні витрати. Особливості оптимізації обміну електроенергією між MicroGrid і загальною мережею з використанням еволюційного алгоритму показані у роботі [34]. Серед імітаційних методів для розв'язання задач оптимізації функціонування MicroGrid знайшов використання методу, що базується на алгоритмі АСО. Цей алгоритм є вдосконаленим методом графів для знаходження оптимального розв'язку цільової функції при заданих обмеженнях і дозволяє знаходити розв'язок шляхом незначної кількості реалізацій при наявності сукупності обмежень.

Для пошуку розв'язку багатокритеріальних цільових функцій при заданому просторі обмежень в MicroGrid найбільшої популярності серед евристичних оптимізаційних методів набув метод АСО та PSO [35,36,37]. Опис структури керуючого контролера для диспетчерського управління в MicroGrid при заданих обмеженнях та критеріях, які включають в себе екологічні вимоги, доступність до первинного палива джерел та економічну ефективність представлено на основі методів АСО та PSO. Для підвищення надійності існуючої архітектури MicroGrid запропоновано підхід, що враховує граничні умови шляхом застосування штрафних функцій. Доведено, що порівняно з методами динамічного програмування, PSO дає можливість отримати кращі результати.

Модель, за допомогою якої стало можливим визначити багатоцільовий оптимум для функціонування MicroGrid по відношенню до графіка навантаження з урахуванням екологічних вимог представлено у [38]. На результати моделювання впливають випадкові змінні, які характеризують погодні умови, кількість викидів у атмосферу, вартість функціонування системи та підтримки її роботоздатності, вартість початкових капітальних витрат (start-up) та базова потужність.

Цікаві результати показані у роботі [39]. Оптимізація MicroGrid заснована на використанні методу PSO для локальних джерел розподіленої генерації DER, що складається з паливних елементів, мікротурбін, сонячних батарей, вітрогенераторів та накопичувачів електроенергії. Метод PSO був порівняний зі стохастичними методами оптимізації. Автори виходили з того, що MicroGrid, які містять DER не наносять шкоди оточуючому середовищу та збільшують загальну енергетичну ефективність мереж. Своїх переваг MicroGrid може досягти у випадку, коли DER характеризується оптимальною структурою та розташуванням джерел. При цьому метод PSO виявився найбільш ефективним для оптимізації розміру та розташування DER у вузловій мережі, що підтверджується досягненням максимальної економічної переваги внаслідок зменшення втрат у мережах. Також встановлено, що введення нового елемента DER у систему може впливати на безпеку та надійність функціонування MicroGrid і буде залежати від типу та положення доданого елемента у об'єднаній системі. Отже, результати дослідження залежності втрат у мережах від потужності та розташування DER з використанням методу PSO, одержані на протязі значно

коротшого проміжку часу, необхідного для обчислень і мають значно більшу збіжність, порівняно з іншими стохастичними методами.

Оригінальне рішення запропоноване у [40] для спільного використання мікротурбіни та електростанції з двигуном внутрішнього згорання. На основі методу PSO з урахуванням співвідношень використання первинних палив і шкідливих викидів у атмосферу досліджена радіальна MicroGrid з чотирма DER. Оптимізація була здійснена для умов обмеженої потужності джерел та пропускну здатності мереж. Питанням забезпечення стійкості функціонування MicroGrid, яка працює як в автономному режимі, так і паралельно з мережею присвячена робота [41]. Представлені моделі інвертор, як статичне джерело, LC-фільтр, зв'язана індуктивність, фазове автоматичне підстроювання частоти, лінії навантаження, контролери для управління системою за параметрами мережі (потужністю, струмом та напругою). Задача вибору компонентів MicroGrid і параметрів управління системою була сформульована як оптимізаційна задача, для розв'язку якої був використаний метод PSO, що дало змогу знайти коефіцієнти розподілу потужності в автономному режимі функціонування та оптимальні параметри для LC-фільтра та контролера у випадку включення на паралельну роботу MicroGrid з загальною мережею.

**Висновки.** З наведеного аналізу літературних джерел видно, що для проектування та забезпечення ефективного функціонування MicroGrid придатні до застосування як традиційні, так і сучасні евристичні методи оптимізації. Однак, як свідчать одержані результати математичного моделювання, евристичні методи оптимізації виявилися більш прийнятними для знаходження оптимальних значень цільових функцій, що пов'язано з доведеними перевагами евристичних методів над традиційними методами оптимізації, зокрема пошуку мінімальних або максимальних значень багатокритеріальних цільових функцій.

Серед евристичних методів найбільш популярними в задачах оптимізації стали методи ACO та PSO. Як зазначено вище, метод ACO дозволяє знаходити оптимальний розв'язок за короткий проміжок часу при наявності складних обмежень. Разом з тим, метод PSO дозволяє одержувати розв'язки на значно коротшому інтервалі часу і характеризується підвищеною стійкістю до збіжності результатів, дозволяє знаходити оптимальний розв'язок з меншою кількістю вихідних параметрів, характеризується більшою варіативністю порівняно з іншими евристичними чи традиційними методами.

#### Список використаних джерел

1. Стогній Б.С., Кириленко О.В., Праховник А.В., Денисюк С.П. Інтелектуальні електричні мережі: світовий досвід і перспективи України // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: 36. наук. Пр. Спец. Випуск. Ч. 1. К.: ІЕД НАНУ, 2011. С. 5-20.
2. Grid 2030: A National Version for Electricity's Second 100 Years // Office of Electric Transmission and Distribution United State Department of Energy, July 2003.
3. Abinash Singh, Balwinder Singh Surjan MICROGRID: A REVIEW International Journal of Research in Engineering and Technology Volume: 03 Issue: 02 | Feb-2014.
4. Huang, A.Q. , Baliga, J. FREEDM System: Role of power electronics and power semiconductors in developing an energy internet / Power Semiconductor Devices & IC's, 2009. ISPSD 2009. 21st International Symposium on Barcelona, 14-18 June 2009, p.9-12, IEEE.
5. Yi Xu , Jianhua Zhang ; Wenye Wang ; Juneja, A. etc. Energy router: Architectures and functionalities toward Energy Internet /Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2011 IEEE International Conference on Brussels, 17-20 Oct. 2011, p.31 - 36, IEEE.

6. Smart Grid European Technology Platform for Electricity Networks of the Future. European Commission, 2005. [Electronic resource] Mode of access: <http://www.smartgrds.eu/>
7. J. K. Delson and S. M. Shahidehpour, "Linear programming applications to power system economics, planning and operations," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 7, no. 3, pp. 1155–1163, 1992.
8. C. N. Kurucz, D. Brandt, and S. Sim, "A linear programming model for reducing system peak through customer load control programs," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 11, no. 4, pp. 1817–1824, 1996.
9. H. M. Khodr, J. F. Gomez, L. Barnique, J. H. Vivas, P. Paiva, J. M. Yusta, and A. J. Urdaneta, "A linear programming methodology for the optimization of electric power-generation schemes," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 17, no. 3, pp. 864–869, 2002.
10. N. Alguacil, A. L. Motto, and A. J. Conejo, "Transmission expansion planning: a mixed-integer lp approach," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 18, no. 3, pp. 1070–1077, 2003.
11. F. G. M. Lima, F. D. Galiana, I. Kockar, and J. Munoz, "Phase shifter placement in large-scale systems via mixed integer linear programming," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 18, no. 3, pp. 1029–1034, 2003.
12. F. Soudi and K. Tomsovic, "Optimized distribution protection using binary programming," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 13, no. 1, pp. 218–224, 1998.
13. J. Nocedal and S. Wright, *Numerical optimization*. Springer verlag, 1999.
14. D. Pudjianto, S. Ahmed, and G. Strbac, "Allocation of var support using lp and nlp based optimal power flows," *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-*, vol. 149, no. 4, pp. 377–383, 2002.
15. A. Ramos, I. J. Perez-Arriaga, and J. Bogas, "A nonlinear programming approach to optimal static generation expansion planning," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 4, no. 3, pp. 1140–1146, 1989.
16. W. Hua, H. Sasaki, J. Kubokawa, and R. Yokoyama, "An interior point nonlinear programming for optimal power flow problems with a novel data structure," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 13, no. 3, pp. 870–877, 1998.
17. R. A. Gallego, A. J. Monticelli, and R. Romero, "Optimal capacitor placement in radial distribution networks," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 16, no. 4, pp. 630–637, 2001.
18. E. Diaz-Dorado and J. C. Pidre, "Optimal planning of unbalanced networks using dynamic programming optimization," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 19, no. 4, pp. 2077–2085, 2004.
19. W. J. Hobbs, G. Hermon, S. Warner, and G. B. Shelbe, "An enhanced dynamic programming approach for unit commitment," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 3, no. 3, pp. 1201–1205, 1988.
20. S. Kannan, S. M. R. Slochanal, and N. P. Padhy, "Application and comparison of metaheuristic techniques to generation expansion planning problem," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 20, no. 1, pp. 466–475, 2005.
21. M. Mohammadi, S. Hosseinian, and G. Gharehpetian, "Ga-based optimal sizing of microgrid and dg units under pool and hybrid electricity markets," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 35, no. 1, pp. 83 – 92, 2012.
22. R. Hassan, B. Cohanin, O. De Weck, and G. Venter, "A comparison of particle swarm optimization and the genetic algorithm," in *Proceedings of the 1st AIAA Multidisciplinary Design Optimization Specialist Conference*, 2005.
23. L. Arya, L. Titare, and D. Kothari, "Improved particle swarm optimization applied to reactive power reserve maximization," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 32, no. 5, pp. 368 – 374, 2010.
24. Cheng-Shan WANG, Bo YU, Jun XIAO, Li GUO, "Multiscenario, Multi-objective Optimization of Grid-Parallel Microgrid", *Proceedings of 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*, 2011, 6-9 July 2011, pp. 1638 – 1646.
25. Sudipta Chakraborty, M. Godoy Simoes, "PV-Microgrid Operational Cost Minimization by Neural Forecasting and Heuristic Optimization", *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Edmonton, Alberta, Canada, 5-9, October 2008.
26. Dr. Péter Kádár, "Multi Objective Optimization of Smart Grid Structure", *Proceedings of 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems*, Curitiba, Brazil, 8 -12 November, 2009, pp. 1 – 5.
27. Faisal A. Mohamed, Heikki N. Koivo, "Multiobjective optimization using modified game theory for online management of microgrid", *European Transaction of Electrical Power*, January, -2011, Vol-21, Issue-1, pp. 839-854.
28. C. Rueda-Medina, A. Padilha-Feltrin, "Pricing of Reactive Power Support Provided by Distributed Generators in Transmission Systems", *Proceedings of IEEE PES Anchor Conference, Trondheim PowerTech 2011*, 19-23 June, 2011, pp. 1 – 7.

29. H.Z. Liang, H.B. Gooi, "Unit Commitment in Microgrids by Improved Genetic Algorithm", Proceedings of International Symposium on Parameterized and Exact Computation (IPEC 2010) , 25-27 August ,2010, pp. 842 -847.
30. J. Giráldez, A. Jaiantilal, J. Walz, S. Suryanarayanan, S. Sankaranarayanan, H. E. Brown, E. Chang, "An Evolutionary Algorithm and Acceleration Approach for Topological Design of Distributed Resource Islands", IEEE Conference PowerTech, 2011, Trondheim , Norway 19–23 June, 2011 pp. 1 – 8.
31. Qijun Deng, Xing Gao, Hong Zhou , Wenshan Hu, "System modeling and optimization of microgrid using Genetic Algorithm", Proceedings of 2nd International Conference on Intelligent Control and Information Processing (ICICIP), 2011, Volume: 1 ,Date:25-28 July, 2011 , pp. 540 – 544.
32. S. Conti, S.A. Rizzo, "Optimal Control to Minimize Operating Costs and Emissions of MV Autonomous Micro-Grids with Renewable Energy Sources", Proceedings of International Conference on Clean Electrical Power, 2009 , 9-11 June, 2009, pp. 634 – 639.
33. H. Vahedi, R. Noroozian, S. H. Hosseini, "Optimal Management of MicroGrid Using Differential Evolution Approach", Proceedings of 7th European International Conference on Energy Market (EEM- 2010), 23-25 June, 2010, Spain, pp. 1 – 6.
34. Mirosław Parol, Tomasz Wójtowicz, "Optimization of Exchange of Electrical Energy between Microgrid and Electricity Utility Distribution Network", Proceedings of the International Symposium on Modern Electric Power Systems (MEPS), Poland , Date:20-22 September, 2010 pp. 1 – 6.
35. C.M. Colson, M.H. Nehrir, C. Wang., "Ant Colony Optimization for Microgrid Multi-Objective Power Management", Proceedings of IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, 2009, ( PSCE '09), 15-18 March 2009, pp. 1-7.
36. C.M. Colson, M.H. Nehrir, S. A. Pourmousavi, "Towards Realtime Microgrid Power Management using Computational Intelligence Methods", Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE, Date:25-29 July, 2010, pp. 1 – 8.
37. Joydeep Mitra, Shashi B. Patra, Satish J. Ranade, "Reliability Stipulated Microgrid Architecture Using Particle Swarm Optimization", Proceedings of 9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, KTH, Stockholm, Sweden - June 11-15, 2006.
38. Faisal A. Mohamed, Heikki N. Koivo, "Online Management of MicroGrid with Battery Storage Using Multi-objective Optimization", Proceedings of International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, (POWERENG 2007), Date:12-14 April 2007, pp. 231 – 236.
39. A.K. Basu, A. Bhattacharya, S.P. Chowdhury, S. Chowdhury, P.A. Crossley, "Reliability study of a Micro grid system with optimal sizing and placement of DER", CIRED Seminar 2008: Smart Grids for Distribution Paper No 127, Frankfurt, 23 - 24 June 2008.
40. A. K. Basu, S. Chowdhury, S.P. Chowdhury, "Operational Management of CHP-Based Microgrid", Proceedings of International Conference on Power System Technology (POWERCON- 2010), 24-28 October, 2010, pp. 1 – 5.
41. M. A. Hassan and M. A. Abido, "Optimal Design of Microgrids in Autonomous and Grid-Connected Modes Using Particle Swarm Optimization", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.26, No.3, March, 2011, pp. 755 – 769.

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ МИКРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ (MicroGrid) НА ОСНОВЕ ИСТОЧНИКОВ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

КАПЛУН В.В.<sup>1</sup>, КРАВЧЕНКО О.П.<sup>1</sup>, ВАСИЛЕНКО В.В.<sup>2</sup>, МАКАРЕВИЧ С.С.<sup>2</sup>,  
КАПЛУН Р.В.<sup>1</sup>

*Київський національний університет технологій та дизайну<sup>1</sup>,*

*Національний університет біоресурсів та природокористування України<sup>2</sup>*

**Цель.** Анализ и обоснование выбора методов математического моделирования и многокритериальной оптимизации функционирования микроэнергетических систем с источниками распределенной генерации с учетом графиков нагрузки, качества электрической энергии, надежности работы и условий эксплуатации.

**Методика.** Использование многими исследователями различных методов математического моделирования для описания эффективности и надежности работы MicroGrid базируется на разном представлении о выборе архитектуры и распределения потоков электроэнергии, а также информации о текущем состоянии всех ее узлов и агрегатов.

Целесообразность избрания того или иного метода заключается в возможности моделировать динамическое управление генерацией и электропотреблением, прогнозирования поведения системы в пиковые периоды.

**Результаты.** Полученные рекомендации о предоставлении преимуществ математическому моделированию MicroGrid с использованием эвристических методов оптимизации, таких как ACO и PSO, которые дают возможность получать решения на значительно более коротком интервале времени и характеризуются повышенной устойчивостью к сходимости результатов.

**Научная новизна.** Анализ полученных результатов математического моделирования функционирования MicroGrid при поиске минимальных или максимальных значений многокритериальных целевых функций позволил установить преимущества методов ACO и PSO для оптимизационной процедуры с меньшим количеством выходных параметров, большей вариативностью по сравнению с другими эвристическими или традиционными методами.

**Практическая значимость.** Использование эвристических методов оптимизации ACO и PSO позволяет получать решения на значительно более коротком интервале времени и характеризуется повышенной устойчивостью к сходимости результатов при моделировании MicroGrid с источниками распределенной генерации.

**Ключевые слова:** микроэнергетическая система, MicroGrid, источники распределенной генерации, методы многокритериальной оптимизации.

## ANALYSIS METHOD FOR OPTIMIZING MICRO ENERGY SYSTEMS (MicroGrid) BASED ON THE DISTRIBUTED ENERGY SOURCES

KAPLUN V.<sup>1</sup>, KRAVCHENKO O.<sup>1</sup>, VASILENKO V.<sup>2</sup>, MAKAREVICH S.<sup>2</sup>, KAPLUN R.<sup>1</sup>  
*Kyiv National University of Technologies and Design<sup>1</sup>,  
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine<sup>2</sup>*

**Purpose.** Analysis and rationale for the selection of methods of mathematical modeling and multi-criteria optimization operation of micropower systems with distributed generation sources considering the energy consumption schedules, quality of electric power, reliability and operating conditions.

**Methodology.** The use of many researchers of different methods of mathematical modeling to describe the efficiency and reliability of MicroGrid based on different ideas about the choice of architecture and flow distribution of electricity, as well as information about the current state of all its components and assemblies. The expediency of the election of a particular method is the ability to model the dynamic management of the generation and power consumption, forecasting the behavior of the system during peak periods.

**Findings.** The resulting recommendations are giving possibility mathematical modeling of MicroGrid using heuristic optimization techniques, such as ACO and PSO, which make it possible to obtain solutions at a significantly shorter time interval and characterized by an increased resistance to the convergence of the results.

**Originality.** Analysis of the results of mathematical modeling of functioning MicroGrid when searching for the minimum or maximum values multicriteria objective functions it possible to establish the benefits of ACO and PSO methods for the optimization procedure with fewer output parameters, greater variability compared with other heuristics or traditional methods.

**Practical value.** The use of heuristic optimization methods ACO and PSO allows to obtain solutions at a significantly shorter time interval and is characterized by an increased resistance to convergence results when modeling MicroGrid with sources of distributed generation.

**Keywords:** *micro energy system, MicroGrid, distributed energy sources, methods of multi-criteria optimization.*