

УДК 621.311.61::[621.352.6:621.316.728]

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ АВТОНОМНОЮ УСТАНОВКОЮ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ З ВОДНЕВО-КИСНЕВИМ ПАЛИВНИМ ЕЛЕМЕНТОМ

О. Ю. Колларов

Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет»
пл. Шибанкова, 2, м. Красноармійськ, 85302, Україна. E-mail: kollarov@ukr.net; kollarov@gmail.com

Запропоновано нову концепцію підвищення ефективності передавання максимальної потужності (енергії) споживачу від воднево-кисневого паливного елемента в рамках автономної системи електроживлення, що базується на застосуванні інтелектуальної системи екстремального керування з еталонною моделлю об'єкта на базі штучних нейронних мереж прямого поширення та пошуковим алгоритмом для знаходження екстремуму передавання потужності. У результаті реалізації запропонованої концепції отримано теоретичне обґрунтування інтегрального функціоналу передавання максимальної потужності від джерела до споживачів, що дозволило визначити функціональні залежності між тисками реагентів та споживаною потужністю навантаження, врахування яких підвищило ефективність передавання максимальної потужності в середньому на 10 %. Крім цього, вперше запропоновано показові поліноми Гауса та ортогональну багатовимірну систему функцій на їх базі, що дозволило надати штучні нейронні мережі прямого поширення у вигляді багатовимірних функціональних рядів зі скінченною кількістю елементів і дало подальший розвиток методам поліноміальної ідентифікації багатовимірних нелінійних об'єктів систем керування.

Ключові слова: автономна система, воднево-кисневий паливний елемент.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ АВТОНОМНОЙ УСТАНОВКОЙ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ С ВОДОРОДНО-КИСЛОРОДНЫМ ТОПЛИВНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

О. Ю. Колларов

Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет»
пл. Шибанкова, 2, г. Красноармейск, 85302, Украина. E-mail: kollarov@ukr.net; kollarov@gmail.com

Предложена новая концепция повышения передачи максимальной мощности (энергии) потребителю от водородно-кислородного топливного элемента в рамках автономной системы электропитания, основанная 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. В результате реализации предложенной концепции получено теоретическое обоснование интегрального функционала передачи максимальной мощности от источника к потребителям, что позволило определить функциональные зависимости между давлениями реагентов и потребляемой мощностью нагрузки, учет которых повысил эффективность передачи максимальной мощности в среднем на 10 %. Кроме этого, впервые предложены показательные полиномы Гаусса и ортогональная многомерная система функций на их базе, что позволило представить искусственные нейронные сети прямого распространения в виде многомерных функциональных рядов с конечным числом элементов и дало дальнейшее развитие методам полиномиальной идентификации многомерных нелинейных объектов систем управления.

Ключевые слова: автономная система, водородно-кислородный топливный элемент.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Постійно зростаючи потреби людства в електриці та вичерпність традиційних джерел електроенергії сприяють використанню відновлювальних джерел, яскравим представником яких є клас воднево-кисневих паливних елементів (ВКПЕЛ), основні переваги яких – високий коефіцієнт корисної дії та екологічність, адже в процесі їх функціонування у повітря виділяється лише вода.

Питання передавання максимальної енергії від воднево-кисневого паливного елемента до споживачів залишається відкритим через нелінійність внутрішнього опору джерела, багатовимірність та різноманітність взаємозв'язків між його змінними стану, наявністю енергетичних витрат на периферійні компоненти, що підтримують та забезпечують його функціонування (компресори повітря та рециркуляції, система охолодження тощо).

Не заперечуючи значний прогрес у сфері керування багатовимірними об'єктами, способи та мето-

ди такого керування знаходяться в стані активного розвитку через те, що багато величин, які впливають на роботу об'єктів систем керування, не піддаються точному вимірюванню, що вимагає ідентифікації таких величин, і в особливій мірі це стосується воднево-кисневих паливних елементів.

Отже, подальша розробка та вдосконалення методів ідентифікації воднево-кисневих паливних елементів, аналіз і синтез систем керування автономними установками електроживлення з метою реалізації передавання максимальної потужності від воднево-кисневих паливних елементів до споживачів є актуальною науково-практичною задачею.

Для керування роботою автономними установками електроживлення з воднево-кисневими паливними елементами застосовуються комбінації нелінійних та адаптивних систем управління [1–8]. Проте подібні системи управління забезпечують передавання максимальної потужності від воднево-кисневих паливних елементів до споживачів за кон-

критичних умов функціонування джерела й безпосередньо не впливають на параметри його роботи, що може стати перешкодою на шляху наближення до об'єктивно максимального передавання енергії.

Мета роботи – запропонувати нову концепцію підвищення ефективності передавання максимальної потужності споживачу від воднево-кисневого паливного елемента в рамках автономної системи електроживлення.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Зважаючи на необхідність ідентифікації фізичних змінних стану воднево-кисневих паливних елементів, пропонується застосування інтелектуальної системи екстремального керування (рис. 1), де критерій оптимальності знаходиться й підтримується за допомогою пошукового алгоритму. При цьому пошукові рухи здійснюються на математичній моделі об'єкта. На підставі заздалегідь визначеної залежності, з урахуванням збурень у системі, розраховується завдання на управляючу дію для контурів регулювання периферійними компонентами джерела.

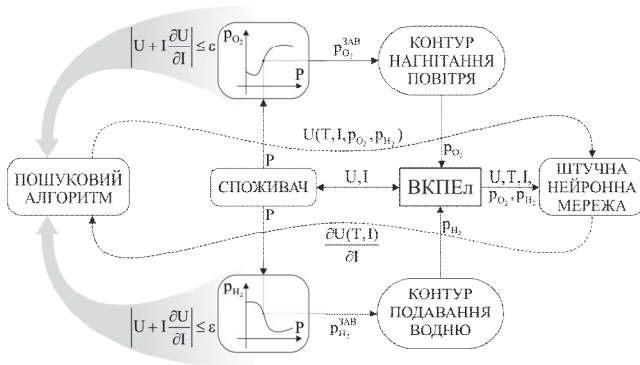


Рисунок 1 – Функціональна схема автономної системи електроживлення з воднево-кисневим паливним елементом

Адекватність математичної моделі джерела була підтверджена шляхом експерименту, що наглядно продемонстровано на рис. 2–5.

Експериментальні дослідження проводились на лабораторній установці автономної системи електроживлення з воднево-кисневим паливним елементом як первинному джерелі електричної енергії потужністю 1 кВт.

Можливість поставити експеримент у рамках наукового стажування надала кафедра «Електричні мережі та альтернативні джерела електричної енергії» факультету «Електротехніка та інформаційна техніка» університету ім. Отто фон Геріке (м. Магдебург, Німеччина).

Специфічний вигляд експериментальних даних, що нагадує просторову криву на тривимірній сітчастій поверхні, обумовлено обмеженнями системи керування експериментальною установкою, деактивація якої була небажана з точки зору безпеки роботи воднево-кисневого паливного елемента. Тому зняти всі можливі робочі точки вищенаведених характеристик не виявилось можливим.

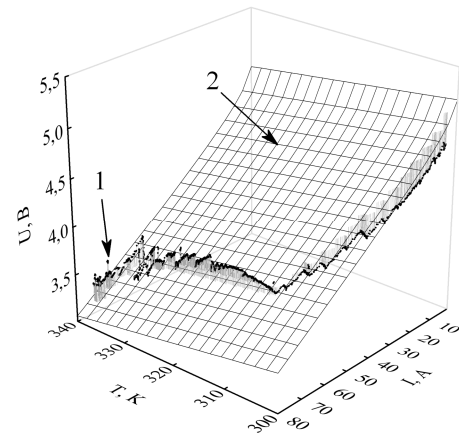


Рисунок 2 – Залежність ВАХ ВКПЕЛ від температури (1 – експериментально отримані дані; 2 – результат математичного моделювання у вигляді сітчастої поверхні)

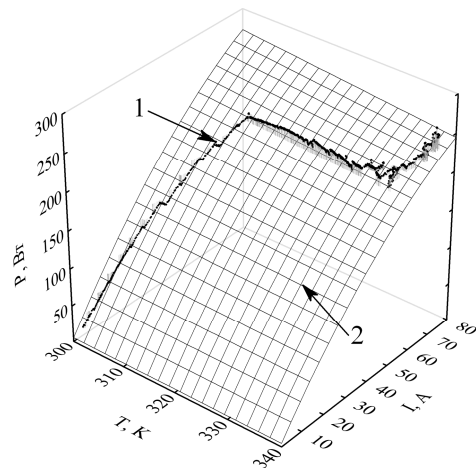


Рисунок 3 – Залежність потужнісної характеристики ВКПЕЛ від температури (1 – експериментально отримані дані; 2 – результат математичного моделювання у вигляді сітчастої поверхні)

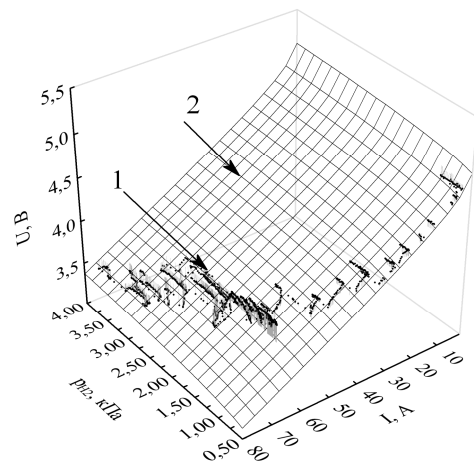


Рисунок 4 – Залежність ВАХ ВКПЕЛ від водневого тиску (1 – експериментально отримані дані; 2 – результат математичного моделювання у вигляді сітчастої поверхні)

Результати експериментальних досліджень демонструють цілковиту збіжність із результатами математичного моделювання роботи воднево-кисневого паливного елемента з протон-обмінною полімерною мембраною. Максимальна відносна похибка при цьому не перевищила 4 % як для потужнісних, так і для вольт-амперних характеристик (ВАХ) джерела.

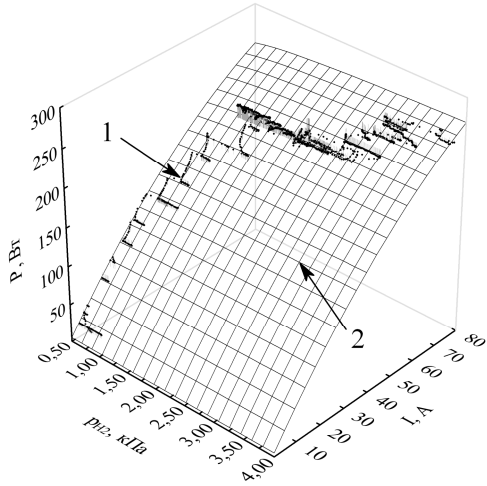


Рисунок 5 – Залежність потужнісної характеристики ВКПЕЛ від водневого тиску (1 – експериментально отримані дані; 2 – результат математичного моделювання у вигляді сітчастої поверхні)

Приймаючи силу струму й температуру джерела як збудовуючі дії, критерій якості системи керування передаванням максимальної потужності від воднево-кисневого паливного елемента до навантаження можна надати у вигляді інтегрального функціоналу

$$\min_{\{P(I), p_{O_2}(I), p_{H_2}(I)\}} J = \int_{I^0}^{I^1} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial P}{\partial I}\right)^2 + \left(\frac{\partial p_{O_2}}{\partial I}\right)^2 + \left(\frac{\partial p_{H_2}}{\partial I}\right)^2} dI \quad (1)$$

за виконання наступних умов:

$$\begin{aligned} F(P, p_{H_2}, p_{O_2}, I, T) &= 0; \\ \left| \frac{\partial P(p_{H_2}, p_{O_2}, I, T)}{\partial I} \right| &\leq \varepsilon; \\ \frac{\partial P(I^0)}{\partial I} &\approx 0; \quad \frac{\partial P(I^1)}{\partial I} \approx 0, \end{aligned} \quad (2)$$

де P – потужність; I – сила струму; T – температура; ε – точність мінімізації інтегрального функціоналу; I^0, I^1 – діапазон інтегрування за струмом; p_{H_2}, p_{O_2} – водневий та кисневий тиски відповідно.

Суть інтегрального функціоналу (1) полягає у пошуку такої багатовимірної функціональної залежності між потужністю воднево-кисневого паливного елемента, водневим та кисневим тисками на його

електродах, за яких поточна (споживана) потужність навантаження буде знаходитись поблизу точки максимуму потужнісної характеристики воднево-кисневого паливного елемента (рис. 6). Іншими словами, потужнісна характеристика джерела підлаштовується під споживану потужність навантаження.

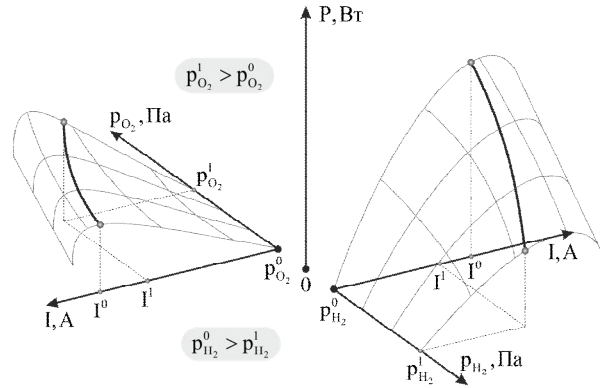


Рисунок 6 – Графічна інтерпретація функціоналу

Мінімізувати функціонал (1) аналітичним шляхом украй складно, тим більше що водневий та кисневий тиски обмежені за своїми значеннями в силу конструктивних особливостей воднево-кисневого паливного елемента, а перша похідна потужності за силою струму має лише приблизно дорівнювати нулю, бо досягти абсолютної рівності нулю неможливо, виходячи з властивостей воднево-кисневого паливного елемента.

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

$$\begin{cases} U(\cdot) = \frac{P_f}{I}; \\ \left| U(\cdot) + I \frac{\partial U(\cdot)}{\partial I} \right| \leq \varepsilon, \end{cases} \quad (3)$$

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

Розв'язання системи рівнянь (3) вимагає ідентифікації воднево-кисневого паливного елемента, 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 та багатовимірності [9, 10].

Проте застосування штучних нейронних мереж передбачає вдалий вибір топології мережі (кількість шарів і нейронів у них, вигляд функцій активації), правильне застосування алгоритму тренування та його параметрів (різновид алгоритму, крок тренування, кількість навчальних образів, швидкість тренування), коректну підготовку даних тренування (фільтрація шумів), що в цілому виглядає як творчий, а не науковий процес.

Враховуючи велику кількість параметрів нейронної мережі, необхідно задатись певними з них, наприклад, функціями активації нейронів, найпоширенішою з яких є функція Гауса:

$$\xi e^{-\frac{(x-i)^2}{2\sigma^2}}, \quad (4)$$

де i – позиція центру; ξ – амплітуда функції; σ – ширина «дзвону».

Створивши на базі функції Гауса парну кусково-періодичну функцію у вигляді функціонального ряду зі скінченною кількістю елементів, отримаємо показниковий поліном Гауса (рис. 7):

$$G(x) = \sum_{i=-\alpha}^{\alpha} (-1)^i e^{-\frac{(x+i)^2}{2\sigma^2}}. \quad (5)$$

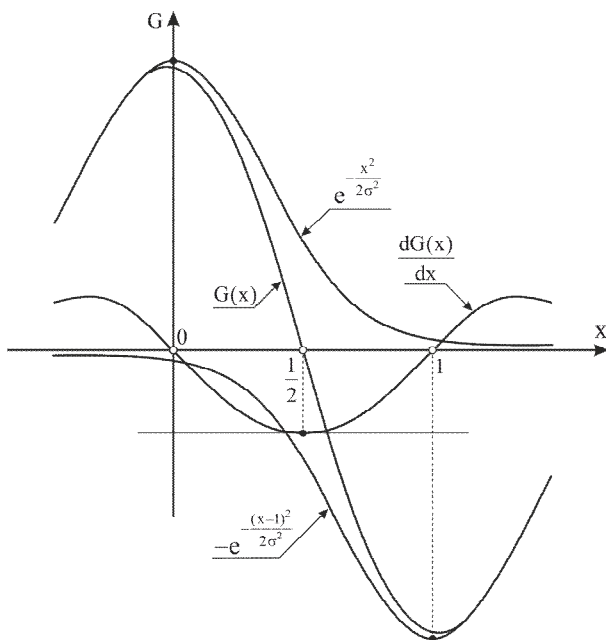


Рисунок 7 – Показниковий поліном Гауса та його перша похідна

Очевидно, що поліном (5) є кусково-періодичним із періодом, що дорівнює двом, а параметр функції (σ) має бути таким, щоб перша похідна показникового полінома Гауса у першій та третій чвертях періоду була максимальною.

Подамо розвинення цільової парної функції (m) змінних у вигляді багатовимірного функціонального ряду (7) по ортогональній багатовимірній системі показникових поліномів Гауса (6) зі скінченною кількістю членів:

$$\begin{aligned} &1, G(\varphi_1 x_1), G(\varphi_2 x_2), \dots, G(\varphi_j x_j), \dots \\ &\dots, G(\varphi_1 x_1) G(\varphi_2 x_2), G(\varphi_1 x_1) G(\varphi_3 x_3), \dots \quad (6) \\ &\dots, \prod_{j=1}^{i, \forall i \neq j} G(\varphi_j x_{k_j}), \text{ де } j = 1 \dots m, \varphi_j = 1 \dots n, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f(x_1, \dots, x_m) &= \omega_0 + \sum_{i=1}^m \sum_{k_i=1}^{m-i+1} \dots \\ &\dots, \sum_{k_i=k_{i-1}+1}^m \sum_{\varphi_1=1}^{\infty} \dots \sum_{\varphi_i=1}^{\infty} \omega_{\varphi_1 \dots \varphi_i}^{k_1 \dots k_i} \prod_{j=1}^{i, \forall i \neq j} G(\varphi_j x_{k_j}), \end{aligned} \quad (7)$$

де m – розмірність об'єкту, що ідентифікується; n – порядок функціонального ряду.

Значення відповідних коефіцієнтів багатовимірного функціонального ряду можна знайти, скориставшись функціоналом Гауса, модифікованим для багатовимірного випадку, за виразами:

$$\begin{aligned} \omega_0 &= \int_0^1 \dots \int_0^1 f(X) dx_1 dx_2 \dots dx_m; \\ \omega_{\varphi_1 \dots \varphi_i}^{k_1 \dots k_i} &= \frac{\int_0^1 \dots \int_0^1 f(X) \prod_{j=1}^{i, \forall i \neq j} G(\varphi_j x_{k_j})}{\int_0^1 \dots \int_0^1 \left(\prod_{j=1}^{i, \forall i \neq j} G(\varphi_j x_{k_j}) \right)^2} \dots \\ &\dots \frac{dx_1 dx_2 \dots dx_m}{dx_1 dx_2 \dots dx_m}. \end{aligned} \quad (8)$$

Якщо рівняння (7) описує багат шарову штучну нейронну мережу прямого поширення, то рівняння (8) дозволяють ініціалізувати її вагові коефіцієнти як невідомі при відповідних членах функціонального ряду.

Проаналізувавши вигляд багатовимірного функціонального ряду (7), очевидно стає топологія штучної нейронної мережі прямого поширення, що складається з трьох прихованих шарів і має не тільки фіксовану кількість нейронів у них, але й наперед визначений вигляд функцій активації.

У цілому можна стверджувати, що штучна нейронна мережа зі структурою, обумовленою рівнянням (7), завжди збігається до цільової функції, за умови виконання теореми Бояничча, для рядів Фур'є двох змінних.

Застосовувати пошуковий алгоритм безпосередньо до воднево-кисневого паливного елементу небезпечно через загрозу «кисневого та/або водневого голодування» комірок, тому було запропоновано здійснювати пошукові рухи за еталонною моделлю джерела.

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

Результатом роботи пошукового алгоритму є функціональні залежності між кисневим та водневим тисками на аноді й катоді воднево-кисневого паливного елемента й потужністю джерела, за яких поточна потужність навантаження буде знаходитись поблизу точки максимуму потужнісної характеристики джерела (рис. 8).

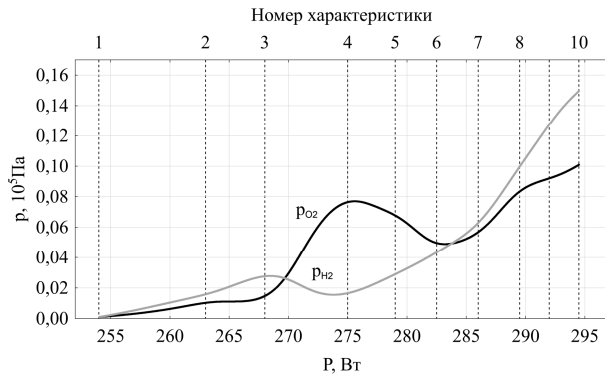


Рисунок 8 – Результат мінімізації функціоналу (1)

На рис. 9 продемонстровано роботу інтелектуальної системи екстремального керування передаванням максимальної енергії з пошуковим алгоритмом для десяти різних значень поточної потужності навантаження (номер характеристики).

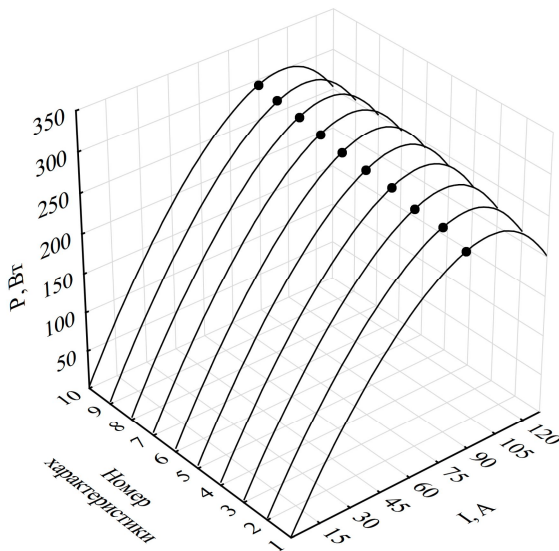


Рисунок 9 – Потужнісні характеристики ВКПЕЛ

Класична система керування воднево-кисневим паливним елементом використовує у функції управляючих дій потоки реагентів як аналітичні залежності від сили струму, що протікає через джерело. До того ж, кількість реагентів, які нагнітаються до джерела, перевищує теоретично необхідну у два-три рази, що робиться з метою унеможливити «кисневе голодування» комірок. На рис. 10 та 11 надано результат роботи класичної системи.

Метою створення інтелектуальної системи екстремального керування є забезпечення передавання максимальної потужності від воднево-кисневого паливного елемента до споживачів. Отже, ефективністю інтелектуальної системи екстремального керування автономною установкою електроживлення з воднево-кисневим паливним елементом є відношення потужності, що передається від джерела навантаженню, до екстремуму потужнісної характеристики.

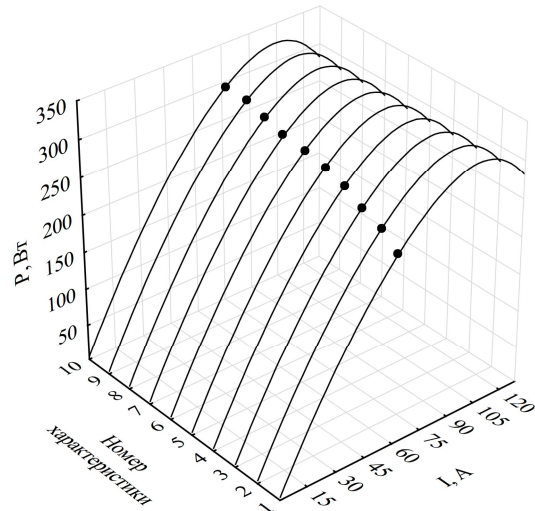


Рисунок 10 – Потужнісні характеристики ВКПЕЛ за різних значень тисків реагентів

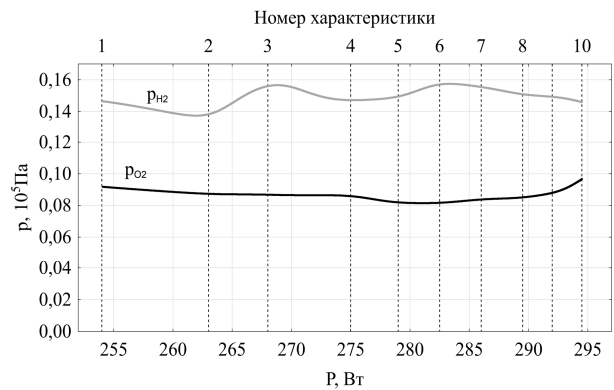


Рисунок 11 – Розподіл тисків реагентів за класичною автоматизованою системою екстремального керування автономною установкою електроживлення з ВКПЕЛ

Порівняльний аналіз даних математичного моделювання з експериментальними дослідженнями автономної системи електроживлення доводить, що застосування пошукового алгоритму, у прив'язці з еталонною моделлю воднево-кисневого паливного елемента на базі штучних нейронних мереж прямого поширення, підвищує ефективність передавання максимальної потужності на 10 %.

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

Розрахунок економії енергетичних витрат (9) на роботу повітряного компресора виконано за припущення пропорційності значення енергетичних витрат (споживаної потужності компресора) для створення тиску на катодному вході паливного елемента значенню самого тиску:

$$\frac{100}{\lambda_{O_2}} \left(1 - \frac{\int_{P_0}^{P_1} p_{O_2}^1(P) dP}{\int_{P_0}^{P_1} p_{O_2}^2(P) dP} \right) = 35,5 \%, \quad (9)$$

де P_0, P_1 – діапазон інтегрування; $p_{O_2}^1$ – залежність кисневого тиску від потужності (рис. 8); $p_{O_2}^2$ – залежність кисневого тиску від потужності (рис. 11); λ_{O_2} – коефіцієнт стехіометрії по кисню ($\approx 1,35$).

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

ВИСНОВКИ. Передавання максимальної потужності від воднево-кисневого паливного елемента до споживачів, у рамках автономної установки електроживлення, ускладнюється нелінійним внутрішнім опором воднево-кисневого паливного елемента, багатовимірністю та різноманітністю взаємозв'язків між його фізичними змінними стану, наявністю енергетичних витрат на функціонування периферійних компонентів. До того ж існуючі способи реалізації передавання максимальної потужності (енергії) не завжди видаються ефективними, адже безпосередньо не впливають на характеристики роботи воднево-кисневого паливного елемента.

Уперше запропоновано показові поліноми Гауса та ортогональну багатовимірну систему функцій на їх базі, що дозволило надати штучні нейронні мережі прямого поширення у вигляді багатовимірних функціональних рядів зі скінченною кількістю елементів і дало подальший розвиток методам поліноміальної ідентифікації багатовимірних нелінійних об'єктів систем керування.

Теоретичне обґрунтування інтегрального функціоналу передавання максимальної потужності від воднево-кисневого паливного елемента до споживачів дозволяє визначити функціональні залежності між тисками реагентів та споживаною потужністю навантаження, врахування яких у системі керування автономною установкою електроживлення підвищило ефективність передавання максимальної потужності в середньому на 10 %.

Розроблена інтелектуальна система екстремального керування передаванням максимальної потужності від воднево-кисневого паливного елемента до

споживачів з еталонною моделлю джерела на базі тришарової штучної нейронної мережі прямого поширення та пошуковим алгоритмом може бути адаптована для воднево-кисневих паливних елементів широкого діапазону потужності.

ЛІТЕРАТУРА

1. Zhi-dan Z., Hai-bo H., Xin-jian Z. et al. Adaptive maximum power point tracking control of fuel cell power plants // *Journal of Power Sources*. – 2008. – Iss. 176. – PP. 259–269.
2. Dargahi M., Rouhi J., Rezanejad M., Shakeri M. Maximum Power Point Tracking for Fuel Cell in Fuel Cell. Battery Hybrid Power Systems // *European Journal of Scientific Research*. – 2009. – Iss. 25 (4). – PP. 538–548.
3. Chun-hua L., Xin-jian Z., Sheng S. et al. Adaptive inverse control of air supply flow for proton exchange membrane fuel cell systems // *Shanghai Univ (Engl. Ed.)*. – 2009. – Iss. 13 (6). – PP. 474–480.
4. Riascos L., Simoes M., Miyagi P. Controlling Pem Fuel Cells Applying A Constant Humidity Technique // *ABCm Symposium Series in Mechatronics*. – 2008. – Iss. 3. – PP. 774–783.
5. Tekin M., Hissel D., Pera M.C., Kauffmann J.M. Energy Management Strategy for Embedded Fuel Cell System using Fuzzy Logic // *Industrial Electronics*. – 2004. – Iss. 1. – PP. 501–506. – ISBN: 0 – 7803 – 8304 – 4.
6. Puig V., Feroldi D., Serra M. et al. Fault-Tolerant MPC Control of PEM Fuel Cells // *Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control*. – Seoul. – July 6, 11, 2008. – PP. 1112–1117.
7. Wang R., Zhang Y., Cao G. Hybrid intelligent PID control design for PEMFC anode system // *Journal of Zhejiang University Sciences A*. – 2008. – Iss. 9 (4). – PP. 552–557.
8. Pukrushpan J.T., Stefanopoulou A.G., Peng H. Modeling and Control for PEM Fuel Cell Stack System // *Proceedings of the American Control Conference Anchorage*. – 2002. – PP. 3117–3122.
9. Калашніков В.І., Колларов О.Ю. Ідентифікація нелінійних об'єктів систем управління на базі тришарових нейронних мереж наперед визначеної структури // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи: щоквартальний науково-виробничий журнал*. – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 3/2012 (19). – С. 526–527.
10. Колларов О.Ю. Удосконалення методів керування автономною системою електроживлення із воднево-кисневим паливним елементом // *Сучасні проблеми систем електропостачання промислових та побутових об'єктів: збірник наукових праць І-ої Всеукраїнської науково-технічної конференції викладачів, аспірантів і студентів, 18–19 жовтня 2012 р.* – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2012. – С. 149–150.

INTELLIGENT CONTROL OF AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEM WITH HYDROGEN-OXYGEN CELLS

O. Kollarov

State Higher Educational Institution «Donetsk National Technical University»

pl. Shybankova, 2, Krasnoarmiysk, 85302, Ukraine. E-mail: kollarov@ukr.net; kollarov@gmail.com

There is proposed a new concept of effectiveness increase of maximum power transfer from hydrogen-oxygen fuel cell to the load consisting autonomous power supply system. This concept is based on the use of intellectual extreme management systems with a reference model of the object based on artificial neuron networks and with search algorithm for finding the power transmission extremum. As a result of the proposed concept there was received theoretical justification of integrated functional of maximum power transfer from the source to the load. This allowed defining the functional relationships between the reactants pressures and requisite power of the load, as a consequence of these is an average 10% increase of effectiveness of maximum power transfer. Besides exponential Gauss polynomials and orthogonal multidimensional system based on this polynomial were proposed for the first time, which allowed introducing artificial neural networks in the form of multidimensional series with finite elements, and given the further improvement of polynomial identification's methods of multidimensional nonlinear objects.

Key words: autonomous system, the hydrogen-oxygen fuel cell.

REFERENCES

1. Zhi-dan, Z., Hai-bo, H., Xin-jian, Z. et al. (2008), Adaptive maximum power point tracking control of fuel cell power plants, *Journal of Power Sources*, Vol. 176, pp. 259–269.
2. Dargahi, M., Rouhi, J., Rezanejad, M. and Shakeri, M. (2009), Maximum Power Point Tracking for Fuel Cell in Fuel Cell. Battery Hybrid Power Systems, *European Journal of Scientific Research*, Vol. 25, no. 4, pp. 538–548.
3. Chun-hua, L., Xin-jian, Z., Sheng, S. et al. (2009), Adaptive inverse control of air supply flow for proton exchange membrane fuel cell systems, *Shanghai Univ (Engl Ed)*, Vol. 13, no. 6, pp. 474–480.
4. Riascos, L., Simoes, M. and Miyagi, P. (2008), Controlling Pem Fuel Cells Applying A Constant Humidity Technique, *ABCM Symposium Series in Mechatronics*, no. 3, pp. 774–783.
5. Tekin, M., Hissel, D., Pera, M.C. and Kauffmann, J.M. (2004), Energy Management Strategy for Embedded Fuel Cell System using Fuzzy Logic, *Industrial Electronics*, no. 1, pp. 501–506.
6. Puig, V., Feroldi, D., Serra, M. et al. (2008), Fault-Tolerant MPC Control of PEM Fuel Cells, *Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control*, Seoul, pp. 1112–1117.
7. Wang, R., Zhang, Y. and Cao, G. (2008), Hybrid intelligent PID control design for PEMFC anode system, *Journal of Zhejiang University Sciences A*, Vol. 9, no. 4, pp. 552–557.
8. Pukrushpan, J.T., Stefanopoulou, A.G. and Peng, H. (2002), Modeling and Control for PEM Fuel Cell Stack System, *Proceedings of the American Control Conference Anchorage*, pp. 3117–3122.
9. Kalashnikov, W.I. and Kollarov, O.Iu. (2012), *Identyfikatsiia neliniynykh obyektiv system upravlinnya na bazi trysharovykh neironnykh merezh napered vyznachenoї struktury* [Nonlinear control system objects identification based on preset structure neural networks], *Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy*, Vol. 3, no. 19, pp. 526–527. (in Ukrainian)
10. Kollarov, O.Yu. (2012), "Perfection of management technology by autonomous supply with hydrogen-oxygen fuel cells", *Suchasni problemy system elektropostachannya promyslovykh ta pobutovykh obyektiv. Zbirnyk naukovykh prats I-oi vseukrainskoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii vykladachiv, aspirantiv i studentiv* [Modern problems of power supply systems of industrial and household objects. Proceedings of the I-st All-Ukrainian Research and Technical conference of teachers and students], Donetsk, October 18–19, pp. 149–150. (in Ukrainian)

Стаття надійшла 15.11.2015.