

УДК 519.6 + 544.6.018

ОПТИМІЗАЦІЯ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ГРУПОЮ ОДНОТИПНИХ ЕЛЕКТРОЛІЗНИХ УСТАНОВОК МОНОПОЛЯРНОГО ТИПУ

Д. А. Котенко

dima.kotenko.96@gmail.com

ORCID: 0009-0006-7503-3837

М. М. Зіпунніков, канд. техн. наук

zipunnikov_n@ukr.net

ORCID: 0000-0002-0579-2962

О. О. Стрельнікова, д-р техн. наук

elena15@gmx.com

ORCID: 0000-0003-0707-7214

Інститут енергетичних машин і систем
ім. А. М. Підгорного НАН України,
61046, Україна, м. Харків,
вул. Комунальників, 2/10

Останнім часом дедалі більше уваги приділяється екологічним проблемам, пов'язаним із надмірним видобуванням традиційних енергетичних ресурсів. Перехід на стійкі й відновлювані джерела енергії стає ключовим рішенням для подолання виснаження природних ресурсів і зменшення негативного впливу на довкілля. Одним із перспективних напрямів є використання технології отримання водню й кисню за допомогою електролізу. Однак на сьогодні згадані технології вимагають великих витрат енергії. Проте в деяких режимах групової роботи використовуються декілька електролізних установок, які працюють одночасно (у даній статті мова йде про монополярні електролізери з активним електродом), при цьому можуть дуже негативно впливати на елементи електричної мережі, яка живить цю групу електролізних установок. У статті розглядається оптимізація роботи групи однотипних монополярних електролізних установок із метою мінімізації їх негативного впливу на електричну мережу. Наведено результати апроксимації функції, яка описує зміну напруги для електролізу з активним електродом, отриманого з експериментальних даних, за допомогою рядів Фур'є. Визначено цільову функцію оптимізації та розв'язано задачу пошуку оптимальної черги запуску групи електролізних установок за допомогою стохастичних методів. У результаті проведених розрахунків встановлено, що використання стохастичних методів є доцільним, а на основі запропонованого рішення можна створити прототип реальної системи управління групою однотипних електролізних установок.

Ключові слова: електролізер, водень, оптимізація, алгоритм, функція, густина струму.

Вступ

Актуальність застосування водневих технологій визначається сучасними глобальними викликами у сфері енергетики, екології та економіки. Крім того, підвищення попиту на енергію, необхідність зниження викидів парникових газів і прагнення до сталого розвитку сприяють їх активному впровадженню, що, у свою чергу, дасть змогу вирішити екологічні проблеми, зміцнити енергетичну безпеку й відкрити нові економічні можливості.

Водневі технології також є ключовими для створення стійкої енергетичної системи майбутнього. Зважаючи на це, нагальність використання водневих технологій зростає з кожним днем, особливо з посиленням глобальних екологічних стандартів і розвитку «зеленої» енергетики. Найпоширеніший метод отримання водню – електроліз води, що потребує достатніх обсягів електроенергії [1]. Якщо джерел електроенергії не вистачає, це може спричинити додаткове навантаження на енергосистему, особливо в пікові періоди споживання [2, 3].

Актуальність проблеми

Останні дослідження у сфері зеленого водню свідчать про значний інтерес до оптимізації наявних методів його видобутку і мінімізації витрат. У сучасних працях поліпшення водневих систем розглядають з позиції:

- максимізації прибутковості електролізерів при використанні сонячних панелей як джерела живлення шляхом пошуку найкращого часу роботи й кількості фотоелементів [4, 5];
- зменшення витрат при логістиці водню вибором оптимальної кількості місткостей для його зберігання і транспортування [6, 7];
- пошуку найкращої конфігурації водневої системи (із використанням різних налаштувань електролізера й різних джерел живлення) [8].

Статтю ліцензовано на умовах Ліцензії Creative Commons «Attribution» («Атрибуція») 4.0 Міжнародна.
© Д. А. Котенко, М. М. Зіпунніков, О. О. Стрельнікова, 2025

Варто зазначити, що в цих роботах розглядаються системи видобутку водню на основі одного електролізера і не ставиться за мету оцінити доцільність використання декількох установок.

В Інститут енергетичних машин і систем ім. А. М. Підгорного Національної академії наук України розроблено безмембранні монополярні електролізери високого тиску [9–11]. На відміну від біполярного електролізера в монополярних електроди підключаються до джерела струму окремо (паралельно), що спрощує їх виготовлення, установку й обслуговування. Крім того, у біполярному електролізері електроди мають одночасно виконувати функції анода і катода, що вимагає складнішої обробки матеріалів. Монополярний електролізер з активним електродом працює циклами, які складаються з двох напівциклів – водневого й кисневого, при цьому в різних напівциклах різна полярність напруги на пасивних пластинах.



Рис. 1. Пошкоджені лопаті турбіни

Циклічний характер роботи електролізних систем без оптимізації черги запуску може призвести до утворення високого навантаження на енергосистему під час генерації водню (кисню) в промислових масштабах. На рис. 1 наведено зовнішній вигляд лопатей турбіни, що вийшли з ладу через механічний удар, спричинений різкою зміною навантаження на валу електрогенератора.

Опис установки

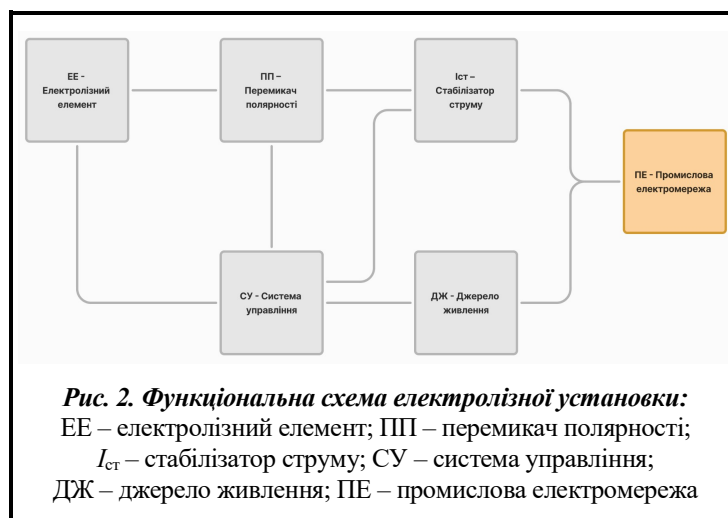
У промисловості широко використовують традиційні електролізери з рідким лужним електролітом, що забезпечують генерацію газів із тиском 0,05–1,6 МПа в діапазоні температур від 333 до 353 К і густиною струму 1200–2500 А/м². При цьому енерговитрати (залежно від температури процесу, тиску, якості електродів, конструкції електролізера і низки інших чинників) змінюються в межах від 4,3 до 5,2 кВт-год/м³ водню (H₂).

У монополярному електролізері високого тиску одержання H₂ і O₂ при розкладанні H₂O рознесені в часі й утворюють водневий H₂ і кисневий O₂ напівцикли. Завдяки цьому зникає необхідність у мембрані. При цьому на першому напівциклі водень виділяється на пасивному електроді в газоподібному вигляді й подається в магістраль високого тиску, а кисень хімічно зв'язується активним електродом (утворюючи хімічну сполуку). У наступному напівциклі відбувається електрохімічне відновлення воднем активного електрода, що супроводжується виділенням кисню на пасивному електроді та його відбором у зовнішню магістраль.

Спрощену функціональну схему системи живлення електролізної установки (розглянутої в цій статті) наведено на рис. 2.

Із цієї схеми видно, що через електролізний елемент із часом протікає однаковий обсяг електричного струму, який змінює напрямок під час переходу від одного напівциклу до іншого. Елемент із найбільшим споживанням енергії у цій схемі це електролізний елемент. На клеммах електролізного елемента внаслідок протікання струму $I_{ст}$ виникає потенціал U_e . Електрична енергія W , споживана електролізним елементом, – це інтеграл потужності $P(t)$ за часом

$$W = \int_{t_1}^{t_2} P(t) dt ; P(t) = I_{ст} \cdot U_e(t) .$$



Відповідно, $W = I_{\text{ст}} \int_{t_1}^{t_2} U_e(t) dt$, де $U_e(t)$ – закон зміни напруги на клеммах електролізного елемента.

На рис. 3 і рис. 4 наведено зміну напруги повного циклу виділення водню і кисню під час електролізу з використанням газопоглинаючого електроду.

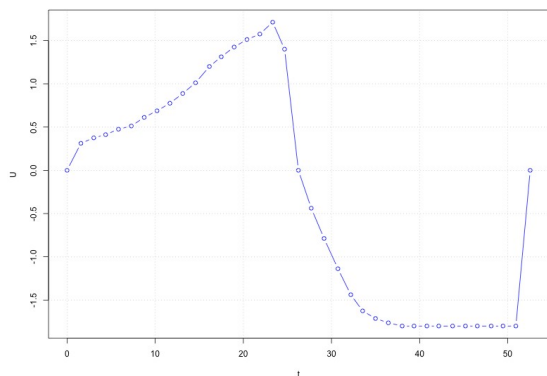


Рис. 3. Зміна напруги повного циклу виділення водню і кисню під час електролізу з використанням електродної збірки Fe (зубчасте).
Густина струму $I=0,03 \text{ A/cm}^2$

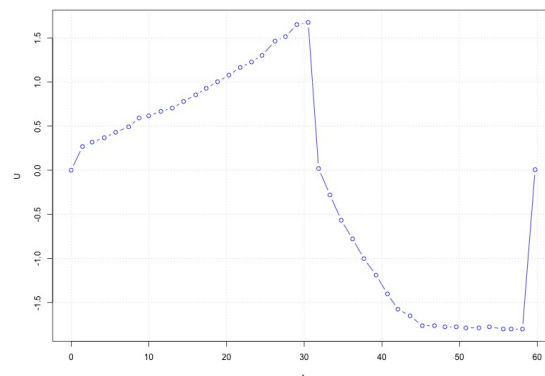


Рис. 4 Зміна напруги повного циклу виділення водню і кисню під час електролізу з використанням електродної збірки Fe (зубчасте).
Густина струму $I=0,015 \text{ A/cm}^2$

Опис очікуваної оптимізації

Відповідно, генерація газів при одночасному використанні декількох приладів утворює велике електричне й механічне навантаження на електросистему. Виходячи з графіка циклу роботи електролізера, нерівномірно розподілена споживана потужність може призводити до підвищення пікової потужності й виникненню ударних механічних навантажень на енергосистему (що може викликати удар на турбіни генерувальної установки і спричинити їх вихід із ладу). На рис. 5 наведено зміну напруги неоптимізованого режиму роботи 1-го, 3-го, 5-го електролізерів одночасно.

Задля уникнення таких сценаріїв установкам необхідно мати керуючий модуль (контролер), який виконуватиме управління чергою запуску таким чином, щоб як мінімізувати величину одночасно використаної напруги, так і позбутись ударних навантажень під час завершення циклів роботи установки. Крім того, оптимізація черги запуску електролізерів забезпечує стабільне й безперервне виробництво водню, на відміну від неоптимізованого увімкнення установок, що працюють у напівциклічному режимі. На рис. 6 наведено зміну напруги оптимальної черги запусків 6 ідентичних електролізерів.

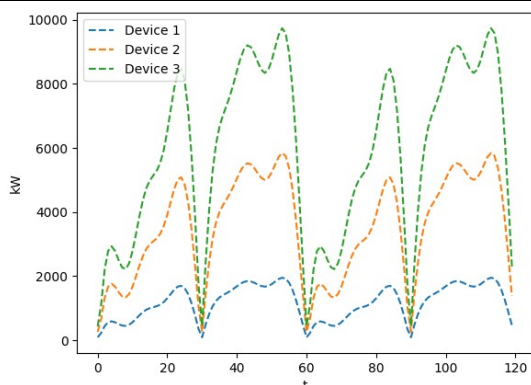


Рис. 5. Зміна напруги не оптимізованого режиму роботи: 1-го (синій), 3-го (помаранчевий) і 5-го (зелений) ідентичних одночасно запущених електролізерів

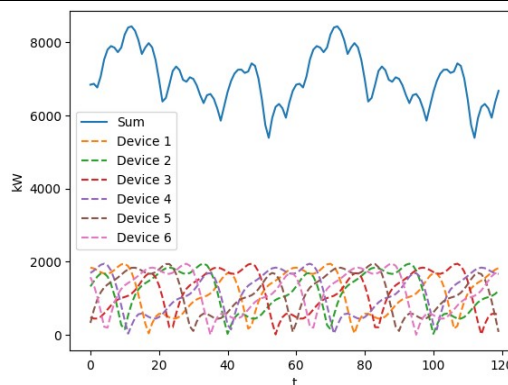


Рис. 6. Оптимальна черга запусків 6 ідентичних електролізерів

Оптимізації роботи електролізної системи

Для наочного представлення задачі розглянуто приклад, у якому доцільним є застосування методів оптимізації. Зокрема, розглянуто сценарій заміщення традиційної системи опалення житлового кварталу на систему, що працює на основі водневих котлів. Запропоновані далі алгоритми можуть бути адаптовані й до інших сфер, наприклад, до енергозабезпечення в агропромисловому комплексі або в галузі водневої авіації.

У представлений моделі видобуток водню шляхом електролізу здійснюється паралельно з процесом опалення. Залежно від типу джерела електропостачання електролізери можуть створювати значне додаткове навантаження на енергомережу. Так, у випадку підключення до централізованої електромережі зростає навантаження на трансформаторні підстанції, що, без відповідної оптимізації, зумовлює необхідність у встановленні додаткових трансформаторів і зростанні витрат на їх обслуговування. Якщо ж застосовуються відновлювальні джерела енергії, виникає проблема компенсації флуктуацій у виробленні електроенергії, що потребує додаткових акумуляторів, трансформаторів і фотоелектричних панелей.

Запропоновані оптимізаційні підходи дають змогу суттєво зменшити втрати ресурсів і забезпечити стабільне функціонування системи за умов змінного навантаження й нестабільного енергопостачання.

Проведено розрахунок необхідної теплової енергії для річного опалення п'ятиповерхового будинку забудови 1950–1970 років

$$Q_0^{\text{рік}} = Q_0^{\text{max}} \cdot \frac{t_{\text{вн}} - t_3^c}{t_{\text{вн}} - t_3^p} \cdot n_0 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ МДж/рік},$$

де Q_0^{max} – максимальна витрата теплоти

$$Q_0^{\text{max}} = \alpha \cdot q_0 \cdot V_6 \cdot (t_{\text{вн}} - t_3^c) \cdot 10^{-6};$$

α – коефіцієнт перерахунку; q_0 – питома опалювальна характеристика будівель при розрахунковій температурі зовнішнього повітря, є функцією від призначення будівлі та інших факторів; V_6 – зовнішній будівельний об'єм будівлі; $t_{\text{вн}}$ – розрахункова температура внутрішнього повітря в опалювальних приміщеннях; t_3^c – середня температура зовнішнього повітря за опалювальний період; t_3^p – розрахункова температура зовнішнього повітря для проектування опалення, приймається відповідно до даних додатків [12] $t_3^p = -30^\circ\text{C}$; n_0 – тривалість опалювального періоду, діб; 24 – час роботи систем опалення житлових і громадських будинків протягом доби, год.

Нехай у кварталі 15 типових радянських будинків об'ємом 7800 м^3 кожен. Разом нам треба за сезон опалювати 117000 м^3 ; $t_3^p = -22^\circ\text{C}$; $t_3^c = -0,1^\circ\text{C}$; $n_0 = 176$ діб.

Для житлових будівель використовуються зазначені характеристики: $t_{\text{вн}} = 18^\circ\text{C}$; $q_0 = 0,42 \text{ (Вт/м}^3\text{)} \cdot \text{K}$; $\alpha = 1,134$.

Максимальна витрата теплоти

$$Q_0^{\text{max}} = 1,134 \cdot 0,42 \cdot 117000 \cdot (18 - (-22)) \cdot 10^{-6} = 2,2289904 \text{ МВт}.$$

Теплова енергія для річного опалення

$$Q_0^{\text{рік}} = 2,228 \cdot \frac{18 - (-0,1)}{18 - (-22)} \cdot 176 \cdot 24 \cdot 3600 = 15337451,1273 \text{ МДж/рік, або } 4260,40 \text{ МВт/рік}.$$

З 1 кг водню виділяється $120\text{--}142 \text{ МДж/кг}$ теплової енергії [13], або ж $33,33\text{--}39,44 \text{ кВт}\cdot\text{год}$ теплової енергії.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) водневого котла

$$\eta = 1 - \frac{9 \cdot H \cdot [584 + C_p(T_f - T_a)]}{GCV},$$

де H – вміст водню в паливі; C_p – питома теплота згоряння димових газів, $\text{Ккал/(кг}^\circ\text{C)}$; T_f – температура димових газів, $^\circ\text{C}$; T_a – температура навколишнього середовища, $^\circ\text{C}$; GCV – загальна теплота згоряння палива.

Типовий ККД водневого котла – $80\text{--}90\%$ [14] розрахований з урахуванням використання водню із викопних джерел, де втрати через кількість водню в паливі й вологу, що міститься в паливі, більші. Оскільки в паливі виробленому електролізною системою ці витрати менші, в розрахунках використовується ККД водневого котла – 95% .

Кількість водню (в кг) визначається за формулою

$$H = \frac{Q}{E} \cdot \eta = 42604030 / 33,33 \cdot 0,95 = 134673,718 \text{ кг.}$$

де Q – теплова потреба на 1 м^2 за добу (кВт-год); E – енергетична щільність водню $33,33 \text{ кВт-год/кг}$; η – ККД котла (у частках, наприклад, $0,95$ для 95%).

Щільність водню при нормальних умовах

$$\rho = \frac{\text{молярна маса}}{\text{об'єм 1 моля}} = 2 / 22,414 = 0,08988 \text{ г/л,}$$

де молярна маса водню – 2 г ; об'єм 1 моля газу при нормальних умовах (0°C , 1 атм) – $22,414 \text{ л}$.

Відповідно, об'єм 1 кг водню

$$V = \frac{1000}{0,08988} = 11120 \text{ л} = 11,12 \text{ м}^3.$$

Таким чином, необхідно мати $1497571,751 \text{ м}^3$ водню на рік, $8508,930 \text{ м}^3$ водню на день, та $354,538 \text{ м}^3$ водню на годину. Для видобутку 1 м^3 водню наш електролізер витрачає $4,24 \text{ кВт}$ електроенергії [9]. Однак для видобутку $354,538 \text{ м}^3$ водню необхідно витратити $1503,244 \text{ кВт}$ електроенергії, а це, як мінімум, 1 додатковий трансформатор на 1600 кВт , такий як ТМ-1600.

Надалі розглянемо процес оптимізації цього пікового навантаження за допомогою збалансованого запуску декількох електролізерів задля отримання цієї кількості водню.

Планування й оптимізації черги запуску електролізерів

Найбільш витратний і найнебезпечніший варіант запуску системи з декількох установок – це запуск усіх електролізних установок одночасно. Результатом оптимізації є відкладена черга запуску кожної електролізної установки в системі з мінімізацією енерговитрат.

Система з декількох електролізерів визначена вектором функцій $\bar{A}_f$, які описують кількість спожитої потужності для кожної електролізної установки системи з декількох електролізерів. На кожен електролізер встановлено аналітичну функцію спожитої потужності в момент часу $A_f(t)$. Під час практичного застосування алгоритму спожита напруга була задана в табличному вигляді й програмно апроксимована. Оскільки функція,

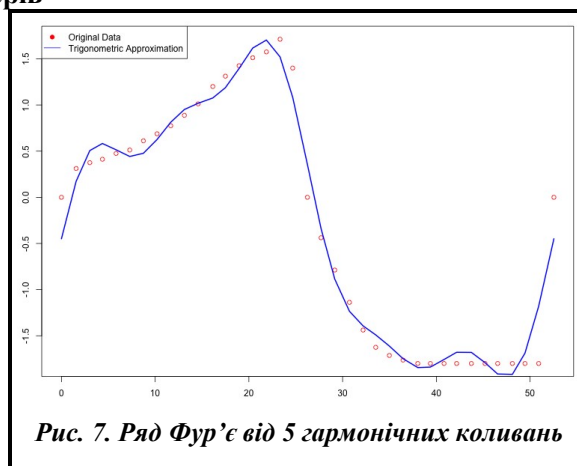


Рис. 7. Ряд Фур'є від 5 гармонічних коливань

що описує спожиту потужність у момент часу, є періодичною і нелінійною, апроксимація здійснена рядами Фур'є у вигляді суми 5 гармонічних коливань. (рис. 7).

При мінімізації необхідно визначити кількість спожитої потужності, оскільки саме за нею встановлюються обмеження на мережу, через це надалі буде використано спожиту потужність. Функція $S_f(t, \bar{A}_f, \bar{\omega}, n)$ – спожита потужність у момент часу t для електролізерів. Конфігурація системи електролізерів задана вектором функцій $\bar{A}_f$, чергою запуску $\bar{\omega}$, та кількістю установок n .

Найкращою є черга запуску, у якій максимальне значення потужності під час роботи електролізної системи є найменшим серед усіх можливих черг запуску.

Максимальне значення потужності під час роботи електролізної системи

$$h(\bar{A}_f, \bar{\omega}, n) = \max_{t \in [0; 2\pi]} (S_f(t, \bar{A}_f, \bar{\omega}, n)).$$

Цільова функція оптимізації

$$C(\bar{A}_f, M, n, k) = \min_{i \in [0; k]} (h(\bar{A}_f, M_i, n)),$$

де M – матриця черг запуску кожної установки або функція, яка породжує черги запуску; k – кількість черг запуску.

Саме через необхідність породження черг запуску ця задача не є тривіальною і потребує правильного вибору методу. Використання прямого перебору можливих операцій зсувів неефективне, оскільки породжує велику кількість варіантів, які треба перевірити.

Кількість можливих комбінацій зсувів часу запуску n установок при k зсувів – це кількість розміщень із повтореннями [15] $A_n^k = n^k$. При фіксованому кроці (крок був обраний 3 хвилини) на прикладі з 3-х електролізерів, ідентичних за характеристиками та режимами роботи.

Відповідно, для 3 установок і 21 варіанта зсуву (від 0 до 60 хвилин із кроком 3) кількість комбінацій буде $21^3=9261$, для 4 установок 194481, а для 5 вже 4084101, тобто при змінах якості й кількості установок складність і час виконання значно збільшуються. Складність у такому випадку дорівнює $\Theta(\varphi) = n^k \cdot 360$, де 360 – кількість кроків для знаходження оціночної функції.

Тож має бути обраний якийсь зі стохастичних алгоритмів. Для розв'язання цієї задачі взято генетичний алгоритм.

Стохастичний алгоритм обраний, оскільки традиційні методи оптимізації спираються на такі властивості, як неперервність, диференційованість, гладкість й опуклість цільової функції та обмежень (якщо такі є). Відсутність будь-якої з цих властивостей робить традиційні методи нездатними розв'язувати подібні оптимізаційні задачі [16]. Функція мінімуму цільової не є диференційованою, оскільки може мати перелом у точці мінімуму при зміні оцінюваної черги.

Генетичний алгоритм

Генетичний алгоритм – це еволюційний алгоритм пошуку, що використовується для розв'язання задач оптимізації та моделювання шляхом послідовного підбору, комбінування і варіації шуканих параметрів із застосуванням механізмів, що нагадують біологічну еволюцію. Особливістю генетичного алгоритму є акцент на використання оператора «схрещення», який виконує операцію рекомбінації рішень-кандидатів, роль якої аналогічна ролі схрещення в живій природі [17].

Основні кроки генетичного алгоритму:

- *створення початкової популяції* – генерується початкова група рішень (хромосом) випадковим чином або на основі певних припущень. У межах моделі системи електролізерів передбачається, що випадкові значення генеруються в діапазоні 0–60 хвилин (еквівалентно інтервалу 0– 2π), розмір однієї групи рішень дорівнює кількості електролізних установок, кількість груп рішень обирається вручну і збільшується за необхідності для покращення результату пошуку;

- *обчислення функції допасованості для осіб популяції (фітнес-функція)* – для кожної хромосоми обчислюється значення фітнес-функції, яка визначає, наскільки добре дане рішення розв'язує задачу. Для оптимізації черги запуску електролізерів фітнес-функція – це максимальне значення потужності під час роботи електролізної системи $h(\bar{A}_f, \bar{\omega}, n)$.

Повторення до виконання критерію зупинки алгоритму (критерій зупинки – це кількість поколінь, або ж кроків, які алгоритм працює):

- *вибір індивідів із поточної популяції (селекція)*. Відбираються хромосоми, які братимуть участь у створенні наступного покоління. У цих розрахунках використовується селекція турнірним відбором: обирається кілька хромосом, і вже серед них обирається найкраща;

- *схрещування або/та мутація*. У нашій реалізації використовуємо і схрещення, і мутацію. Схрещування – це процес, при якому з пар обраних хромосом створюються нові. Був обраний універсальний тип схрещування, при якому кожна пара відповідних генів (зсув конкретного пристрою $\bar{\omega}_i$) схрещується пропорційно до випадкового значення $\alpha \in [0;1]$

$$\bar{\omega}_{ni} = \alpha \cdot \bar{\omega}_{1i} + (1 - \alpha) \cdot \bar{\omega}_{2i}.$$

Мутація – це процес, при якому вноситься невелика випадкова зміна в окремі гени хромосоми. Для цієї оптимізації було застосовано гаусову мутацію з випадковою зміною значення гена в межах допустимих значень;

- *формування нового покоління*. Формується нова популяція із нащадків (результатів схрещування і мутації).

Числові результати

Для щоденного опалення кварталу необхідно $354,538 \text{ м}^3$ водню. На отримання такої кількості необхідно витратити $1503,244 \text{ кВт}$ електроенергії.

Якщо видобуток водню відбувається за допомогою одного електролізера, то при напрузі у 2 В і 1 А/см^2 електролізер має сумарну площу плит на пристрої розміром 751622 см^2 , що еквівалентно плиті розміром $1 \text{ м} \times 7,51 \text{ м}$ на одну установку, це зображено на відповідному графіку (рис. 9), з піковою потужністю $1463,652 \text{ кВт}$. При використанні ж 5 ідентичних електролізерів, кожен із яких має площу плит на пристрої розміром $150324,4 \text{ см}^2$, після оптимізації ми отримуємо, що оптимальною є черга запуску [7,048 хв, 15,094 хв, 51,793 хв, 42,944 хв, 29,906 хв] з піковою потужністю $996,6641 \text{ кВт}$ (рис. 10).

При використанні 3 ідентичних електролізерів, кожен з яких має площу плит на пристрої розміром $125270,3 \text{ см}^2$, та 1-го електролізера, який має площу плит на пристрої розміром 375811 см^2 , після оптимізації ми отримуємо, що оптимальною є черга запуску [52,425 хв, 34,925 хв, 27,650 хв, 11,123 хв] піковою потужністю $1054,1243 \text{ кВт}$ (рис. 11).

Обрахувавши, що при використанні 10 ідентичних електролізерів, кожен з яких має площу плит на пристрої розміром $75162,2 \text{ см}^2$ після оптимізації ми отримуємо, що оптимальною є черга запуску [1,756 хв, 5,428 хв, 43,759 хв, 39,116 хв, 15,594 хв, 29,183 хв, 9,565 хв, 49,261 хв, 26,891 хв, 53,966 хв], піковою потужністю $953,4203 \text{ кВт}$ (рис. 12).

Таким чином, розроблено алгоритм, який зменшує максимальне пікове навантаження більш ніж на 500 кВт , що дає змогу збалансувати витрати на обладнання й навантаження на електромережу.

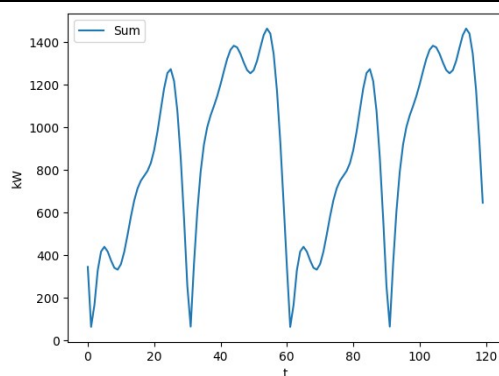


Рис. 9. Потужність при використанні одного електролізера з площею електролізного елементу 751622 см^2 і пікову потужність $1463,652 \text{ кВт}$

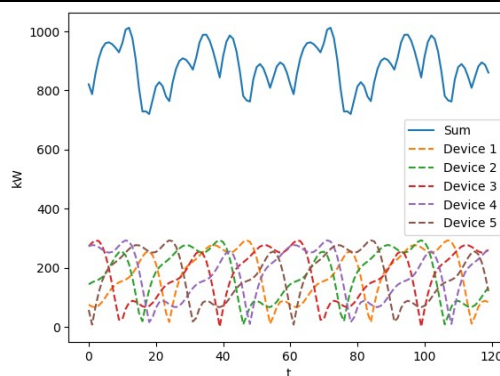


Рис. 10. Потужність при використанні 5 ідентичних електролізерів, кожен з яких має площу електролізного елементу $150324,4 \text{ см}^2$ та пікову потужність $996,6641 \text{ кВт}$ після оптимізації

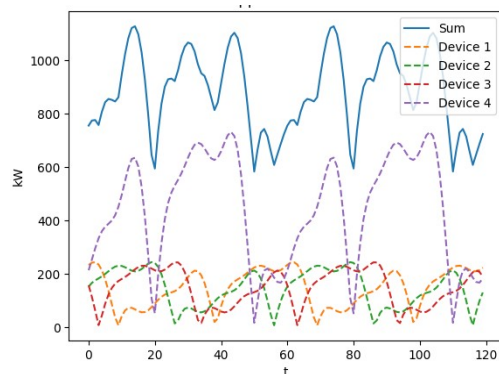


Рис. 11. Використанні 3 ідентичних електролізерів, кожен з яких має площу електролізного елементу $125270,3 \text{ см}^2$ (помаранчева, червона та зелена лінії), і 1-го електролізера, який має площу електролізного елементу 375811 см^2 (фіолетова лінія) з піковою потужністю $1054,1243 \text{ кВт}$ після оптимізації

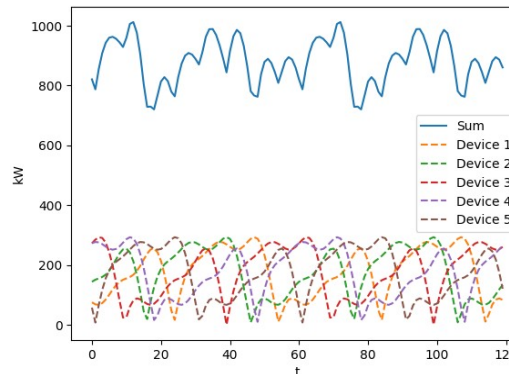


Рис. 12. Потужність при використанні 10 ідентичних електролізерів, кожен з яких має площу електролізного елементу $75162,2 \text{ см}^2$ з піковою потужністю $953,4203 \text{ кВт}$ після оптимізації

Висновки

У ході роботи запропоновано рішення з покращення використання безмембранних монополярних електролізерів високого тиску одночасним застосуванням декількох електролізерів з оптимізованою чергою запуску.

Визначено цільову функцію оптимізації та аргументовано використання стохастичних методів для оптимізації черги запуску електролізерів. Застосування генетичного алгоритму дозволило отримати наближено оптимальні результати за фіксовану кількість ітерацій.

Розглянуто задачу із заміщення традиційної системи опалення житлового кварталу на систему, що працює на основі водневих котлів. За результатами доведено доцільність оптимізації. Як показано на прикладі задачі з розміщенням десяти електролізерів, оптимізована черга запуску забезпечила зниження пікового енергоспоживання більш ніж на 34%. При цьому обчислювальна складність залишалася сталою: використовувалося 100 ітерацій на наборі зі 100 комбінацій, що задається як гіперпараметр, на відміну від повного перебору 10^{60} можливих варіантів із кроком в одну хвилину.

Результати розрахунків демонструють, що задачу масштабування водневої системи з монополярних електролізерів можна успішно розв'язувати стохастичними методами, враховуючи сучасні обчислювальні можливості й якість підібраних гіперпараметрів генетичного алгоритму. За необхідності це рішення можна використовувати як частину системи управління й інтегрувати в промислові задачі видобутку водню.

Для подальшого вдосконалення необхідна розробка повноцінної системи управління. Система управління повинна забезпечувати автоматичне створення апроксимацій відповідно до паспортних даних електролізерів, для яких проводяться обчислення, і надавати зручний функціонал для моніторингу якості й управління системою.

Розробка системи управління на основі генетичного алгоритму сприяє підвищенню ефективності функціонування водневої енергосистеми, зменшенню експлуатаційних витрат, оптимізації робочих процесів і забезпеченню практичної інтеграції алгоритмів оптимізації в реальні інженерні рішення.

Література

1. El-Shafie M. Hydrogen production by water electrolysis technologies: A review. *Results in Engineering*. 2023. Vol. 20. Article 101426. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101426>.
2. Ноздренков В. С., Дяговченко І. М., Петровський М. В. Методологія аналізу впливу електромобілів на розподільчу мережу: теоретичний підхід. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність*. 2024. № 2 (9). С. 36–46. [https://doi.org/10.20998/EERE.2024.2\(9\).317648](https://doi.org/10.20998/EERE.2024.2(9).317648).
3. Ноздренков В. С., Дяговченко І. М., Петровський М. В., Волохін В. В. Модель оцінювання старіння розподільних трансформаторів за допомогою нечіткої логіки. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність*. 2024. № 1 (8). С. 86–93. <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2024.01.07>.
4. Almutairy N. M., Alawami A. T. Bidding optimization for hydrogen production from an electrolyzer. *Materials Research Proceedings*. 2024. Vol. 43. P. 214–222. <https://doi.org/10.21741/9781644903216-28>.
5. Yu D., Yang P., Zhu W. Capacity optimization of photovoltaic storage hydrogen power generation system with peak shaving and frequency regulation. *Sustainable Energy Research*. 2025. Vol. 12. Article 3. <https://doi.org/10.1186/s40807-024-00141-z>.
6. Liu Q., Zhou Z., Chen J., Zheng D., Zou H. Optimization operation strategy for comprehensive energy system considering multi-mode hydrogen transportation. *Processes*. 2024. Vol. 12. Iss. 12. Article 2893. <https://doi.org/10.3390/pr12122893>.
7. Alamir N., Kamel S., Abdelkader S. Stochastic multi-layer optimization for cooperative multi-microgrid systems with hydrogen storage and demand response. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2025. Vol. 100. P. 688–703. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.12.244>.
8. Yang Y., Yan H., Wang J. The multi-objective distributed robust optimization scheduling of integrated energy systems considering green hydrogen certificates and low-carbon demand response. *Processes*. 2025. Vol. 13. Iss. 13. Article 703. <https://doi.org/10.3390/pr13030703>.
9. Соловей В. В., Зипунников Н. Н., Шевченко А. А. Исследование эффективности электродных материалов в электролизных системах с раздельным циклом генерации газов. *Проблемы машиностроения*. 2015. Т. 18. № 2. С. 72–76.

10. Solovey V. V., Shevchenko A. A., Zipunnikov M. M., Kotenko A. L., Khiem N. T., Tri B. D., Hai T. T. Development of high pressure membraneless alkaline electrolyzer. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. Vol. 47. Iss. 11. P. 6975–6985. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.01.209>.
11. Solovey V., Zipunnikov M., Shevchenko A., Vorobjova I., Kotenko A. Energy effective membrane-less technology for high pressure hydrogen electrochemical generation. *French-Ukrainian Journal of Chemistry*. 2018. Vol. 6. No. 1. P. 151–156. <https://doi.org/10.17721/fujcV6I1P151-156>.
12. Аналіз та експертиза проєктів енергопостачання: Розрахункова робота [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 144 «Теплоенергетика»; уклад.: Шовкалюк М. М., Яценко О. І. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 69 с. <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/bd6520ce-ab16-40d7-9c30-cfe31e6b2c56/content>.
13. Heat values of various fuels. World Nuclear Association: official website. 2020. <https://world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/heat-values-of-various-fuels>.
14. Chayalakshmi C. L., Jangamshetti D. S., Sonoli S. Boiler efficiency estimation from hydrogen content in fuel. Proceedings of the 4th International Conference on Advances in Computing, Communication, and Informatics (ICACCI), (India, Kochi). 2015. P. 1107–1110. <https://doi.org/10.1109/ICACCI.2015.7275758>.
15. Тумбрукакі А. В., Кушнірук А. С., Неद्याлкова К. В. Елементи комбінаторики та біном Ньютона: методичні рекомендації для організації самостійної роботи та дистанційного навчання за курсом «Елементарна математика» здобувачів вищої освіти за першим (бакалаврським) рівнем спеціальності 014 Середня освіта (Математика). Одеса: ФОП Бондаренко М. О., 2020. 35 с. <https://dspace.pdpu.edu.ua/bitstream/123456789/9904/1/Kombinatoryka.pdf>.
16. Bansal J. C., Bajpai P., Rawat A., Nagar A. K. Sine cosine algorithm for optimization. Springer Singapore, 2023. 108 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-9722-8>.
17. Axelrod R. Genetic algorithm. *Wikipedia*. 2025. https://en.wikipedia.org/wiki/Genetic_algorithm.

Надійшла до редакції 08.03.2025