

ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

УДК 519.2:620.98+621.31

В.О. Костюк, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.
Інститут загальної енергетики НАН України
Т.М. Базюк, асист.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПРИКЛАДНІ ЗАДАЧІ ЗАСТОСУВАННЯ ГІБРИДНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАЛЬНИХ СИСТЕМ З ВЛАСНОЮ ГЕНЕРАЦІЄЮ

Проаналізовано принципи побудови та можливості використання для подальших аналітичних досліджень сучасних програмно-інформаційних засобів пошуку субоптимальних структурно-параметричних рішень електропостачальних систем шляхом розв'язання багатокритеріальних оптимізаційних задач на основі спеціальних алгоритмів еволюційного типу. Представлено результати моделювання автономізованої комбінованої установки субоптимальної структури, сконструйованої з використанням промислових компонентів, що забезпечують перетворення та утилізацію енергії вітру й Сонця, а також організацію збуту та організацію збуту надлишків виробленої електроенергії в електромережу.

Ключові слова: електропостачання, багатокритеріальна оптимізаційна задача, генетичні алгоритми, приведена вартість проекту, собівартість електроенергії, еквівалентний обсяг викидів.

Вступ. З огляду на проблему енергетичної безпеки країни та окремих її регіонів, особливої ваги набувають питання інтеграції джерел децентралізованого електропостачання до (традиційної) електроенергетичної системи централізованого електропостачання. Погляди науковців та фахівців енергетичної галузі щодо вжитку лексичних термінів для позначення джерел «розподіленої» та/або «розосередженої» генерації різняться [1]. Системи електропостачання локальних господарських об'єктів, побудовані на основі комбінованих енергетичних установок, що розглядаються у цій статті, слід віднести до засобів децентралізованого електропостачання.

Метою цієї статті є продемонструвати результати ефективного застосування сучасних інструментальних програмних засобів для розв'язування прикладних задач – пошуку раціональних проектних рішень енергопостачальних систем з використанням декількох технологій на основі енергії відновлюваних джерел та накопичувачів енергії, та інтерпретувати результати техніко-економічних показників. Слід також висвітлити перспективи експлуатації подібних засобів за умов господарювання в Україні й оцінити доцільність спрямування зусиль на розроблення власних засобів для підтримки розвитку електроенергетичного сектору на основі нових технологій електрогенерування.

Матеріал і результати досліджень. Проблемі визначення раціональних компоновальних рішень гібридних систем енергопостачання, із застосуванням технологій нових та відновлюваних джерел енергії (НВДЕ) й можливістю підключення до розподільної мережі як до резервного джерела, присвячена значна кількість праць протягом останніх двох десятиріч [2-8]. Виокремились і розвиваються три основні теоретичні платформи, ґрунтуючись на яких ведеться пошук оптимальних конфігурацій комбінованих енергоустановок (КЕУ): метод найменших квадратів, ймовірності втрати енергопостачання – метод *LPSP* (loss of power supply probability) і метод компромісних рішень (“trade-off” method) [7, 8]. Зокрема, оптимізаційні задачі включають обмеження показників, що характеризують надійність, у вигляді: а) обмеження ймовірності аварії КЕУ (*LOLP* – loss of load probability) – сукупний середній час аварійного простою по відношенню до експлуатаційного інтервалу (одного року); б) обмеження ймовірності недостатнього рівня потужності генерації (*LPSP*) – коли КЕУ не в змозі задовольнити сукупний поточний попит споживачів; й нарешті, – в) відносного значення «незабезпеченого» попиту/споживання (*UL* – unmet load) як частка загального обсягу споживання протягом експлуатаційного періоду (зазвичай одного року).

В роботі [3] здійснена спроба описати процедуру пошуку оптимального розв'язку багатокритеріальної задачі керування комплексною системою електропостачання шляхом поєднання ідей Р. Беллмана і Л. Заде та методів нелокального пошуку. Цей підхід, на думку авторів, забезпечує належність отриманого

розв'язку області компромісів, відтак, мовляв, можна уникнути пошуку єдиного розв'язку по Парето. Втім, за умов дії фактору невизначеності, розв'язання прикладних технічних задач на практиці є надто громіздким.

Приклади функційних схем простої КЕУ наведено в роботі [4]. Відповідно, гібридні електропостачальні системи на основі КЕУ можуть працювати як автономні, а також бути спроектовані з виконанням специфічних вимог підключення до електромережі (ЕМ) з метою отримання власником вигоди від збуту електроенергії за спеціальним тарифом.

Методологічними особливостями оцінювання показників, котрі обираються у якості критеріїв для постановки задачі багатокритеріальної оптимізації комбінованих систем, є відмінний від традиційного порядок визначення середньозваженої ціни виробництва *LEC* (Levelised Energy Cost) і обсягу викидів у вигляді CO₂-еквіваленту за період життєвого циклу – *LCE* (Life Cycle Emissions). Зокрема, *LEC* розраховують не як співвідношення сукупних приведених витрат до обсягу виробленої енергії у кВт год, а до обсягу спожитої електроенергії: адже певна частка виробленої енергії в таких системах втрачається, наприклад у години нульового навантаження (споживання відсутнє). В такому випадку виробництво електроенергії, наприклад, вітровим електрогенератором, продовжується, хоча резервний накопичувач є повністю зарядженим, і така "надлишкова" енергія просто втрачається. Деякі додаткові втрати енергії пов'язані з процесами заряду/розряду АБ.

Обсяг викидів *LCE* (кг CO₂/кВт год) розраховують як еквівалентний обсяг викидів від виробництва енергії, витраченої на виготовлення, транспортування і утилізацію компонентів гібридної ЕПС. Також цей обсяг враховує реальні викиди, пов'язані з функціонуванням привідного двигуна внутрішнього згоряння резервного електричного генератора (ЕГ) у складі гібридної ЕПС – безпосередні викиди цього двигуна та пов'язані з виробництвом і транспортуванням палива для нього. Так само питомий показник відносять до спожитого обсягу енергії, кВт год.

Автори [10] розробили інструментальні засоби проектування оптимальної гібридної ЕПС з використанням ідей МОЕА (спрощена назва – генетичні алгоритми, GA [11]), за допомогою яких можуть бути отримані оптимальні, або дуже близькі до оптимальних технічні рішення – із застосуванням використанням компонентів відомих світових чи національних виробників електротехнічного обладнання. Числові значення техніко-економічних параметрів та експлуатаційних характеристик цих компонентів вміщено до бази даних. При цьому чисельні результати моделювання проаналізовані шляхом співставлення ефективності GA порівняно з результатами використання звичайного перебору варіантів – тобто отриманих шляхом оцінювання всіх можливих/прийнятних проектних рішень.

Для формулювання багатокритеріальної оптимізаційної задачі (БОЗ) традиційно може бути використана її класична постановка в контексті техніко-економічної проблеми за принципом оптимуму по Парето. БОЗ можна сформулювати таким чином.

Необхідно знайти мінімальні або максимальні значення вектора функцій

$$F(X) = [f_1(X), f_2(X), \dots, f_i(X), \dots, f_k(X)], \quad i = \overline{1, k}, \quad (1)$$

за умови виконання m обмежень-нерівностей і p обмежень-рівностей:

$$\begin{cases} g_j(X) \geq 0, & j = \overline{1, m} \\ h_j(X) \geq 0, & j = \overline{1, p} \end{cases}, \quad (2)$$

У записі (1) величина $f_i(X)$ – є частковим значенням скалярної функції, аргументом якої є вектор $X \in \Omega$, елементами котрого є шукані змінні (набори їх альтернативних значень визначають множину Ω можливих часткових розв'язків БОЗ).

Концепцію оптимальності по Парето покладено в основу більшості алгоритмів типу МОЕА (Multi-Objective Evolutionary Algorithm) [9]. Принципи домінування, оптимальності по Парето, а також поняття оптимальної множини і фронту Парето нижче визначено так, як це подано в роботах [11 – 12].

Домінування по Парето визначають наступним чином. Вектор $u = (u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_k)$, домінує над вектором $v = (v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_k)$ тоді і лише тоді, коли $\forall i = \overline{1, k}$, u є частково меншим за v , тобто:

$u_i \leq v_i \wedge \exists i = \overline{1, k} : u_i < v_i$, що скорочено записують: $u \preceq v$ і вектор v називають домінованим.

Оптимальність по Парето встановлюють у такий спосіб: розв'язок $X \in \Omega$ є оптимальним за Парето, тоді й лише тоді, коли не існує такого $X' \in \Omega$, для якого може бути знайдено домінуючий розв'язок v такий, що

$$v = F(X') = [f_1(X'), f_2(X'), \dots, f_i(X'), \dots, f_k(X')] \preceq u = F(X). \quad (3)$$

Оптимальні розв'язки утворюють оптимальну множину Парето. Для цільової функції $F(X)$ сформульованої БОЗ множина оптимальних розв'язків P^* визначається шляхом перевірки на відсутність у ній домінуючих альтернатив:

$$P^* := \{X' \in \Omega \mid \neg \exists X'' \in \Omega : F(X'') \prec F(X')\}, \quad (4)$$

тобто, не існує таких $X'' \in \Omega$, щоб вектор цільової функції $F(X'')$ був домінуючим.

Фронт Парето визначено наступним чином. Для цільової функції $F(X)$ сформульованої БОЗ і оптимальної множини P^* фронт Парето є множиною *недомінованих* розв'язків:

$$PF^* := \{u = F(X) = [f_1(X), f_2(X), \dots, f_i(X), \dots, f_k(X)] \mid X \in P^*\} \quad (5)$$

Інтерпретацію наведених визначень можна подати графічно [11], як це зображено на рис. 1 в площині значень для двох критеріїв оптимальності F_1 і F_2 . Розв'язки, позначені a, b, c, d, e і f є недомінованими розв'язками по Парето, оскільки жоден із них не забезпечує менші значення F_1 і F_2 . Значення критеріїв для недомінованих розв'язків розташовуються на лінії «фронт Парето». Відтак розв'язки «1», «2», «3» і «4» є домінованими. Наприклад, розв'язки «b» і «c» домінують над розв'язком «1», оскільки обидва характеризуються нижчими значеннями F_1 і F_2 . У свою чергу «b», «c», «d», «1» і «2» домінують над «4» і т.д.

Оптимізаційний процес завершується, коли виконано оцінювання останнього покоління за схемою багатокритеріального алгоритму еволюційного типу МОЕА і недоміновані рішення, котрі формують фронт Парето, найкраще відповідають двом критеріям F_1 і F_2 , такий фронт іноді називають «найкращим фронтом Парето»: наступні із кращих розв'язків будуть доміновані, відповідно, одним, двома й т.д. розв'язками (альтернативними наборами значень змінних БОЗ).

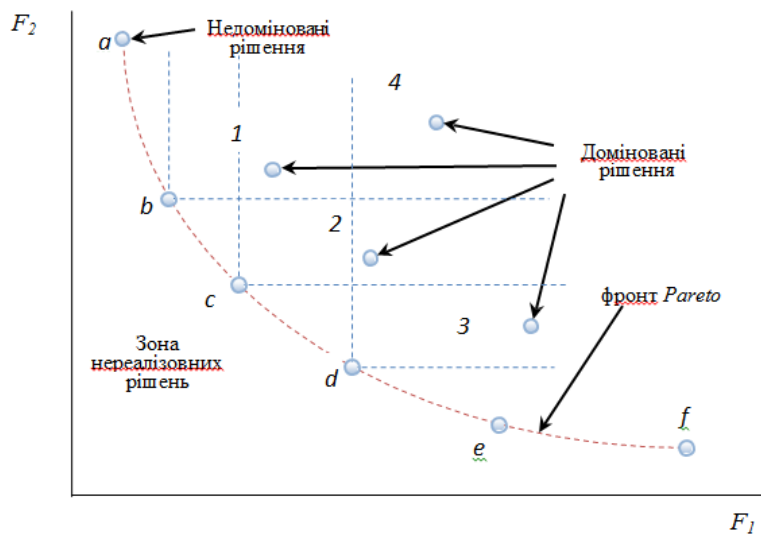


Рисунок 1 – Графічна інтерпретація множини недомінованих розв'язків БОЗ (фронт Парето) у площині двох критеріїв: пошук компромісних мінімальних значень

В роботах [12, 13] на основі алгоритмізації за схемою МОЕА представлено модель багатокритеріальної оптимізації за трьома критеріями: мінімуму приведеної вартості, мінімуму викидів CO_2 і UL (мінімуму незадоволеного попиту) для гібридних ЕПС, що містять накопичувачі у вигляді АБ та/або резервуару для зберігання газоподібного водню.

Практична реалізація алгоритму розрахункової моделі виконана на основі модифікованих алгоритмів SPEA (Strength Pareto Evolutionary Algorithm) і SPEA2 [14]. Програмні модулі написані на алгоритмічній мові C++ [15]. Програмно-інформаційний комплекс (ПК) iNOGA реалізує обчислення за двома взаємно пов'язаними алгоритмами: *основним* і *вторинним*.

Алгоритмізація БОЗ за схемою МОЕА. Стислий опис функціонування алгоритмів розглянемо на основі структурної схеми гібридної ЕПС, представленої на рис. 2, оптимальні проектні рішення якої знаходять шляхом розв'язання БОЗ. Гібридна система може включати джерела електрогенерування будь-

якого типу, пристрої для заряджання АБ, інверторне обладнання, паливні елементи (ПЕ), резервуар для зберігання водню, електролізер. Втім, проєктована гібридна ЕПС може містити обмежене число компонентів з представлених на рис. 2.

Для розрахунків відповідно до обраної стратегії управління беруться погодинні значення змінних, котрі вважаються незмінними протягом годинних інтервалів.

Для кожного годинного інтервалу, протягом якого джерела ВДЕ (фотоелектричні панелі, вітро- або гідро-агрегати) виробляють обсяг енергії, що перевищує обсяг попиту/споживання, надлишкова потужність P_{charge} може бути використана для заряду АБ або виробництва водню в електролізері. Цей процес назвемо ЗАРЯД. Значення потужності P_{charge} дорівнює значенню надлишкової енергії постійного струму (DC), виробленої протягом одного годинного інтервалу. Фактично, ця енергія є сумою надлишкових енергій джерел постійного струму і перетвореної енергії джерел змінного струму (AC) з урахуванням ККД інвертора. Рішення щодо того, як використати надлишкову енергію постійного струму – на заряд АБ чи на роботу електролізера, визначається в процесі роботи вторинного алгоритму.

Натомість, у разі якщо джерела ВДЕ не забезпечують сукупного попиту, потужність $P_{discharge}$, якої не вистачає (покриття дефіциту), має компенсувати енергія накопичена в АБ, резервним електричним генератором ЕГ або паливним елементом ПЕ. Такий процес назвемо РОЗРЯД. Для процесу заряду слід визначити вартість виробництва енергії для покриття дефіциту цими елементами. Оптимальна система має виробляти енергію дефіциту найдешевшою.

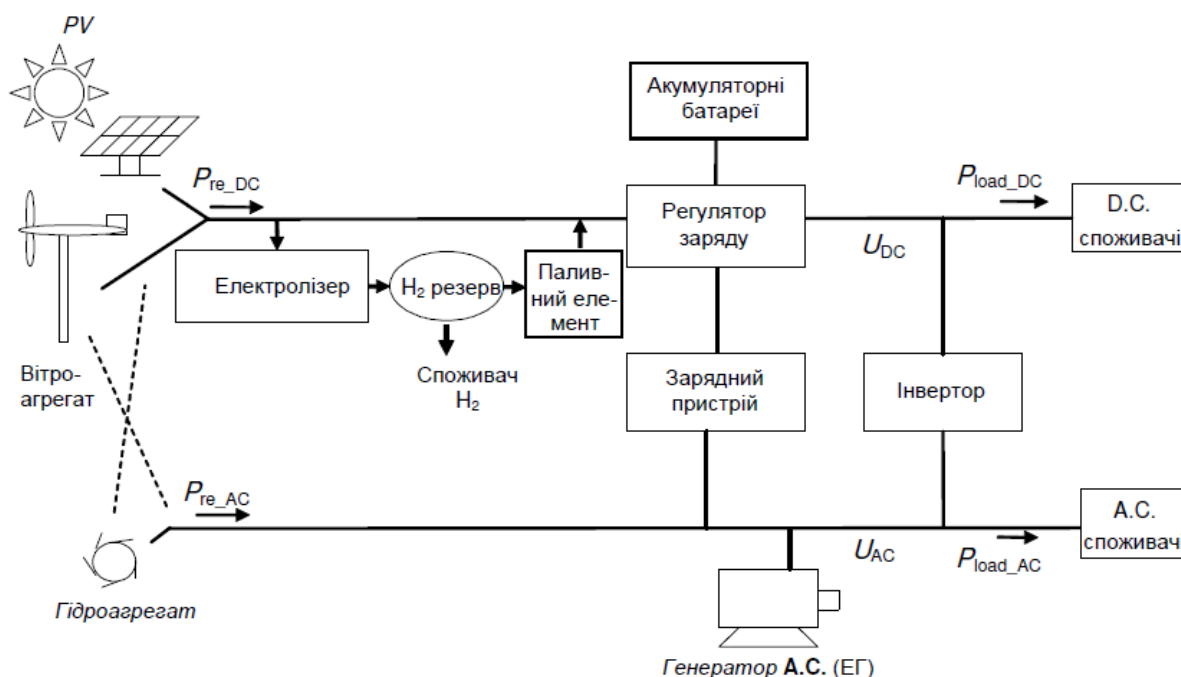


Рисунок 2 – Структура гібридної електропостачальної системи

Блок-схему алгоритму пошуку субоптимальних рішень для ЕПС на основі КЕУ зображено на рис. 3. Модель дозволяє налаштувати пошук таких компромісних рішень через обрання режиму мінімізації трьох згаданих вище критеріїв одночасно.

Основний алгоритм забезпечує оптимальний вибір компонентів гібридної ЕПС із будь-яким набором генеруючих модулів: ВЕУ, СФЕУ, АБ та накопичувальних резервуарів для газоподібного водню, резервних джерел змінного струму (працюють з використанням різних видів первинних енергоносіїв), мікро-ГЕС а також паливних елементів з електролізером. Вектор цілочисельних параметрів БОЗ у вигляді випадкових чисел є вхідним набором даних для роботи основного алгоритму. Цей алгоритм здійснює кодифікацію змінних через вектор 11 цілочисельних параметрів (значення є цілими числами, див. табл. 1). Вторинний (залежний, додатковий) алгоритм забезпечує формування найдешевшої прийнятної стратегії керування у вигляді набору розв'язків керуючих змінних для будь-якої конфігурації гібридної ЕПС, отриманої на етапі застосування основного алгоритму. Для цього оптимальні значення 12 змінних керування розраховуються одночасно за допомогою вторинного алгоритму.

Таблиця 1 – Параметри і змінні керування за багатокритеріальним алгоритмом пошуку субоптимальної конфігурації КЕУ

Основний алгоритм: вектор цілочисельних параметрів	Вторинний алгоритм: обчислення значень змінних керування
<p>a – номер PV-панелей, увімкнутих паралельно, b – тип PV-панелей, c – число вітротурбін/вітроагрегатів, d – тип вітротурбіни, e – тип гідротурбіни, f – число АБ, увімкнутих паралельно, g – тип акумуляторної батареї, h – тип електрогенератора ЕГ, i – тип паливного елемента, j – тип електролізера, k – тип інвертора.</p> <p>Через вектор параметрів виконується «кодіфікація» значень змінних для кожної технічно здійсненої конфігурації (набору складових компонентів) КЕУ</p> <p>Число векторів основного алгоритму – N_m</p>	<p>Резервний електричний генератор (ЕГ): $P_{min_gen}, P_{critical_gen}$, Акумуляторна батарея (АБ) : $SOC_{min}, SOC_{stp_gen}, SOC_{stp_FC}$, Паливний елемент (ПЕ) : $P_{min_FC}, P_{critical_FC}, H2TANK_{stp}$,</p> <p>Режимне керування потоками енергії за вартісними показниками енергії заряду-розряду $P_{lim_charge}, P1_{gen}, P1_{FC}, i P2$.</p>  <p>Число векторів вторинного алгоритму – N_{sec}</p>

Вихідними даними для ПІК iNOGA є очікувані (бажані) графіки електричних навантажень для локального об'єкта/вузла ЕПС по місяцях року і вибір альтернатив щодо використання резервних накопичувачів. У комбінації з характеристиками попиту задаються параметри збуту надлишків виробленої енергії, що визначають економічну взаємодію з зовнішньою електричною розподільною мережею. Зокрема, є можливість обрати режим збуту надлишку виробленої електроенергії до мережі з урахуванням темпу інфляції протягом життєвого циклу, надлишку молекулярного водню до зовнішнього накопичувача за результатом господарювання протягом року – за встановленою (рекомендованою) ціною. В середовищі ПІК можливо організувати однокритеріальну та багатоцільову оптимізаційну процедуру з використанням обумовленого специфікою поставленої задачі набору обмежень вхідних параметрів та витрат часу.

За замовчуванням виконується програма однокритеріальної оптимізації, за яким система пропонує найбільш економічне рішення з урахуванням тривалості життєвого циклу у термінах сукупних приведених витрат NPC. У випадку багатоцільової оптимізації дослідник може обрати два, три або п'ять критеріїв, включно соціального спрямування: Human Development Index (HDI) і створення робочих місць (Jobs Creation, JC). Вікно керування режимом багатокритеріальної оптимізації має опцію вибору параметра «Відобразити тільки недоміновані варіанти рішень» (“Display Non dominated only”).

Для керування КЕУ [13] можливо обрати дві основні стратегії: **I** – відстеження попиту/навантаження (Load Following) і **II** – циклічний заряд. За стратегією **I** енергія АБ використовується у разі недостатнього обсягу електрогенування. У разі недостатньої ємності АБ дефіцит покриває резервний генератор (Генератор А.С. (ЕГ) на рис. 2). Стратегія **II** відрізняється в цьому останньому кроці тим, що ЕГ працює на максимальній потужності, забезпечуючи заряд АБ з вибором опції по часу: можливо заряджати АБ протягом однієї поточної години або до стану зарядженості АБ, наприклад, 95% повної ємності. З обранням стратегії керування слід обрати оптимізаційні змінні із переліку в таблиці 1 (див. рис. 3). Розрахункові значення необраних змінних встановлюються фіксованими (Fix Variables), такими, що відповідають найкращому конфігураційному варіанту конструкції за комбінацією усіх технічних параметрів системи.

Результати цифрового моделювання з використанням інструментів програмного комплексу iNOGA. Розробник надає можливості користування інструментами програмно-інформаційного комплексу (ПІК) iNOGA [10] для виконання тестових розрахунків з використанням версії з обмеженими функційними можливостями.

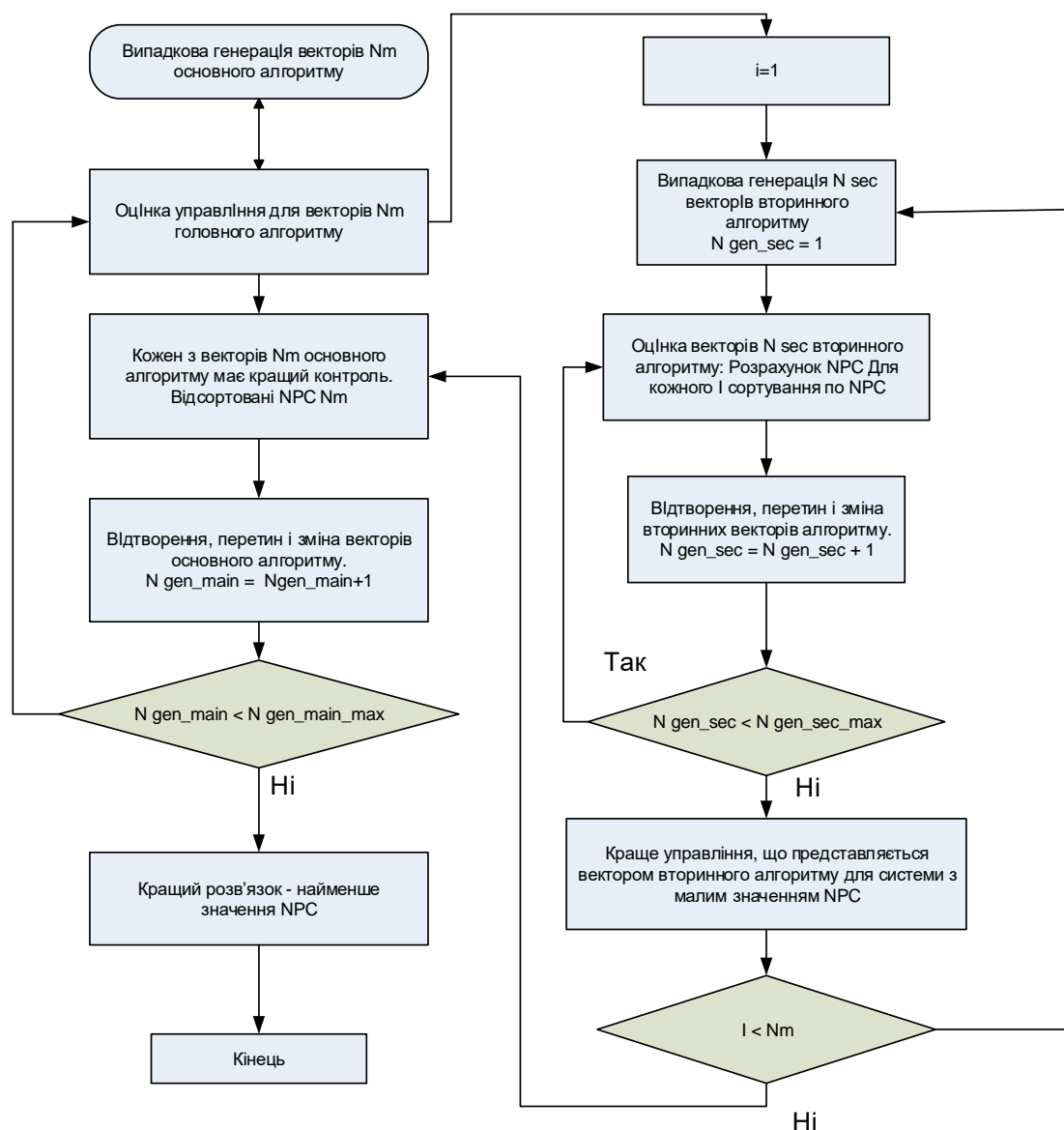


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритму MOEA ПІК iNOGA

З допомогою ПІК виконано тестовий пошук субоптимальної структури ЕПС для типового домогосподарства (приватної садиби), розташованої у межах міста Києва за двома критеріями: мінімуму приведеної вартості NPC (вартісний) та еквівалентного обсягу викидів LCE (екологічний).

Варіант вибору оптимізаційних змінних, які можуть бути обрані у разі визначення стратегії II для обраного конфігураційного варіанту (без паливних елементів і електролізера) наведено у таблиці 1. Прогнозні фінансово-економічні дані, взяті за основу для тестування моделі засобами ПІК iNOGA відображені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Фінансові прогнозні дані для моделювання

Номінальне значення дисконту, %	15,0	Розрахунковий термін експлуатації, років	25,0
Прогнозний середній показник інфляції, %	7,0	Частка кредитних коштів, %	50,0
Вартість монтажу, €	400,0	Відсоткова кредитна ставка, %	9,0
Поточні витрати, % від кап. вартості/рік	2,0	Термін виплати кредиту, років	5,0

Для обрання обладнання вітроелектричного агрегату інструментальні засоби ПІК iHOGA забезпечують уведення статистичних даних щодо вітрового потенціалу, виміряного в околиці місця розташування об'єкта електропостачання (рис. 4).

З метою організації розрахункового експерименту використані дані типового графіка електричних навантажень електроприймачів об'єкта (приватної садиби) із річним обсягом споживання, що не перевищує 4000 кВт·год/рік. Для застосування умов збуту надлишку виробленої електроенергії за пільговими «зеленими» тарифами згідно з вимогами українського законодавства, проектну середню ціну тарифу визначено на рівні 0,12 Євро/кВт·год з одночасною можливістю закупівлі дефіциту електроенергії з ЕМ на договірних умовах за тарифом 0,05 Євро/кВт·год.

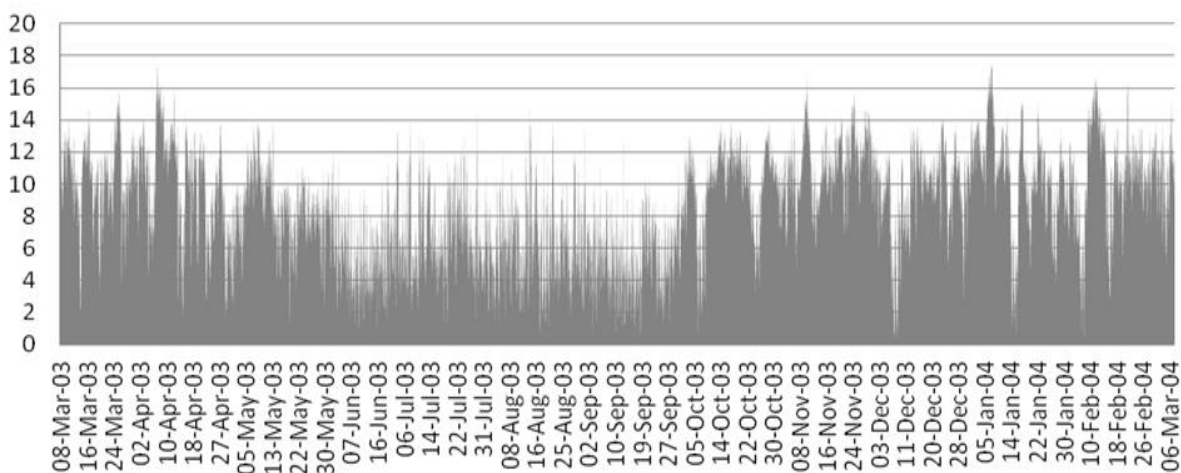


Рисунок 4 – Статистичні дані щодо швидкості вітру в географічній точці розміщення локальної ЕПС (період 08.03.2003 – 07.03.2004р.): 8760 середньогодинних значень швидкості вітру

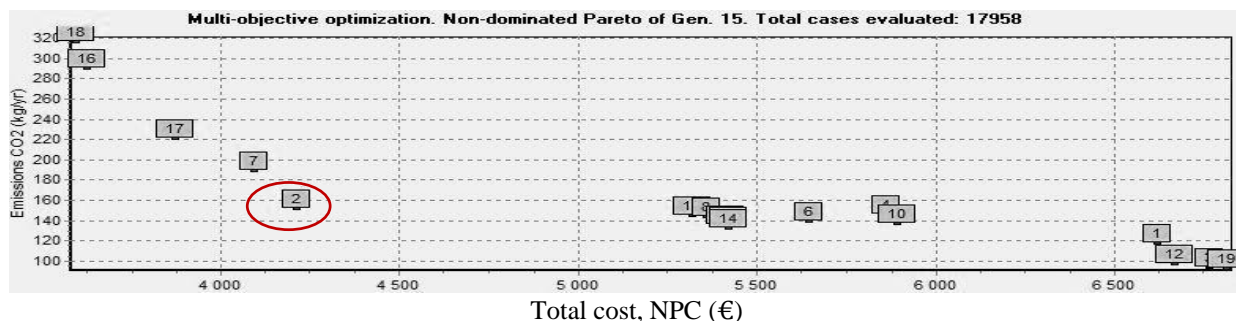


Рисунок 5 – Множина розв'язків БОЗ (фронт Парето), отримана в результаті пошуку конфігурацій КЕУ засобами ПІК iHOGA для географічних координат м. Києва

Щоб забезпечити реалізацію комерційних інтересів власника садиби, оснащеної КЕУ, максимальне проектне значення незадоволеного попиту встановлено на рівні 5%, тобто ~200 кВт·год/рік. У такому разі стимулюючий у вигляді привабливого збутового (зеленого) тарифу забезпечує підвищений обсяг генерування від ВДЕ, знижуючи в такий спосіб приведену вартість проекту КЕУ.

На рис. 6 наведено розрахункові дані для конфігураційного варіанту – розв'язку БОЗ, що входить до множини субоптимальних за Парето; у площині двох обраних критеріїв варіант зображено на рис. 5 номером «2» (другий із кращих недомінованих розв'язків, рекомендованих алгоритмом ранжування розв'язків моделі, що його виконує ПІК iHOGA). Основний обсяг генерування забезпечується вітроагрегатом ВЕУ, причому значна частина цієї енергії є надлишковою і із-зі технічних обмежень (пропускна здатність інверторного обладнання) не може бути передана до електричної мережі; водночас значний обсяг збуту забезпечує зниження собівартості виробленої електроенергії проектної КЕУ до рівня 0,05 Євро/кВт·год – до рівня централізованого тарифу.

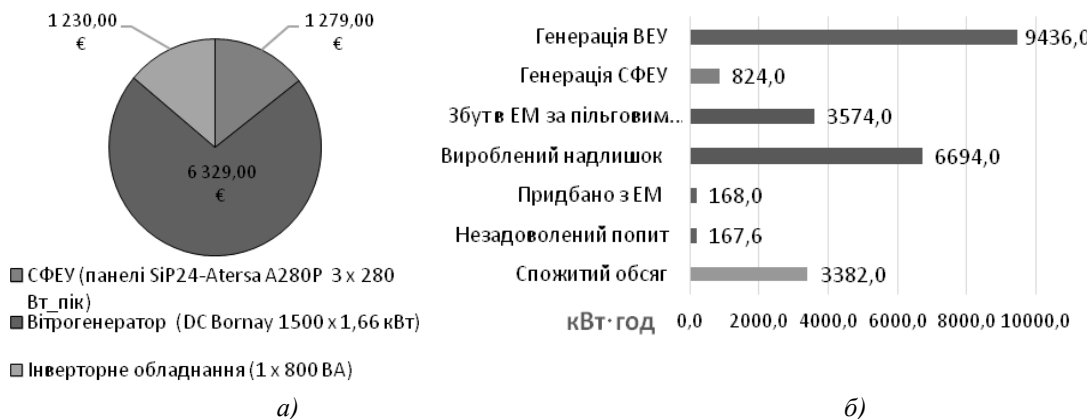


Рисунок 6 – Модельні розрахункові дані: а) капітальні витрати на облаштування КЕУ за проектом субоптимальної структури, позначеної «2» на лінії фронту Парето (рис. 5); б) – річний розрахунковий баланс КЕУ, в кВт год/рік

У разі високих вимог щодо безперервності електропостачання протягом розрахункового періоду (року), показник незадоволеного попиту споживання слід обмежити до рівня 0,5 – 1% (до 40 кВт год/рік), у зв'язку з чим система пропонує дорожчі конфігураційні варіанти. Зазвичай у таких випадках до складу КЕУ входить резервний накопичувач – акумуляторна батарея. Початкова вартість та експлуатаційні витрати на утримання такої системи в робочому стані зростають, відтак вищою є приведена собівартість виробленої електроенергії. Наприклад, субоптимальний розв'язок моделі з конфігурацією за номером «1» на рис.6 забезпечує незадоволений попит споживання на рівні 1,01% завдяки наявності у системі 10-и акумуляторних батарей типу Sonnenschien 27G5 (12В x 23,5 А год) та однієї додаткової фотоелектричної панелі А280Р у складі СФЕУ; загальна ємність АБ становить 2,8 кВт год_{емн.}. Розрахункові значення фінансово-економічних показників обох варіантів відображені у таблиці 3 для співставлення, а на рис. 7 зображено криві кумулятивного дисконтованого грошового потоку, у тис. Євро.

Таблиця 3 – Співставні фінансово-економічні показники за варіантами-розв'язками БОЗ: приведені видатки та доходи від господарської діяльності об'єкта електропостачання

Співставні фінансово-економічні показники	Варіант 2	Варіант 1
Початковий обсяг інвестицій (кап.вартість), €	7109	9125
Кредитні зобов'язання, €	3554,5	4562,5
Сума щорічних виплат за кредитом, €	913,8	1173,0
Приведені витрати на е/енергію, куплену з електромережі (від постачальника), €	202,2	41,3
Надходження від збуту е/енергії, €	4770	4943
Ефективна приведена вартість проекту, €	4212	6617
Співставна приведена вартість за проектом постачання 100% обсягу е/енергії з розподільної мережі протягом розрахункового терміну експлуатації (25 років), €	5476	5476
Приведена нормована собівартість, €/кВт·год	0,05	0,08

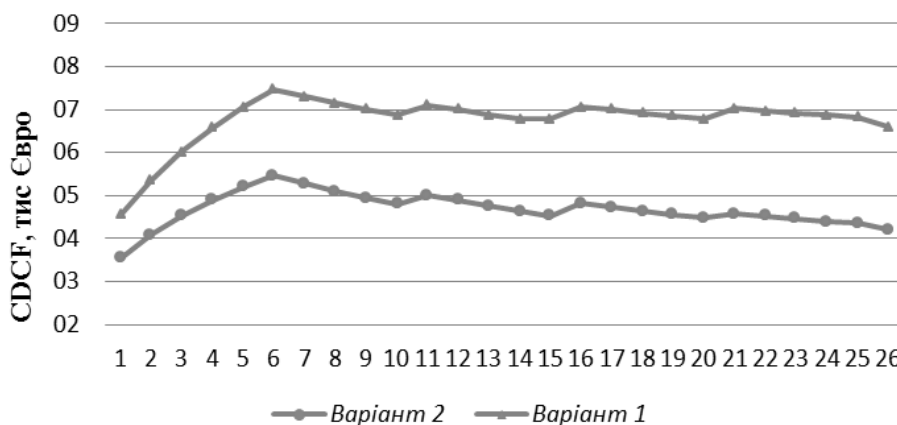


Рисунок 7 – Кумулятивний дисконтований грошовий потік за варіантами розв'язків БОЗ, тис. €

Висновки. Методологія побудови гібридної моделі на основі модифікованих генетичних алгоритмів МОЕА (SPEA і SPEA2 [14,15]) дійсно забезпечує якісні варіантні розв'язки складного багатокомпонентного об'єкта, яким є сучасна комбінована система енергопостачання (КЕУ) з використанням електрогенерації на основі технологій ВДЕ. Програмно-інформаційні комплекси відіграють важливе прикладне значення на етапі ескізного проектування сучасних КЕУ, допомагають інтерпретувати розв'язки складних систем з урахуванням стратегій керування. Основним спрямуванням таких програмних інструментів є сприяння розвитку електротехнічного матеріального виробництва, просування продукції національних виробників, обладнання придатного для конструювання й упровадження об'єктів малої енергетики в умовах реального конкурентного ринку та з урахуванням норм чинного законодавства у сфері електроенергетики.

Список використаної літератури

1. Стогній Б.С. Еволюція інтелектуальних електричних мереж та їхні перспективи в Україні /Стогній Б.С., Кириленко О.В., Праховник А.В., Денисюк С.П. // Техн. електродинаміка. –2012. –№5. – С.52–67.
2. Костюк В.О. Техніко-економічні оцінки виробництва електроенергії фотоелектричними станціями і проблема валоризації відновлюваних джерел енергії в Україні / Костюк В.О., Шульженко С.В., Охріменко І.А. // Техн. електродинаміка. – 2014. –№5. – С.59–61.
3. Попов В.А. Алгоритм многокритериального управления режимами работы микросетей / В.А. Попов, Е.С. Ярмолюк, П.А. Замковой // Восточно-европейский журнал передовых технологий / Наук. журнал. – Харків, 2014. – № 2/2 (68). – С. 61–68.
4. Мхитарян Н.М. Комплексное использование энергии возобновляемых источников /Мхитарян Н.М., Кудря С.О., Яценко Л.В. та ін. // Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – №17. – С.15-22.
5. Ashok S. Optimized model for community based hybrid energy system /Renewable Energy. – Elsevier, 2007. – No32. – P. 1155-1164.
6. Prabhakant, Basant A., Tiwari G. Return on Capital and Earned Carbon Credit by Hybrid Solar and Wind Turbine Generators // Гелиотехника. Международный научный журнал. – Ташкент: 2010, №1. – P. 5-49.
7. Jamil M. Techno-Economic Feasibility Analysis of Solar Photovoltaic Power Generation: A Review / M.Jamil, Sh. Kirmani, M. Rizwan// Smart Grid and Renewable Energy. – 2012, No.3, P.266-274.
8. Bernal-Agustin J.L. Dufo-Lopez R. Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems 2009 //Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2009. –V.13, P. 2111–2118.
9. Zitzler E, Thiele L. Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength Pareto approach. IEEE Transactions on Evolutionary Computation. – 1999. – No.3(4). P.257-271.
10. HOGA (Hybrid Optimization by Genetic Algorithms). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.unizar.es/rdufo/hoga-eng.htm>
11. Гладков Л.А. Генетические алгоритмы. Учебное пособие / Л.А. Гладков, В.В. Курейчик, В.М. Курейчик; под. В.М. Курейчика. 2-е изд. испр. доп. – М.: Физматлит, 2006.– 320 с.
12. Dufo-López R., Bernal-Agustín JL. Multi-objective design of PV-wind-diesel-hydrogen-battery systems // Renewable Energy. – 2008, Volume 33, Issue 12. – Pp. 2559-2572.
13. Dufo-Lopez R, Bernal-Agustín JL, Contreras J. Optimization of control strategies for stand-alone renewable energy systems with hydrogen storage // Renewable Energy 2007. – No.32(7). – P.1102–1126.
14. Bäck T. Et al. Evolutionary Computation 1: Basic Algorithms and Operators / Bäck T, Fogel DB, Michalewicz Z // Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 2000.
15. Dufo-Lopez R., Bernal-Agustin J.L. et al. Multi-objective optimization minimizing cost and life cycle emissions of stand-alone PV-wind-diesel systems with batteries storage // Elsevier: Applied Energy 88. –2011. – P.4033-4041. DOI:10.1016/j.apenergy.2011.04.019.

V. Kostiuk

Institute of General Energy National Academy of Sciences of Ukraine

T. Baziuk

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

APPLIED PROBLEMS OF HYBRID MODELING APPLICATIONS TO OPTIMIZE THE LOCAL ELECTRICITY SUPPLY SYSTEMS EQUIPPED WITH OWN GENERATING FACILITIES

The principles of modern software tools applicable for suboptimal electricity supply systems' structural and parametric multi-objective design are considered, namely, the advantageous features of the ones based on evolutionary algorithms and its effective use for further analytical studies. The modeling results of isolated combined power-supply unit suboptimal design, providing conversion and utilization of wind and solar energy flows have been presented. The system considered is capable to supply an excessively produced electricity to the grid.

Keywords: electricity supply, multi-objective design problem, genetic algorithms, project net present value, levelized energy cost, emission value equivalent.

References

1. Stogniy B.S., Kyrylenko O.V., Prakhovnik A.V. & Denysiuk S.P. (2012) Evoliutsia intelektual'nykh elektrychnykh mrezh ta jichni perspektyvy v Ukraini [The evolution of Smart Grids and their prospects in Ukraine]. *Tekhnichna Elektrodynamika – Technical Electrodynamics*, No 5, Pp. 52–67, [in Ukrainian].
2. V.Kostiuk, S.Shulzhenko & I.Okhrimenko. (2014) Tekhniko-ekonomichni ocinky vyrobnyctva elektroenerghii fotoelektrychnymy stantsiyamy I problema valoryzatsii vidnovliuvanykh dzherel energii v Ukraini [Feasibility assessment of photovoltaic electricity generation plant and valorization problem of renewable energy sources in Ukraine]. *Tekhnichna Elektrodynamika – Technical Electrodynamics*, No 5, Pp.59–61, [in Ukrainian].
3. V.A. Popov, E.S. Yarmoliuk & P.A. Zamkovej (2014). Algoritm mnogokriterialnogo upravleniya rezhimami raboty microsetei [Algorithm of multi-objective control for microgrids operation] *Vostochno-Evropeiskij Zhurnal Peredovikh Tekhnologij – Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, № 2/2 (68), Pp. 61–68, [in Russian].
4. Mkhitaryan N.M. Kudrya S.O, Yatsenko L.V. etc. (2013). Kompleksnoe ispolzovanie energii vozobnovliaemikh istochnikov [Integrated use of renewable energy sources]. *Alternativnaya energetika i ekologiya – Alternative energy and ecology*, №17, Pp.15-22, [in Russian].
5. Ashok S. Optimized model for community based hybrid energy system /*Renewable Energy*. – Elsevier, 2007. – No32. – P. 1155-1164.
6. Prabhakant, Basant A., Tiwari G. Return on Capital and Earned Carbon Credit by Hybrid Solar and Wind Turbine Generators // *Geliotechnika. International scientific journal*. – Tashkent: 2010, №1. – P. 5-49.
7. Jamil M. Techno-Economic Feasibility Analysis of Solar Photovoltaic Power Generation: A Review / M.Jamil, Sh. Kirmani, M. Rizwan// *Smart Grid and Renewable Energy*. – 2012, No.3, P.266-274.
8. Bernal-Agustin J.L. Dufo-Lopez R. Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems 2009 //*Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2009. –V.13, P. 2111–2118.
9. Zitzler E, Thiele L. Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength Pareto approach. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. – 1999. – No.3(4). P.257-271.
10. HOGA (Hybrid Optimization by Genetic Algorithms). www.unizar.es – Retrieved from: <http://www.unizar.es/rdufo/hoga-eng.htm>[in English]
11. Gladkov L.A., Kyreichik V.V. & Kyreichik V.M. (2006) Geneticheskie algoritmy. Uchebnoe posobie [Genetic algorithms. Tutorial]. Moscow: Fizmatlit Publ. [in Russian].
12. Dufo-López R., Bernal-Agustín JL. Multi-objective design of PV–wind–diesel–hydrogen–battery systems // *Renewable Energy*. – 2008, Volume 33, Issue 12. – Pp. 2559-2572.
13. Dufo-Lopez R, Bernal-Agustín JL, Contreras J. Optimization of control strategies for stand-alone renewable energy systems with hydrogen storage // *Renewable Energy* 2007. – No.32(7). – P.1102–1126.
14. Bäck T. Et al. *Evolutionary Computation 1: Basic Algorithms and Operators* / Bäck T, Fogel DB, Michalewicz Z // Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 2000.
15. Dufo-Lopez R., Bernal-Agustin J.L. et al. Multi-objective optimization minimizing cost and life cycle emissions of stand-alone PV–wind–diesel systems with batteries storage // *Elsvier: Applied Energy* 88. –2011. – P.4033-4041. DOI:10.1016/j.apenergy.2011.04.019.

УДК 519.2:620.98+621.31

В.О. Костюк, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.
Институт общей энергетики НАН Украины
Т.Н. Базюк, асс.

**Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ ПРИМЕНЕНИЯ ГИБРИДНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ
ЛОКАЛЬНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С СОБСТВЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ**

Проанализированы принципы построения и возможности использования для дальнейших аналитических исследований современных программно-информационных средств поиска субоптимальных структурно-параметрических решений систем электроснабжения путем решения многокритериальных оптимизационных задач на основе специальных алгоритмов эволюционного типа. Представлены результаты моделирования автономизированной комбинированной установки субоптимальной структуры, сконструированной с использованием промышленных компонентов, обеспечивающих преобразование энергии ветра и Солнца, а также организацию сбыта излишков произведенной электроэнергии в электросеть.

Ключевые слова: электроснабжение, многокритериальная оптимизационная задача, генетические алгоритмы, приведенная стоимость проекта, себестоимость электроэнергии, эквивалентный объем выбросов.

Надійшла 20.05.2016

Received 20.05.2016