

УДК 621.311.61::[621.352.6:621.316.728]

О.Ю. Колларов, канд. техн. наук,  
Донецький національний технічний університет, м. Красноармійськ, Україна  
kollarov@ukr.net

## Інтелектуальне керування автономною установкою електроживлення із воднево-кисневим паливним елементом

Запропоновано концепцію підвищення ефективності передавання максимальної потужності споживачу від воднево-кисневого паливного елемента, в рамках автономної системи електроживлення, що базується на застосуванні інтелектуальної системи екстремального керування із еталонною моделлю об'єкта на базі штучних нейронних мереж прямого поширення та пошуковим алгоритмом для знаходження екстремуму передавання потужності.

**Ключові слова:** автономна система електроживлення, воднево-кисневий паливний елемент, нейронна мережа, ряд Фур'є.

### Введення

Вичерпність традиційних джерел енергії та постійне зростання їх вартості сприяють використанню альтернативних джерел, що знайшло своє віддзеркалення в енергетичній політиці України, основними положеннями якої є екологічна безпека, науково-технічне забезпечення розвитку альтернативної енергетики, популяризація науково-технічних досягнень у цій сфері та підготовка відповідних фахівців у вищих і середніх навчальних закладах України.

Всім, вище зазначеним, вимогам відповідає автономна система електроживлення (АСЕЖ) із воднево-кисневим паливним елементом (ВКПЕЛ) у якості первинного джерела електричної енергії, до основних переваг якого відноситься високий коефіцієнт корисної дії (ККД) та екологічність, адже при функціонуванні джерела, у повітря виділяється лише вода у газоподібному та/або рідкому стані.

Питання передавання максимальної енергії від ВКПЕЛ до навантаження досі залишається відкритим через нелінійність внутрішнього опору джерела, багатомірність та різноманітність взаємозв'язків між його змінними стану, наявністю енергетичних витрат на периферійні компоненти, тощо.

Незважаючи на значний прогрес в сфері керування багатовимірними нелінійними об'єктами, методи такого керування знаходяться в стані активного розвитку, адже багато величин, які впливають на функціонування об'єктів систем керування, не піддаються точному вимірюванню, що вимагає ідентифікації таких величин.

Отже, подальша розробка та удосконалення методів ідентифікації ВКПЕЛ, аналіз і синтез систем керування АСЕЖ, з метою реалізації передавання максимальної потужності від ВКПЕЛ

до навантаження, є актуальною науково-практичною задачею.

Для керування роботою АСЕЖ із ВКПЕЛ застосовуються комбінації нелінійних систем із адаптивними [1 - 8]. Втім, подібні системи управління забезпечують передавання максимальної потужності від ВКПЕЛ до навантаження за конкретних умов функціонування джерела і безпосередньо не впливають на параметри його роботи, що може стати перепоною на шляху наближення до об'єктивно максимального передавання енергії.

З вище наведеного випливає основна мета дослідження - запропонувати нову концепцію підвищення ефективності передавання максимальної потужності споживачу від воднево-кисневого паливного елемента в рамках автономної системи електроживлення.

### Опис

Зважаючи на необхідність ідентифікації фізичних змінних стану ВКПЕЛ, пропонується застосування саме інтелектуальної системи екстремального керування (ІСЕК) (рис. 1), де критерій оптимальності знаходиться і підтримується за допомогою пошукового алгоритму.

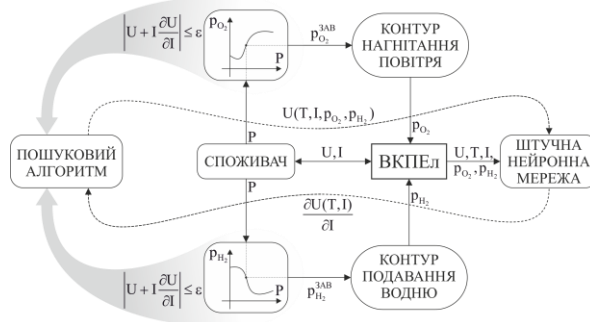


Рисунок 1 - Функціональна схема ІСЕК АСЕЖ із ВКПЕЛ

При цьому пошукові рухи здійснюються на математичній моделі об'єкта керування. На підставі заздалегідь визначеної залежності, з урахуванням найбільш суттєвих збурень в системі, розраховується завдання на управляючу дію для контурів регулювання периферійними компонентами джерела.

Приймаючи силу струму і температуру джерела у якості дій, що збурюють, критерій якості системи керування передаванням максимальної потужності від ВКПЕЛ до навантаження можна представити у вигляді інтегрального функціоналу

$$\min_{\{P(I), p_{O_2}(I), p_{H_2}(I)\}} J = \int_0^{I^1} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial P}{\partial I}\right)^2} + \dots \dots + \left(\frac{\partial p_{O_2}}{\partial I}\right)^2 + \left(\frac{\partial p_{H_2}}{\partial I}\right)^2 dI \tag{1}$$

за виконання наступних умов:

$$F(P, p_{H_2}, p_{O_2}, I, T) = 0, \left| \frac{\partial P(p_{H_2}, p_{O_2}, I, T)}{\partial I} \right| \leq \epsilon, \frac{\partial P(I^0)}{\partial I} \approx 0, \frac{\partial P(I^1)}{\partial I} \approx 0 \tag{2}$$

де P – потужність;  $\epsilon$  – точність мінімізації інтегрального функціоналу;  $p_{H_2}, p_{O_2}$  - водневий та кисневий тиски, відповідно.

Суть інтегрального функціоналу (1) полягає у пошуку такої функціональної залежності між потужністю ВКПЕЛ, водневим та кисневим тисками на електродах, за яких поточна потужність навантаження буде знаходитись поблизу точки максимуму потужнісної характеристики ВКПЕЛ (рис. 2).

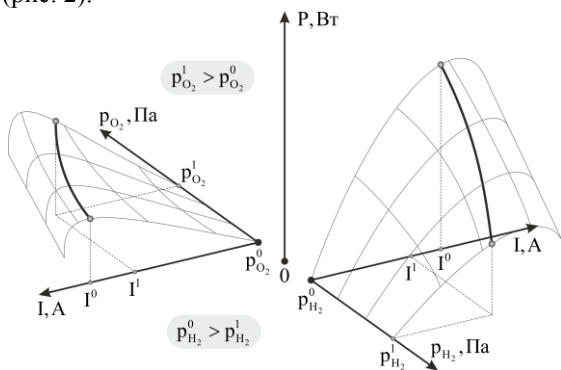


Рисунок 2 - Графічна інтерпретація Функціоналу

Мінімізувати функціонал (1) аналітичним шляхом вкрай складно, тим більше, що водневий

та кисневий тиски обмежені за своїми значеннями в силу конструктивних особливостей ВКПЕЛ, а перша похідна потужності по силі струму має, лише, приблизно дорівнювати нулю, бо досягти абсолютної рівності нулю неможливо виходячи із властивостей ВКПЕЛ.

Одним зі шляхів мінімізації функціоналу (1) є застосування чисельних методів до умов його розв'язання (2), які можна представити у вигляді системи рівнянь (3)

$$\begin{cases} U(\cdot) = \frac{P_I}{I}, \\ \left| U(\cdot) + I \frac{\partial U(\cdot)}{\partial I} \right| \leq \epsilon \end{cases} \tag{3}$$

де  $(\cdot) \rightarrow (p_{H_2}, p_{O_2}, I, T)$ .

Розв'язання системи рівнянь (3) вимагає ідентифікації ВКПЕЛ, адже його параметри залежать від часу функціонування. Найбільш ефективним способом ідентифікації нелінійних та нестационарних об'єктів є застосування штучних нейронних мереж, адже їх використання в системах автоматичного управління є перспективним з точки зору адаптивності, відмовостійкості та багатовимірності [9].

Застосовувати пошуковий алгоритм безпосередньо до ВКПЕЛ небезпечно через загрозу «кисневого та/або водневого голодування» комірок, тому було запропоновано здійснювати пошукові рухи по еталонній моделі джерела.

На відміну від класичних систем керування із пошуковим алгоритмом, представлена в даній роботі концепція його застосування спрямована на чисельний розрахунок системи рівнянь (3) задля мінімізації функціоналу (1).

Результатом роботи пошукового алгоритму є функціональні залежності між кисневим та водневим тисками і потужністю джерела, за яких поточна потужність навантаження буде знаходитись поблизу точки максимуму на потужнісній характеристиці ВКПЕЛ, тобто просторова лінія задана параметрично відносно потужності  $(p_{H_2}(P), p_{O_2}(P))$  (рис. 3).

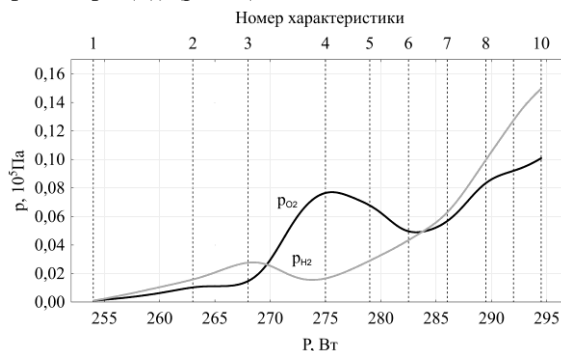


Рисунок 3 - Результат мінімізації інтегрального функціоналу (1)

Ця залежність визначає завдання для контурів регулювання периферійними компонентами з метою забезпечити перехід на потужнішу характеристику джерела, де потужність навантаження буде знаходитись поблизу точки максимуму. На рис. 4 продемонстровано роботу ІСЕК з пошуковим алгоритмом для десяти різних значень поточної потужності (номер характеристики).

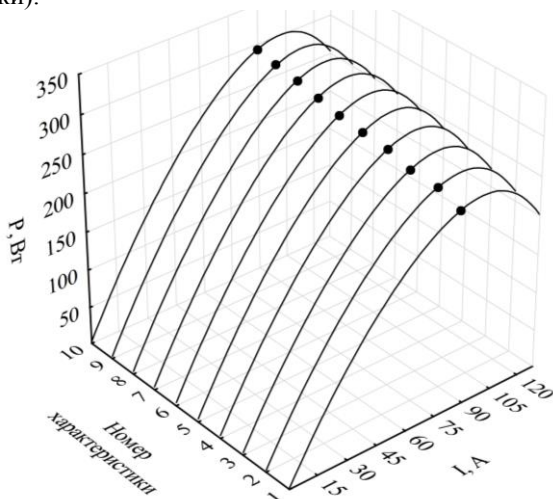


Рисунок 4 - Потужнісні характеристики ВКПЕЛ

Класична автоматизована система керування (АСК) ВКПЕЛ, в рамках АСЕЖ, використовує, у якості управляючих дій, масові потоки реагентів як аналітичні залежності від сили струму, що протікає через ВКПЕЛ. До того ж, кількість реагентів, котрі нагнітаються до ВКПЕЛ, перевищує теоретично необхідну у два – три рази (так званий коефіцієнт стехіометрії), що робиться з метою унеможливити «кисневе та/або водневе голодування» комірок у моменти стрибкоподібної зміни навантаження. На рис. 5 та 6 представлено результат роботи класичної АСК.

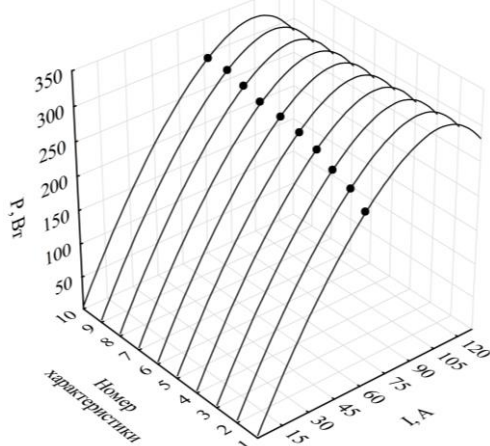


Рисунок 5 - Потужнісні характеристики ВКПЕЛ за різних значень тисків реагентів

Метою створення ІСЕК є забезпечення передавання максимальної потужності від ВКПЕЛ до навантаження. Отже, ефективністю ІСЕК АСЕЖ із ВКПЕЛ є відношення потужності, що передається від джерела навантаженню, до екстремуму потужнісної характеристики.

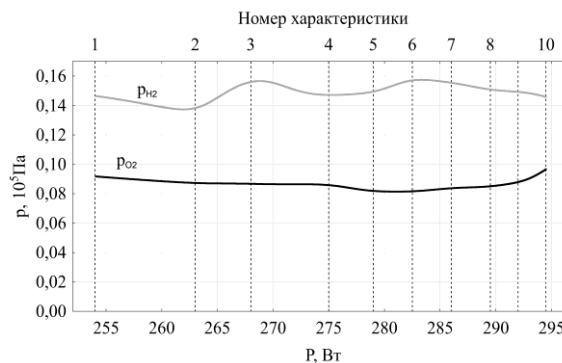


Рисунок 6 - Розподіл тисків реагентів за класичної АСК АСЕЖ із ВКПЕЛ

Порівняльний аналіз даних математичного моделювання із експериментальними дослідженнями АСЕЖ доводить, що застосування пошукового алгоритму, у прив'язці із еталонною моделлю ВКПЕЛ на базі штучних нейронних мереж прямого поширення, підвищує ефективність передавання максимальної потужності на 10%.

Важливим чинником, в плані оптимізації коефіцієнта корисної дії АСЕЖ, є мінімізація енергетичних витрат на роботу периферійних компонентів, зокрема на контур нагнітання повітря, який містить, у своєму складі, повітряний компресор.

Аналіз залежності екстремумів потужнісних характеристик від значень кисневого тиску, за яких досягаються ці екстремуми, показує, що витрати електричної енергії на роботу повітряного компресора, за умов застосування пошукового алгоритму у симбіозі із еталонною моделлю джерела на базі штучних нейронних мереж прямого поширення, становлять 64,5% від енергетичних витрат за класичного керування масовими потоками реагентів ВКПЕЛ. Економія електричної енергії на роботу повітряного компресора у 35,5% обумовлена зменшенням коефіцієнту стехіометрії по кисню.

## Висновки

Теоретичне обґрунтування інтегрального функціоналу передавання максимальної потужності від ВКПЕЛ до навантаження дозволяє визначити функціональні залежності між тисками реагентів та споживаною потужністю навантаження, врахування яких, в системі керування АСЕЖ, підвищило ефективність передавання максимальної потужності, в середньому,

на 10%.

Розроблена інтелектуальна система екстремально-го керування передаванням максимальної потужності від ВКПЕЛ до навантаження, з еталонною моделлю джерела на базі тришарової штучної нейронної мере-

жі прямого поширення та пошуковим алгоритмом, може бути адаптована для ВКПЕЛ широкого діапазону потужності.

### Список використаної літератури

1. Adaptive maximum power point tracking control of fuel cell power plants / Z. Zhi-dan, H. Hai-bo, Z. Xin-jian, C. Guang-yi, R. Yuan // Journal of Power Sources. – 2008. – №176. – P. 259 – 269.
2. Maximum Power Point Tracking for Fuel Cell in Fuel Cell. Battery Hybrid Power Systems / M. Dargahi, J. Rouhi, M. Rezanejad, M. Shakeri // European Journal of Scientific Research. – 2009. – №25(4). – P. 538 – 548.
3. Adaptive inverse control of air supply flow for proton exchange membrane fuel cell systems / L. Chun-hua, Z. Xin-jian, S. Sheng, H. Wan-qi, H. Ming-ruo // Shanghai Univ (Engl Ed). – 2009. – №13(6). – P. 474 – 480.
4. Controlling Pem Fuel Cells Applying A Constant Humidity Technique / Luis A.M. Riascos, Marcelo G. Simoes, Paulo E. Miyagi // ABCM Symposium Series in Mechatronics. – 2008. – №3. – P. 774 – 783.
5. Energy Management Strategy for Embedded Fuel Cell System using Fuzzy Logic / M. Tekin, D. Hissel, M.C. Pera, J.M. Kauffmann // Industrial Electronics. – 2004. – №1. – P. 501 – 506. – ISBN: 0 – 7803 – 8304 – 4.
6. Fault-Tolerant MPC Control of PEM Fuel Cells / Vicenç Puig, Diego Feroldi, Maria Serra, Joseba Quevedo, Jordi Riera // Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control. – Seoul. – July 6 – 11, 2008. – P. 1112 – 1117.
7. Wang Rui-min. Hybrid intelligent PID control design for PEMFC anode system / Rui-min Wang, Ying-ying Zhang, Guang-yi Cao // Journal of Zhejiang University Sciences A. – 2008. – №9(4). – P. 552 – 557.
8. Pukrushpan Jay T. Modeling and Control for PEM Fuel Cell Stack System / Jay T. Pukrushpan, Anna G. Stefanopoulou, Huei Peng // Proceedings of the American Control Conference Anchorage. – 2002. – P. 3117 – 3122.
9. Калашніков В.І. Ідентифікація нелінійних об'єктів систем управління на базі тришарових нейронних мереж наперед визначеної структури / В.І. Калашніков, О.Ю. Колларов // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: 2012. – №3(19). – С. 526 – 527.

Надійшла до редакції 29.09.2015

#### А.Ю. КОЛЛАРОВ

Донецкий национальный технический университет, Украина

#### ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ АВТОНОМНОЙ УСТАНОВКОЙ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ С ВОДОРОДНО-КИСЛОРОДНЫМ ТОПЛИВНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

*Предложена концепция повышения эффективности передачи максимальной мощности потребителю от водородно-кислородного топливного элемента, в рамках автономной системы электропитания, которая базируется на применении интеллектуальной системы экстремального управления с эталонной моделью объекта на базе искусственных нейронных сетей прямого распространения и поисковым алгоритмом для нахождения экстремума передачи мощности.*

**Ключевые слова:** автономная система электропитания, водородно-кислородный топливный элемент, нейронная сеть, ряд Фурье.

#### O. KOLLAROV

Donetsk National Technical University, Ukraine

#### INTELLIGENT CONTROL OF SEPARATE POWER – SUPPLY SYSTEM WITH HYDROGEN – OXYGEN CELLS

*The article is devoted to the increase of transfer efficiency of the maximum power (energy) from the hydrogen-oxygen cell by separate power-supply system. In the capacity of control system we choose the intelligence control system with reference model of object on the basis of artificial feed-forward neural networks and with search algorithm for finding of the extremum of transfer of power from an energy source to the consumer. For identification of the hydrogen-oxygen cell we developed three-layer artificial feed-forward neural networks pre-determined structure, based on the convergence theorem of trigonometric Fourier series.*

**Keywords:** separate power-supply system, the hydrogen-oxygen cell, neural network, the Fourier series.