

ХОЛОДИЛЬНА ТЕХНІКА ТА ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ

УДК 697.4:620.9

Сучасний стан використання гібридних систем теплопостачання на основі відновлюваних джерел енергії

Д. М. Єрохін

Одеський національний технологічний університет, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна

✉ e-mail: erokhin-dima@ukr.net

ORCID: <http://orcid.org/0009-0001-7302-8245>

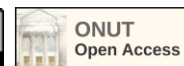
Розглядається наукова проблема оптимізації та підвищення функціональних можливостей гібридних систем теплопостачання на основі відновлюваних джерел енергії з урахуванням основних факторів, що стримують їх широке впровадження. Наголошується, що гібридні системи відновлюваної енергетики стикаються з кількома бар'єрами на шляху до впровадження, до яких належать технологічні, фінансові та операційні проблеми. Аналітичний огляд наукових праць довів, що гібридні енергетичні системи в перспективі дозволять підвищити техніко-економічні показники та надійність енергосистем, забезпечуючи маневрування потужністю для компенсації нестійкої електрогенерації від відновлювальних джерел енергії. Наведені цілі статті, які полягають в вивченні методів оптимізації для гібридних систем відновлюваної енергії з метою врахування продуктивності її компонентів та можливості досягнення мінімальних витрат; визначенні ключових задач оптимізації гібридної системи відновлюваної енергетики; дослідженні ефективності гібридних систем відновлюваної енергетики. Розглянуті алгоритми оптимізації гібридних систем відновлюваної енергії, якими є класичні алгоритми, метаевристичні методи та гібрид двох або більше методів оптимізації. Сформульовані ключові цілі оптимізації гібридної системи відновлюваної енергетики, які поділяються на економічні, технічні, стійкісні, екологічні та соціальні. На підставі аналітичного огляду наукової літератури проведено дослідження продуктивності гібридних систем відновлюваної енергетики. Враховується, що на продуктивність гібридних систем відновлюваної енергетики, які поєднують джерела енергії вітру, сонця та геотермальної енергії, впливають різні умови навколишнього середовища. Отримані результати підкреслюють важливість комплексного врахування ресурсів джерел відновлювальної енергетики під час проектування та оптимізації систем відновлюваної енергетики.

Ключові слова: Енергоефективність; Цілі оптимізації; Методи оптимізації; Гібридна енергетична система; Фактори навколишнього середовища.

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v62i2.3524>

© The Author(s) 2026. This article is an open access publication

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

1. Вступ

Наразі світ спостерігає перехід від існуючих традиційних джерел енергії до майбутнього з оптимізованими та інноваційними джерелами енергії. Сьогодні світ все більше орієнтується на використання відновлюваних джерел енергії для зменшення споживання традиційних джерел енергії,

зокрема палива. Крім того, використання відновлюваних джерел енергії зменшує вплив традиційної енергії на навколишнє середовище. З усіх цих причин науковці зараз зосереджуються на дослідженнях, що впроваджують інноваційні методи з метою оптимізації та підвищення ефективності існуючих відновлюваних джерел енергії. Серед запропонованих методів є гібридні системи. Гіб-

ридні системи теплопостачання – це перехідний етап до повністю відновлюваної енергетики. Вони поєднують економічність традиційних котлів та екологічність теплових насосів і відновлювальних джерел енергії. Ці системи застосовні як у житловому, так і в промисловому секторах. Однак гібридні системи можуть бути застосовані до відновлюваної енергії, вітрової енергії, паливних елементів, опріснення, опалення, вентиляції та кондиціонування повітря, двигунів, електромобілів, теплових насосів, сушіння, фотоелектричних елементів, двигунів, сонячних батарей та інших систем. Разом із тим, незважаючи на значний потенціал використання гібридних систем, їх практичне впровадження залишається обмеженим. Це пов'язано з низкою проблем, серед яких: недостатній рівень інтеграції різних джерел енергії в єдину систему, складність оптимального управління режимами роботи, відсутність достатньо ефективних методів проектування та моделювання таких систем, а також економічні та технічні бар'єри впровадження. Таким чином, наукова проблема полягає у необхідності комплексного дослідження сучасного стану використання гібридних систем теплопостачання на основі відновлюваних джерел енергії, визначенні їхніх функціональних можливостей, ефективності застосування та основних факторів, що стримують їх широкое впровадження, з метою обґрунтування напрямів подальшого розвитку та оптимізації таких систем.

Метою статті є вивчення методів оптимізації гібридних систем відновлюваної енергії, що дозволить при врахуванні продуктивності її компонентів досягати мінімальні витрати, визначення ключових цілей оптимізації гібридної системи відновлюваної енергетики та проведення дослідження продуктивності гібридних систем відновлюваної енергетики.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Традиційні енергетичні системи мають екологічні та економічні недоліки. Гібридні системи пропонують чистіші альтернативи генерації на основі викопного палива. Вони забезпечують більшу надійність порівняно з традиційними системами [1]. Оцінка продуктивності системи вимагає врахування факторів навколишнього середовища [2]. Ключові фактори включають швидкість вітру, сонячну радіацію та геотермальний тепловий по-

тік. Моделювання потоків енергії допомагає ефективно інтегрувати кілька підсистем. Оптимізація цих потоків гарантує, що виробництво енергії послідовно задовольняє попит [3]. Економічна та енергетична ефективність часто передбачають компроміси. Гібридні системи відновлюваної енергетики стикаються з кількома бар'єрами на шляху до впровадження. До них належать технологічні, фінансові та операційні проблеми. Подолання цих бар'єрів є важливим для ширшого впровадження системи. Алгоритми оптимізації покращують оцінку гібридних систем [4]. Ці алгоритми прогнозують продуктивність системи та оптимізують виробництво енергії.

Визначено, що попит на енергію зростає на 35% протягом 25 років [5]. Основними причинами зростання попиту на енергію є величезне зростання промислового навантаження та виснаження паливно-енергетичних ресурсів [6]. Принаймні 50% застосованої енергії витрачається на транспорт, виробництво електроенергії, заводи, житловий сектор та багато інших видів діяльності [7]. Для досягнення багатообіцяючих результатів необхідно докласти багато зусиль для розвитку технологій відновлюваної енергії та накопичення енергії [8]. Тим не менш, багато факторів вважаються проблемами. Вплив вихлопних газів на навколишнє середовище в енергетичних системах, високе споживання енергії та підвищені витрати є прикладами цих факторів [9]. Автономна гібридна система комбінованого енергопостачання з відновлюваними джерелами енергії представлена в роботі [10]. Підтверджено, що сезонна зміна енергетичного потенціалу вітрових та сонячних ресурсів може бути взаємно компенсована шляхом інтеграції двох різних за своєю природою ВДЕ в єдину систему та оптимізації їх генеруючих потужностей.

Гібридні енергетичні системи в перспективі дозволять підвищити техніко-економічні показники та надійність енергосистем, забезпечуючи маневрування потужністю для компенсації непостійної електрогенерації від відновлювальних джерел енергії [11]. Визначено [12] можливість повного покриття потреби в електроенергії підприємств за умови спільного використання біогазової установки та сонячних панелей на прикладі тваринницької ферми. Для оптимізації роботи та моделювання гібридних енергетичних систем використовують три поширені алгоритми: класичні алгоритми, метаевристичні алгоритми та гібридні алгоритми [13]. Методи оптимізації допомагають вирішити

складні проблеми. Під час оптимізації можна розглядати різні цілі. Максимізація ефективності системи та мінімізація витрат на її виробництво є прикладами таких цілей, головна мета яких – мати кращу продуктивність зі знизженими витратами. Цих цілей можна досягти за допомогою оптимального моделювання системи [14].

3. Алгоритми оптимізації гібридних систем відновлюваної енергії

Три поширені методи моделювання та оптимізації гібридних систем – це класичні алгоритми, метаевристичні методи та гібрид двох або більше методів оптимізації.

Класичні алгоритми оптимізації використовують диференціальне числення для знаходження оптимальних рішень для диференційованих та неперервних функцій. Класичні методи мають обмежені можливості для застосунків, цільові функції яких не є диференційованими та/або неперервними. Кілька традиційних методів оптимізації використовувалися для гібридних енергетичних систем. Модель лінійного програмування (LPM), динамічне програмування (DP) та нелінійне програмування (NLP) є прикладами класичних алгоритмів, що широко використовуються для оптимізації гібридних систем відновлюваної енергії (HRES). Модель лінійного програмування (LPM) вивчає випадки, коли цільова функція є лінійною, а простір проектних змінних задається лише лінійними рівностями та нерівностями. Ця модель використовувалася в кількох дослідженнях оптимізації HRES [15, 16]. Дослідження використовують можливості LPM для стохастичного виконання аналізу надійності та економіки. Модель нелінійного програмування (NLP) використовувалася в деяких дослідженнях [17]. Модель дозволяє вирішувати складні проблеми за допомогою простих операцій. Динамічне програмування (DP) вивчає випадки, коли стратегія оптимізації базується на розділенні проблеми на менші підзадачі. Цей метод допомагає вирішувати послідовні або багатоетапні проблеми, в яких етапи пов'язані між собою. Однією з переваг DP є здатність оптимізувати кожен етап. Таким чином, він може вирішувати складність більших систем. У [18] наведено приклад досліджень, які використовують DP для оптимізації HRES.

Метаевристичні методи – це клас оптимізаційних алгоритмів, що застосовуються для пошуку

близьких до оптимальних рішень у складних задачах із великою кількістю змінних, обмежень і нелінійних залежностей. У задачах моделювання та оптимізації гібридних систем теплопостачання на основі відновлюваних джерел енергії ці методи дозволяють ефективно визначати оптимальну конфігурацію системи, режими роботи обладнання та мінімізувати енергетичні витрати.

Гібридні методи оптимізації – це підхід, що передбачає поєднання двох або більше алгоритмів оптимізації з метою використання їхніх переваг і зменшення недоліків кожного окремого методу. Сутність гібридної оптимізації полягає в тому, що кожен алгоритм оптимізації має свої сильні та слабкі сторони. Наприклад, еволюційні алгоритми добре здійснюють глобальний пошук; локальні методи оптимізації ефективні для точного уточнення рішення. Оптимізація HRES – це не просто питання вибору компонентів; вона включає складний процес визначення оптимального розміру, конфігурації та операційної стратегії для балансування конкуруючих економічних, технічних, екологічних та соціальних цілей [19].

4. Ключові цілі оптимізації гібридної системи відновлюваної енергетики

Системи сталого розвитку відновлюваних джерел енергії [20], які інтегрують численні відновлювані джерела, такі як сонячна енергія, вітер та біомаса, з накопичувачами та традиційними резервними генераторами, пропонують перспективне рішення для зменшення переривчастості окремих відновлюваних джерел енергії та підвищення загальної надійності системи та економічної ефективності [21]. Однак складність HRES, що характеризується різноманітними компонентами, стохастичними джерелами енергії та багатограними операційними цілями, робить їх проектування та експлуатацію складним завданням оптимізації [22].

Ключові цілі оптимізації гібридної системи відновлюваної енергетики узагальнені в роботах [19]. Вони поділяються на економічні, технічні, стійкісні, екологічні та соціальні. Завдання для кожної групи наведені в табл. 1.

Технічні цілі включають, але не обмежуються, задоволення бажаних рівнів надійності на основі ймовірності втрати живлення або ймовірності втрати навантаження [23, 24], мінімізація співвідношення витрат/ефективності та мінімізація вики-

дів вуглецю [25], [26] максимізація доступності потужності [25]. Майбутні дослідження повинні пріоритетувати міждисциплінарну співпрацю, стан-

дартизовані соціальні/стійкі показники, масштабований та надійний штучний інтелект, а також рамки валідації для розкриття потенціалу HRES [27].

Таблиця 1 – Ключові цілі оптимізації гібридної системи відновлюваної енергетики

Цілі	Завдання
Економічні	Мінімізувати вирівняну вартість енергії (LCOE), Мінімізувати чисту поточну вартість (NPC/TNPC), Мінімізувати початкові інвестиційні витрати, Мінімізувати експлуатація та технічне обслуговування (O&M), Мінімізувати річну вартість системи (ASC/TNAC)
Технічні	Мінімізувати ймовірні втрати живлення (LPSP), Мінімізувати очікуванні втрати навантаження (LOLE), Максимізувати ефективність системи, Максимізувати деградацію, Мінімізувати очікувані періоди нестачання енергії, Мінімізувати деградацію акумулятора
Стойкісні	Мінімізувати індекс середньої тривалості переривання системи (SAIDI), Мінімізувати індекс середньої частоти переривань системи (SAIFI), Мінімізувати тривалість перебоїв у роботі (DoO), Мінімізувати час відновлення (RT)
Екологічні	Мінімізація викидів CO ₂ /парникових газів, Мінімізація споживання викопного палива, Максимізація джерел енергії, Мінімізація землекористування
Соціальні	Максимізація створення робочих місць, Підвищення соціальної прийнятності Покращення доступу до енергії/рівності, вплив на здоров'я людини

Систематичний огляд [28] синтезує сучасний стан оптимізації для гібридних систем відновлюваної енергії. Було проведено багато робіт з побудови моделей та їх розв'язання, а такі технології, як методи надбудови та інтелектуальні алгоритми, ефективно застосовані в RE-HES. [28].

Гібридні автономні системи приваблюють сільські райони з усіх боків, таких як надійність, сталий розвиток та захист навколишнього середовища, особливо для громад, що проживають далеко в районах, де розширення мережі недоцільне [29]. Вітрова та сонячна енергія розглядаються як основні джерела для безпосереднього постачання електроенергії на навантаження та для заряджання акумуляторних батарей у разі надмірної генерації, проте в години пікового навантаження може бути задіяний і дизельний генератор. Навантаження запропоновано для освітлення, водопостачання, навантаження на обладнання шкіл та медичних клінік, телебачення, радіо, борошномельних машин та випічки місцевих продуктів (енджера).

5. Дослідження продуктивності гібридних систем відновлюваної енергетики

На продуктивність гібридних систем відновлюваної енергетики, які поєднують джерела енергії вітру, сонця та геотермальної енергії, впливають різні умови навколишнього середовища[30]. Ці фактори безпосередньо впливають на потенціал виробництва енергії кожної технології та формують техніко-економічну оптимізацію, необхідну для рішень у сфері сталого енергетики. У табл. 2 представлені параметри, необхідні для оцінки вітрових турбін, сонячних панелей та геотермальних систем, що допомагає оптимізувати їхню продуктивність. Розуміння цих параметрів є ключовим для проектування ефективних та економічно вигідних гібридних систем у процесі переходу до відновлюваної енергетики.

Швидкість вітру відіграє значну роль у продуктивності вітрових турбін. Вітрові турбіни працюють найефективніше при швидкостях вітру від

5 до 15 м/с. У цьому діапазоні турбіни ефективно вловлюють енергію вітру, перетворюючи її на електроенергію.

Швидкості вітру нижче цього діапазону виробляють недостатньо енергії, тоді як вищі швидкості можуть навантажувати турбіни. Напрямок вітру також впливає на продуктивність турбін, оскільки турбіни повинні бути спрямовані проти переважаючих вітрів. Правильне розміщення тур-

бін забезпечує постійне вловлювання енергії вітру, оптимізуючи продуктивність. Зсув вітру, або зміни швидкості вітру з висотою, також впливає на вловлювання енергії.

Значення зсуву вітру 0,1-0,3 вказують на сприятливі умови для високих турбін, які можуть отримати доступ до вищих швидкостей вітру. Ці умови дозволяють турбінам генерувати більше енергії, підвищуючи ефективність.

Таблиця 2 – Ключові фактори навколишнього середовища для оптимізації гібридної енергетичної системи [30]

Умова	Опис	Діапазон значень
Швидкість вітру	Швидкість вітру, що впливає на вироблення енергії	5-15 м/с
Сонячна радіація	Сонячна енергія, отримана на одиницю	400 до 1000 Вт/м ²
Геотермальний тепловий потік	Теплова енергія, що витягується з надр Землі	50-150 мВт/м ²
Температура навколишнього середовища	Температура, що впливає на ефективність системи	від 10 °С до 35 °С
Відносна вологість.	Вплив водяної пари в повітрі на продуктивність	30-80%
Опади	Енергія опадів або снігопадів, що впливає на генерацію	від 0 до 200 мм/місяць
Кут падіння сонячного випромінювання від	Кут падіння сонячного випромінювання на поверхню	15° до 75°
Напрямок вітру	Напрямок вітру, що впливає на розташування турбіни	Північ, Південь, Схід, Захід
Геотермальна глибина	Глибина геотермальних енергоресурсів	від 500 до 3000 м
Хмарний покрив	Відсоток неба, вкритого хмарами	20-80%
ККД вітрової турбіни	ККД перетворення енергії вітру в електроенергію	25-45%
Ефективність сонячних панелей	Ефективність перетворення сонячного випромінювання в електроенергію	10-22%
Ефективність геотермального перетворення	Ефективність перетворення геотермальної енергії	10-30%
Густина повітря	Густина повітря, що впливає на захоплення енергії	1,1-1,3 кг/м ³
Відбивна здатність ґрунту (альbedo)	Відбивна здатність, що впливає на вихідну потужність сонячних панелей	від 0,2 до 0,6
Інтенсивність турбулентності	Коливання швидкості вітру, що впливають на турбіни	0,05-0,15
Коефіцієнт сонячної температури	Вплив температури на ефективність сонячних панелей	від -0,3% до -0,5%/°С
Зсув вітру	Зміна швидкості вітру з висотою	від 0,1 до 0,3
Коефіцієнт теплопередачі	Швидкість теплопередачі в геотермальних системах	від 3 до 5 Вт/м К
Дебіт геотермальної свердловини	Швидкість видобутку геотермальної рідини	від 20 до 100 л/с

Сонячна радіація – це кількість сонячної енергії, що отримується на одиницю площі. Вона коливається від 400 до 1000 Вт/м², залежно від місця розташування та погодних умов. Райони з високою сонячною радіацією ідеально підходять для виробництва сонячної енергії. Вищі рівні радіації збільшують потенціал для захоплення енергії сонячними панелями. Ефективність сонячних панелей залежить від того, наскільки ефективно вони перетворюють сонячне випромінювання на електроенергію. Сонячні панелі повинні бути правильно орієнтовані, щоб оптимізувати виробництво енергії в різний час.

Геотермальний тепловий потік вимірює, скільки тепла можна витягти для отримання енергії. Він коливається від 50 до 150 мВт/м² залежно від геологічних умов. Райони з вищим тепловим потоком краще підходять для видобутку геотермальної енергії. Однак, глибина геотермальних джерел впливає на процес видобутку; глибші ресурси важче отримати. Геотермальні глибини зазвичай коливаються від 500 до 3000 м, а експлуатація глибших резервуарів є дорожчою. Ефективність геотермального перетворення стосується того, наскільки добре тепло перетворюється на електроенергію.

Температура навколишнього середовища безпосередньо впливає на ефективність систем відновлюваної енергії. Температури від 10 до 35 °C є оптимальними для роботи системи. Екстремальні температури можуть знизити ефективність та термін служби систем.

Відносна вологість, яка коливається від 30 до 80%, також впливає на ефективність системи. Високий рівень вологості може знизити щільність повітря, що впливає на ефективність вітрових турбін. Для сонячних панелей вологість збільшує хмарність, зменшуючи вплив сонячного світла. Опади, включаючи дощ або сніг, перешкоджають сонячному випромінюванню та руху вітрових турбін. У районах, де випадає від 0 до 200 мм опадів на місяць, може виникнути простої системи.

Наведені результати [30] свідчать, що при швидкості вітру 7,668 м/с та рівні сонячної радіації 757,84 Вт/м² обсяг виробленої енергії становить 611,62 кВт·год. Водночас збільшення швидкості вітру до 8,881 м/с за одночасного зменшення сонячної радіації до 434,02 Вт/м² супроводжується істотним зростанням виробництва енергії – до 1007,3 кВт·год. Це свідчить про складний характер взаємодії між швидкістю вітру та інтен-

сивністю сонячного випромінювання, які спільно визначають рівень енергогенерації. Отримані результати підкреслюють важливість комплексного врахування як вітрових, так і сонячних ресурсів під час проектування та оптимізації систем відновлюваної енергетики. За умови оптимального поєднання цих параметрів рівень виробництва енергії може істотно зростати, тоді як їх неоптимальні значення призводять до зниження енергетичної ефективності.

Виробництво енергії не завжди збільшується зі збільшенням будь-якого з параметрів окремо. Ця складність підкреслює необхідність удосконалення систем моделювання та прогнозування у виробництві відновлюваної енергії [31].

Ключовим в оптимізації систем відновлюваної енергії є техніко-економічний аналіз. Він інтегрує технічні, економічні та екологічні фактори для прийняття рішень [30]. Цей аналіз допомагає збалансувати продуктивність, вартість та екологічну стійкість. Методологія оптимізації інтегрує використання ресурсів та економічні міркування в проектування.

6. Висновки

Гібридні енергетичні системи в перспективі дозволять підвищити техніко-економічні показники та надійність енергосистем, забезпечуючи маневрування потужністю для компенсації непостійної електрогенерації від відновлювальних джерел енергії.

Для оцінки продуктивності гібридних систем теплопостачання на основі відновлюваних джерел енергії необхідно враховувати фактори навколишнього середовища, таких як швидкість вітру, сонячну радіацію та геотермальний тепловий потік. Моделювання потоків енергії допомагає ефективно інтегрувати кілька підсистем.

Алгоритми оптимізації покращують оцінку гібридних систем, прогнозують продуктивність системи та оптимізують виробництво енергії, з них поширеними є класичні, метаевристичні та гібридні. Ключові цілі оптимізації поділяються на економічні, технічні, стійкісні, екологічні та соціальні.

Методологія оптимізації максимізує енергетичну продуктивність гібридних систем, інтегрує використання ресурсів та економічні міркування в проектування, допомагає забезпечити надійність та економічну ефективність гібридних систем.

Література

1. A review of hybrid renewable energy systems: Solar and wind-powered solutions: Challenges, opportunities, and policy implications / **Q. Hassan et al.** Results in Engineering. – 2023. – P. 101621. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101621>.
2. Sustainable and optimized power solution using hybrid energy system / **P. Maggu et al.** Energy Exploration & Exploitation. – 2024. URL: <https://doi.org/10.1177/01445987241284689>.
3. Advancing AI-Enabled Techniques in Energy System Modeling: A Review of Data-Driven, Mechanism-Driven, and Hybrid Modeling Approaches / **Y. Lin et al.** Energies. – 2025. – Vol. 18, no. 4. – P. 845. URL: <https://doi.org/10.3390/en18040845>.
4. A two-layer optimization of design and operational management of a hybrid combined heat and power system / **H. Liu et al.** Frontiers in Energy Research. – 2022. – Vol. 10. URL: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.959774>.
5. A review of unconventional bottoming cycles for waste heat recovery: Part I – Analysis, design, and optimization / **M. Saghaffar et al.** Energy Conversion and Management. – 2019. – Vol. 198. – P. 110905. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.10.047>.
6. **Ramadan M., Iemenand T., Khaled M.** Recovering heat from hot drain water – Experimental evaluation, parametric analysis and new calculation procedure. Energy and Buildings. – 2016. – Vol. 128. – P. 575–582. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.017>.
7. **Nithyanandam K., Mahajan R. L.** Evaluation of metal foam based thermoelectric generators for automobile waste heat recovery. International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2018. – Vol. 122. – P. 877–883. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.02.029>.
8. **Cuesta M. A., Castillo-Calzadilla T., Borges C. E.** A critical analysis on hybrid renewable energy modeling tools: An emerging opportunity to include social indicators to optimise systems in small communities. Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2020. – Vol. 122. – P. 109691. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109691>.
9. Hybrid energy management with respect to a hydrogen energy system and demand response / **M. R. Maghami et al.** International Journal of Hydrogen Energy. – 2020. – Vol. 45, no. 3. – P. 1499–1509. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.10.223>.
10. **Balasanian G., Verstak V., Ostapenko A.** Autonomous hybrid system of combined energy supply with renewable energy sources. Odes'kyi Politechnichnyi Universytet Pratsi. – 2025. – Vol. 1, no. 71. – P. 75–81. URL: <https://doi.org/10.15276/opu.1.71.2025.08>.
11. **Darybohov M., Dybach O.** Гібридні енергетичні системи із джерелами ядерної та відновлювальної енергетики. Nuclear and Radiation Safety. – 2022. – № 3(95). – С. 5–14. URL: [https://doi.org/10.32918/nrs.2022.3\(95\).01](https://doi.org/10.32918/nrs.2022.3(95).01).
12. **Stadnik M. I., Protsenko D. P., Babiy S. M.** Hybrid Power Supply Using Renewable Energy Sources. Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute. – 2020. – Vol. 151, no. 4. – P. 32–41. URL: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-151-4-32-41>.
13. **Giahi R., MacKenzie C. A., Hu C.** Optimizing the flexible design of hybrid renewable energy systems. The Engineering Economist. – 2022. – Vol. 67, no. 1. – P. 25–51. URL: <https://doi.org/10.1080/0013791x.2022.2028047>.
14. **Siddaiah R., Saini R. P.** A review on planning, configurations, modeling and optimization techniques of hybrid renewable energy systems for off grid applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – Vol. 58. – P. 376–396. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.281>.
15. **Babatunde O. M., Munda J. L., Hamam Y.** Operations and planning of integrated renewable energy system: a survey. 2020 5th International Conference on Renewable Energies for Developing Countries (REDEC), Marrakech, Morocco, Morocco, 29–30 June 2020. – 2020. URL: <https://doi.org/10.1109/redec49234.2020.9163857>.
16. **A. C. N., Jyoti R., Raju A. B.** Economic analysis and comparison of proposed HRES for stand-alone applications at various places in Karnataka state. 2011 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies – India (ISGT India), Kollam, Kerala, India, 1–3 December 2011. – 2011. URL: <https://doi.org/10.1109/iset-india.2011.6145346>.
17. **Gupta A., Saini R. P., Sharma M. P.** Optimised application of hybrid renewable energy system in rural electrification. 2006 India International Conference on Power Electronics (IICPE 2006), Chennai, India, 19–21 December 2006. – 2006. URL: <https://doi.org/10.1109/iicpe.2006.4685393>.
18. **Panaras G., Kotsopoulos T., Martinopoulos G.** Renewable energy sources: prospects and technologies. Green Energy and Sustainability. – 2021. – P. 1–4. URL: <https://doi.org/10.47248/hkod902101020005>.

19. A review of hybrid renewable energies optimisation: design, methodologies, and criteria / **O. K. Ajiboye et al.** International Journal of Sustainable Energy. 2023. Vol. 42, no. 1. P. 648-684. URL: <https://doi.org/10.1080/14786451.2023.2227294>.
20. Hybrid Renewable Energy Systems—A Review of Optimization Approaches and Future Challenges / **A. Giedraityte et al.** Applied Sciences. – 2025. – Vol. 15, no. 4. – P. 1744. URL: <https://doi.org/10.3390/app15041744>.
21. **Thirunavukkarasu M., Sawle Y.** A Comparative Study of the Optimal Sizing and Management of Off-Grid Solar/Wind/Diesel and Battery Energy Systems for Remote Areas. Frontiers in Energy Research. – 2021. – Vol. 9. URL: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.752043>.
22. Towards Renewables Development: Review of Optimization Techniques for Energy Storage and Hybrid Renewable Energy Systems / **O. Bamisile et al.** Heliyon. – 2024. – P. e37482. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37482>.
23. Cost-effective reliability level in 100% renewables-based standalone microgrids considering investment and expected energy not served costs / **N. Sakthivelnathan et al.** Energy. – 2024. – Vol. 311. – P. 133426. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133426>.
24. **Yang H., Wei Z., Chengzhi L.** Optimal design and techno-economic analysis of a hybrid solar–wind power generation system. Applied Energy. – 2009. – Vol. 86, no. 2. – P. 163-169. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.03.008>.
25. **Iniyen S., Sumathy K.** An optimal renewable energy model for various end-uses. Energy. – 2000. Vol. 25, no. 6. – P. 563-575. URL: [https://doi.org/10.1016/s0360-5442\(99\)00090-0](https://doi.org/10.1016/s0360-5442(99)00090-0).
26. **Lujano-Rojas J. M., Dufo-López R., Bernal-Agustín J. L.** Technical and economic effects of charge controller operation and coulombic efficiency on stand-alone hybrid power systems. Energy Conversion and Management. – 2014. – Vol. 86. – P. 709–716. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.06.053>.
27. Modern Optimization Technologies in Hybrid Renewable Energy Systems: A Systematic Review of Research Gaps and Prospects for Decisions / **V. Korovushkin et al.** Energies. – 2025. – Vol. 18, no. 17. – P. 4727. URL: <https://doi.org/10.3390/en18174727>.
28. **Zhang J., Wei H.** A review on configuration optimization of hybrid energy system based on renewable energy. Frontiers in Energy Research. 2022. – Vol. 10. URL: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.977925>.
29. Optimizing a Green and Sustainable Off-Grid Energy-System Design: A Real Case / **N. Ghadiri-nejad et al.** Sustainability. 2023. Vol. 15, no. 17. P. 12800. URL: <https://doi.org/10.3390/su151712800>.
30. Techno-economic optimization of hybrid renewable systems for sustainable energy solutions / **K. B. N et al.** Scientific Reports. 2025. Vol. 15, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-08171-3>.
31. Improved techno-economic optimization of hybrid solar/wind/fuel cell/diesel systems with hydrogen energy storage / **M. H. Hassan et al.** International Journal of Hydrogen Energy. 2024. Vol. 68. P. 998–1018. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.04.124>.

Отримана в редакції 10.04.2026, прийнята до друку 24.04.2026

Current state of hybrid heat supply systems based on renewable energy sources

Dmytro Yerokhin

Odesa National University of Technology, 112 Kanatnaya Str., Odessa, 65039, Ukraine;

✉ e-mail: erokhin-dima@ukr.net

ORCID: <http://orcid.org/0009-0001-7302-8245>

The paper considers the scientific problem of optimizing and enhancing the functional capabilities of hybrid heating systems based on renewable energy sources, taking into account the main factors that hinder their widespread implementation. It is emphasized that hybrid renewable energy systems face several barriers to implementation, including technological, financial, and operational challenges. An analytical review of scientific publications demonstrates that hybrid energy systems have significant potential to improve the technical and economic performance and reliability of energy systems by

providing flexible power management to compensate for the intermittent nature of electricity generation from renewable energy sources. The objectives of the article include the study of optimization methods for hybrid renewable energy systems in order to take into account the performance of their components and the possibility of achieving minimum costs; the identification of key optimization tasks for hybrid renewable energy systems; and the investigation of the efficiency of hybrid renewable energy systems. The paper examines optimization algorithms applied to hybrid renewable energy systems, including classical algorithms, metaheuristic methods, and hybrid approaches that combine two or more optimization techniques. The main optimization objectives of hybrid renewable energy systems are formulated and classified into economic, technical, sustainability-related, environmental, and social categories. Based on an analytical review of scientific literature, a study of the performance of hybrid renewable energy systems was conducted. It is noted that the performance of hybrid renewable energy systems that combine wind, solar, and geothermal energy sources is influenced by various environmental conditions. The obtained results highlight the importance of comprehensive consideration of renewable energy resources during the design and optimization of renewable energy systems.

Keywords: Energy efficiency; Optimization objectives; Optimization methods; Hybrid energy system; Environmental factors.

References

- Hassan, Q., Algburi, S., Sameen, A. Z., Salman, H. M., & Jaszczur, M. (2023). A review of hybrid renewable energy systems: Solar and wind-powered solutions: Challenges, opportunities, and policy implications. *Results in Engineering*, 101621.
- Maggu, P., Singh, S., Sinha, A., Biamba, C. N., Iwendi, C., & Hashmi, A. (2024). Sustainable and optimized power solution using hybrid energy system. *Energy Exploration & Exploitation*.
- Lin, Y., Tang, J., Guo, J., Wu, S., & Li, Z. (2025). Advancing AI-Enabled Techniques in Energy System Modeling: A Review of Data-Driven, Mechanism-Driven, and Hybrid Modeling Approaches. *Energies*, 18(4), 845.
- Liu, H., Miao, Z., Wang, N., & Yang, Y. (2022). A two-layer optimization of design and operational management of a hybrid combined heat and power system. *Frontiers in Energy Research*, 10.
- Saghafifar M, Omar A, Mohammadi K, Alashkar A, Gadalla M. (2019) A review of unconventional bottoming cycles for waste heat recovery: Part I – analysis, design, and optimization. *Energy Convers Manag*, 198, 1-59.
- Ramadan M, Iemenand T, Khaled M. (2016) Recovering heat from hot drain water – Experimental evaluation, parametric analysis and new calculation procedure. *Energy Build*, 128, 575-582.
- Nithyanandam K, Mahajan RL. (2018) Evaluation of metal foam based thermoelectric generators for automobile waste heat recovery. *Int J Heat Mass Transfer*, 122, 877-883.
- Cuesta MA, Castillo-Calzadilla T, Borges CE. (2020) A critical analysis on hybrid renewable energy modeling tools: An emerging opportunity to include social indicators to optimise systems in small communities. *Renew Sustain Energy Rev*, 109691.
- Maghami MR, Hassani R, Gomes C, Hizam H, Othman ML, Behmanesh M. (2019) Hybrid energy management with respect to a hydrogen energy system and demand response. *Int J Hydrogen Energy*
- Balasanian, G., Verstak, V., & Ostapenko, A. (2025). Autonomous hybrid system of combined energy supply with renewable energy sources. *Odes'kyi Politechnichnyi Universytet Pratsi*, 1(71), 75-81.
- Darybohov, M., & Dybach, O. (2022). Hybrid energy systems with nuclear and renewable energy sources. *Nuclear and Radiation Safety*, 3(95), 5-14.
- Stadnik, M. I., Protsenko, D. P., & Babiy, S. M. (2020). Hybrid Power Supply Using Renewable Energy Sources. *Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*, 151(4), 32-41.
- Giahi, R., MacKenzie, C. A., & Hu, C. (2022). Optimizing the flexible design of hybrid renewable energy systems. *The Engineering Economist*, 67(1), 25-51.
- Siddaiah, R., & Saini, R. P. (2016). A review on planning, configurations, modeling and optimization techniques of hybrid renewable energy systems for off grid applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 376-396.
- Babatunde, O. M., Munda, J. L., & Hamam, Y. (2020). Operations and planning of integrated renewable energy system: a survey. *2020 5th International Conference on Renewable Energies for Developing Countries (REDEC)*. IEEE.
- A. C., N., Jyoti, R., & Raju, A. B. (2011). Eco-

- conomic analysis and comparison of proposed HRES for stand-alone applications at various places in Karnataka state. *2011 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies - India (ISGT India)*. IEEE.
17. **Gupta, A., Saini, R. P., & Sharma, M. P.** (2006). Optimised application of hybrid renewable energy system in rural electrification. *2006 India International Conference on Power Electronics (IICPE 2006)*. IEEE.
18. **Panaras, G., Kotsopoulos, T., & Martinopoulos, G.** (2021). Renewable energy sources: prospects and technologies. *Green Energy and Sustainability*, 1–4.
19. **Ajiboye, O. K., Ochiegbu, C. V., Ofosu, E. A., & Gyamfi, S.** (2023). A review of hybrid renewable energies optimisation: design, methodologies, and criteria. *International Journal of Sustainable Energy*, 42(1), 648–684.
20. **Giedraityte, A., Rimkevicius, S., Marciukaitis, M., Radziukynas, V., & Bakas, R.** (2025). Hybrid Renewable Energy Systems – A Review of Optimization Approaches and Future Challenges. *Applied Sciences*, 15(4), 1744.
21. **Thirunavukkarasu, M., & Sawle, Y.** (2021). A Comparative Study of the Optimal Sizing and Management of Off-Grid Solar/Wind/Diesel and Battery Energy Systems for Remote Areas. *Frontiers in Energy Research*, 9.
22. **Bamisile, O., Cai, D., Adun, H., Dagbasi, M., Ukwuoma, C. C., Huang, Q., Johnson, N., & Bamisile, O.** (2024). Towards Renewables Development: Review of Optimization Techniques for Energy Storage and Hybrid Renewable Energy Systems. *Heliyon*, e37482.
23. **Sakthivelnathan, N., Arefi, A., Lund, C., Mehrizi-Sani, A., & Muyeen, S. M.** (2024). Cost-effective reliability level in 100% renewables-based standalone microgrids considering investment and expected energy not served costs. *Energy*, 311, 133426.
24. **Yang, H., Wei, Z., & Chengzhi, L.** (2009). Optimal design and techno-economic analysis of a hybrid solar–wind power generation system. *Applied Energy*, 86(2), 163–169.
25. **Iniyar, S., & Sumathy, K.** (2000). An optimal renewable energy model for various end-uses. *Energy*, 25(6), 563–575.
26. **Lujano-Rojas, J. M., Dufo-López, R., & Bernal-Agustín, J. L.** (2014). Technical and economic effects of charge controller operation and coulombic efficiency on stand-alone hybrid power systems. *Energy Conversion and Management*, 86, 709–716.
27. **Korovushkin, V., Boichenko, S., Artyukhov, A., Ćwik, K., Wróblewska, D., & Jankowski, G.** (2025). Modern Optimization Technologies in Hybrid Renewable Energy Systems: A Systematic Review of Research Gaps and Prospects for Decisions. *Energies*, 18(17), 4727.
28. **Zhang, J., & Wei, H.** (2022). A review on configuration optimization of hybrid energy system based on renewable energy. *Frontiers in Energy Research*, 10.
29. **Ghadirinejad, N.** (2018). Design of an off-grid renewable-energy hybrid system for a grocery store: a case study in Malmö, Sweden. *Thesis, Högskolan i Halmstad, Akademin för ekonomi, teknik och naturvetenskap*.
30. **N, K. B., Abirami, M., Vighneshwari, D., & Hariprasath, M.** (2025). Techno-economic optimization of hybrid renewable systems for sustainable energy solutions. *Scientific Reports*, 15(1).
31. **Hassan, M. H., Kamel, S., Safaraliev, M., & Kokin, S.** (2024). Improved techno-economic optimization of hybrid solar/wind/fuel cell/diesel systems with hydrogen energy storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 68, 998–1018.

Received 10 April 2026

Approved 24 April 2026

Available in Internet 31 May 2026