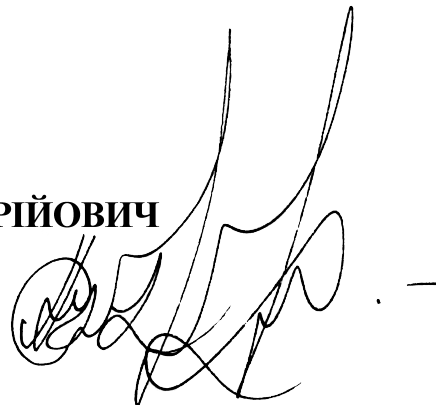


**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»**

КОЛЛАРОВ ОЛЕКСАНДР ЮРІЙОВИЧ



УДК 621.311.61::[621.352.6:621.316.728]

**КЕРУВАННЯ АВТОНОМНИМИ СИСТЕМАМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ
ІЗ ВОДНЕВО-КИСНЕВИМИ ПАЛИВНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ
НА БАЗІ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ**

Спеціальність 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Донецьк – 2013

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі систем програмного управління і мехатроніки ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» Міністерства освіти і науки України, м. Донецьк.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Калашніков Віктор Іванович,
ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри систем програмного управління і мехатроніки, м. Донецьк.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Орловський Ігор Анатолійович,
Запорізький національний технічний університет
Міністерства освіти і науки України,
професор кафедри електропривода та автоматизації
промислових установок, м. Запоріжжя;

кандидат технічних наук, доцент
Коренькова Тетяна Валеріївна,
Кременчуцький національний університет імені
Михайла Остроградського Міністерства освіти і
науки України,
доцент кафедри систем автоматичного управління і
електропривода, м. Кременчук.

Захист відбудеться «7» листопада 2013 р. о 13:15 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 11.052.02 в ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» за адресою: 83001, м. Донецьк, вул. Артема, 58, навчальний корпус № 8, ауд. 210.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» за адресою: 83001, м. Донецьк, вул. Артема, 58, навчальний корпус №2.

Автореферат розісланий « » вересня 2013 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 11.052.02



А.М. Ларін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність. Екологічні проблеми, вичерпність традиційних джерел енергії та постійне зростання їх вартості сприяють використанню альтернативних джерел енергії, що знайшло своє відображення в Законі України «Про альтернативні джерела енергії», до основних засад якого належить додержання екологічної безпеки, науково-технічне забезпечення розвитку альтернативної енергетики, популяризація та впровадження науково-технічних досягнень у цій сфері, підготовка відповідних фахівців у вищих та середніх навчальних закладах України.

Всім, вище зазначеним, вимогам відповідає автономна система електроживлення (АСЕЖ) із воднево-кисневим паливним елементом (ВКПЕл, далі по тексту, також, – джерело) у якості первинного джерела електричної енергії. До основних переваг ВКПЕл відноситься високий коефіцієнт корисної дії (ККД), що досягається через пряме перетворення енергії хімічної реакції в електричну та екологічність, адже, при функціонуванні джерела, у повітря виділяється лише вода у газоподібному та/або рідкому стані.

Головною задачею будь-якої АСЕЖ є передавання споживачу необхідної кількості електричної енергії нормованої якості. Питання передавання максимальної потужності (енергії) від ВКПЕл до навантаження, в рамках АСЕЖ, досі залишається відкритим через складність його реалізації, обумовлену нелінійним внутрішнім опором джерела, багатовимірністю та різноманітністю взаємозв'язків між фізичними змінними стану ВКПЕл, наявністю енергетичних витрат на функціонування периферійних компонентів (компресор нагнітання повітря, система охолодження, тощо), загрозою «кисневого та/або водневого голодування» джерела, ефектом не симетричного «старіння» комірок і конструктивними відмінностями між ними, що не тільки впливає на кількість атомів реагентів, які приймають участь у хімічній реакції «холодного згорання» водню, але й вимагає, час від часу, оновлення параметрів ВКПЕл, для коректного функціонування автоматизованої системи керування (АСК) АСЕЖ.

Незважаючи на значний прогрес в сфері оптимального 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 їх ідентифікації, як на базі методів теорії наближення функції (задача апроксимації або, як окремих випадок, задача інтерполяції), так і на базі методів теорії штучного інтелекту.

Зважаючи, щонайменше, на п'ятивимірність ВКПЕл і маючи на меті мінімізацію обчислювальних ресурсів системи керування АСЕЖ, доцільним є застосування саме інтелектуальної ідентифікації джерела на базі штучних нейронних мереж (ШНМ), через кумулятивний характер останніх. Втім, якість такої ідентифікації залежить, крім іншого, від топології ШНМ, вибір якої більше скидається на творчій, ані науковий процес.

Таким чином, подальша розробка та удосконалення методів інтелектуальної ідентифікації ВКПЕл, як багатовимірних нелінійних об'єктів підвищеної складності, аналіз і синтез АСК АСЕЖ, з метою реалізації передавання максимальної потужності від ВКПЕл до навантаження, є актуальною науково-практичною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Науково-технічні розробки в частині застосування інтелектуального керування передаванням максимальної потужності від ВКПЕЛ до навантаження здійснено в рамках вирішення комплексної проблеми «Наукові основи електроенергетики» при виконанні держбюджетної науково-дослідної роботи Д-12-07 «Оптимізація режимів роботи вітрогенераторних установок із застосуванням нейроадаптивного регулятора потужності та системи векторного регулювання моменту асинхронного генератора» (номер державної реєстрації – 0107U001481). Теоретичні дослідження, в рамках даної роботи, виконано у ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» згідно з науковим напрямком «Інтелектуальне управління електромеханічними системами з урахуванням специфіки об'єктів регулювання». Експериментальні дослідження, в рамках дисертації, здійснено на кафедрі «Електричні мережі та альтернативні джерела електричної енергії» факультету «Електротехніка та інформаційна техніка» університету ім. Отто фон Геріке (м. Магдебург, Німеччина).

Мета і задачі досліджень. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності передавання максимальної потужності споживачу від воднево-кисневого паливного елемента в рамках автономної системи електроживлення.

Для досягнення мети дисертації поставлено наступні задачі:

- 1) розробка узагальненої математичної моделі АСЕЖ, включаючи ВКПЕЛ та периферійні компоненти, що забезпечують його функціонування, задля дослідження роботи АСЕЖ у діапазоні струмів високої щільності;
- 2) теоретичне обґрунтування інтегрального функціоналу передавання максимальної потужності від ВКПЕЛ до навантаження, задля визначення функціональних залежностей між тисками паливних газів та споживаною потужністю навантаження, за яких спостерігається передавання максимальної енергії від ВКПЕЛ до споживача;
- 3) розробка інтелектуальної системи екстремального керування передаванням максимальної потужності від ВКПЕЛ до навантаження, в рамках АСЕЖ, із пошуковим алгоритмом та еталонною моделлю ВКПЕЛ на базі штучних нейронних мереж прямого поширення (ШНМПП);
- 4) розробка кусково-періодичних поліномів та ортогональної багатовимірної системи функцій на їх базі задля представлення ШНМПП у вигляді багатовимірного функціонального ряду зі скінченною кількістю елементів;
- 5) теоретичне обґрунтування ініціалізації вагових коефіцієнтів штучних нейронних мереж прямого поширення через застосування теорем збіжності рядів Фур'є по тригонометричній системі функцій, задля прискорення процесів тренування ШНМ;
- 6) розробка методу визначення структури ШНМПП через вигляд математичних моделей та/або характер даних експериментальних досліджень нелінійних об'єктів систем керування, задля оптимізації обчислювальних ресурсів ІСЕК;
- 7) експериментальна перевірка основних положень дисертаційної роботи.

Об'єкт досліджень – енергетичні процеси в автономній системі електроживлення із воднево-кисневим паливним елементом у якості первинного джерела електроенергії.

Предмет досліджень – керування енергетичними параметрами автономної системи електроживлення із воднево-кисневим паливним елементом на базі штучних нейронних мереж прямого поширення.

Методи дослідження. При розв'язанні поставлених задач використовувались методи емпіричного дослідження, для вивчення ВКПЕл (спостереження, вимірювання, експеримент), та методи теоретичних досліджень, зокрема формалізація, для побудови узагальненої математичної моделі АСЕЖ, системний підхід, для дослідження АСЕЖ як єдиного цілого, теорія штучного інтелекту, для реалізації процесу ідентифікації ВКПЕл, теорія автоматичного керування, для аналізу і синтезу ІСЕК АСЕЖ, математичний аналіз, теорія рядів та теорія наближення функцій, для розробки і удосконалення поліноміальних методів ідентифікації нелінійних багатовимірних об'єктів систем керування.

Наукова новизна одержаних результатів. Результати дисертаційної роботи містять наступну наукову новизну:

- 1) вперше теоретично обґрунтовано інтегральний функціонал передавання максимальної потужності від воднево-кисневого паливного елемента до навантаження, що дозволило вирахувати значення тисків паливних газів, за яких споживана потужність навантаження знаходиться поблизу точки максимуму потужнісної характеристики ВКПЕл;
- 2) знайшли подальший розвиток методи поліноміальної ідентифікації багатовимірних нелінійних об'єктів систем керування, через розробку показникових поліномів Гауса та ортогональної багатовимірної системи функцій на їх базі, що дозволило представити математичну модель ВКПЕл у вигляді багатовимірного функціонального ряду зі скінченою кількістю елементів;
- 3) вперше теоретично обґрунтовано ініціалізацію вагових коефіцієнтів штучних нейронних мереж прямого поширення через застосування теорем збіжності рядів Фур'є по тригонометричній системі функцій, що дозволило задати напрям гарантованого збігу ШНМ до цільової функції;
- 4) знайшли подальший розвиток методи визначення структури ШНМ через вигляд математичних моделей та/або характер даних експериментальних досліджень об'єктів систем керування, включаючи об'єкти, перехідна функція яких містить неусувні точки розриву не вище першого роду, що дозволило виокремити фізичні змінні стану ВКПЕл та оптимізувати обчислювальні ресурси ІСЕК.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено узагальнену математичну модель АСЕЖ, включаючи ВКПЕл та усі периферійні компоненти, які забезпечують його функціонування, що дозволяє досліджувати роботу АСЕЖ в діапазоні струмів високої щільності.

Отримано закономірності, які відбивають взаємозв'язок між дифузійним падінням напруги, іонною провідністю полімерної мембрани і втратами тиску на електродах ВКПЕл, що дозволяє врахувати геометрію полімерної мембрани та електродів джерела в процесах математичного моделювання.

Розроблено пошукову інтелектуальну систему екстремального керування передаванням максимальної потужності від ВКПЕл до навантаження, в рамках АСЕЖ, з еталонною моделлю ВКПЕл на базі тришарової ШНМПП, яку може бути адаптовано для джерел широкого діапазону потужності.

Розроблені, в рамках дисертації, інтелектуальні методи ідентифікації багатовимірних нелінійних об'єктів систем керування на базі тришарових ШНМПП прийнято до впровадження у ТОВ ТПФ «ДОНТЕХПРОМ» м. Донецька для визначення залежності

коефіцієнта механічної потужності вітроустановки від швидкості та кута повороту лопаті, що підвищило точність еталонної моделі механічної складової вітроелектростанції.

Результати дисертаційної роботи впроваджено у навчальному процесі на кафедрі «Системи програмного управління і мехатроніка» ДВНЗ «Донецький національний технічний університет».

Особистий внесок здобувача. Наукові положення та прикладні результати, які вносяться на захист, належать особисто авторові і полягають у вирішенні поставленого науково-практичного завдання забезпечити передавання максимальної потужності від воднево-кисневого паливного елемента до споживача, в рамках АСЕЖ, через розробку і застосування інтелектуального керування на базі ШНМ прямого поширення.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи і результати досліджень доповідалися і обговорювалися на 5 (п'яти) науково-технічних конференціях, зокрема на всеукраїнській науково-технічній конференції «Електромеханіка, Енергетика, Електротехніка» ДВНЗ «ДонНТУ» (Донецьк, 2007р.), міжнародній науково-технічній конференції «Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації» Кременчуцького державного політехнічного університету ім. Михайла Остроградського (Кременчук, 2008р.), міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» НТУ «Харківський політехнічний інститут» (Миколаївка, 2008р.), міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського (Миколаївка, 2012р.), на всеукраїнській науково-технічній конференції викладачів, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми систем електропостачання промислових та побутових об'єктів» ДВНЗ «ДонНТУ» (Донецьк, 2012р.).

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи висвітлено у 8 друкованих наукових працях, з яких 6 опубліковано у наукових фахових виданнях України, з-поміж них 4 у збірниках наукових праць та 2 у науково-прикладних журналах. Без співавторства виконано 3 наукові праці.

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Повний обсяг дисертації складає 207 сторінок, з них: 73 рисунки по тексту, 1 рисунок на 1 окремій сторінці; 6 таблиць по тексту; 112 найменувань використаних літературних джерел на 12 сторінках; 5 додатків на 50 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Перший розділ «Аналіз розробок з керування автономними системами електроживлення із воднево-кисневими паливними елементами» присвячено аналізу розробок з керування АСЕЖ із ВКПЕл (рис. 1) в сенсі передавання максимальної потужності від ВКПЕл до навантаження. Зокрема встановлено, що: запорукою наближення до передавання максимальної потужності є одночасне керування водневим і кисневим потоками з урахуванням температури ВКПЕл. При цьому доцільніше управляти тиском реагентів, ані їх масовими витратами, адже саме тиск реагентів визначає рівень напруги на клеммах джерела; класичний підхід у передаванні максимальної потужності від ВКПЕл до навантаження, а саме використання перетворювачів напруги для пошуку екстремуму потужнісної характеристики в функції сили струму, не вирішує питання у повному обсязі,

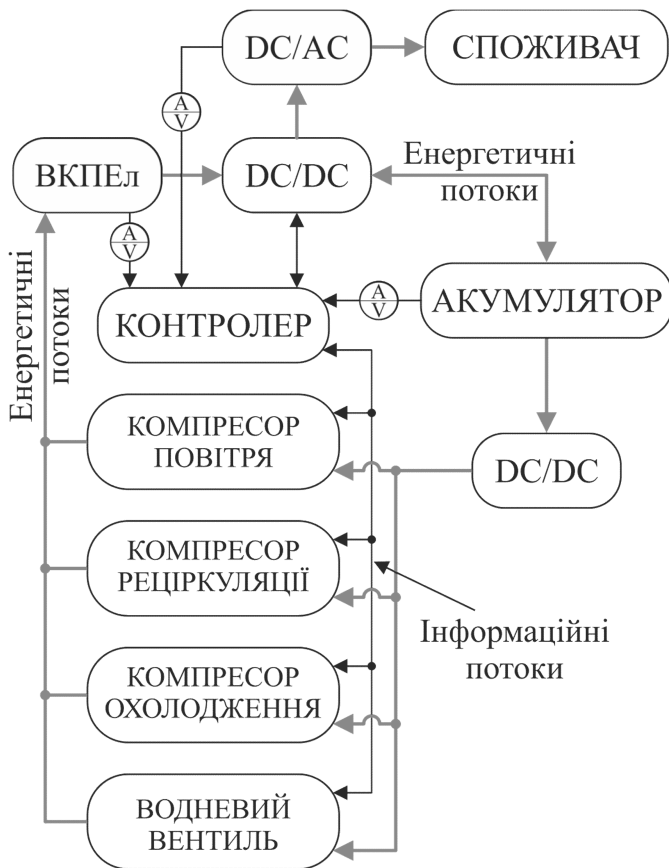


Рисунок 1 – Функціональна схема АСЕЖ із ВКПЕЛ

реалізації інтегрального функціоналу передавання максимальної потужності в рамках АСЕЖ, дослідження роботи якої, в діапазоні струмів високої щільності, вимагає розробки її узагальненої математичної моделі через загрозу «кисневого та/або водневого голодування» ВКПЕЛ, викликану обмеженнями процесів масообміну в джерелі, математичне моделювання яких доцільно реалізовувати, як складову газомеханічних властивостей джерела, що дозволить, крім іншого, врахувати геометрію полімерної протон-обмінної мембрани та електродів ВКПЕЛ.

В плані інтелектуальних підходів до ідентифікації ВКПЕЛ, встановлено, що застосування теорії рядів до штучних нейронних мереж прямого поширення дасть можливість не тільки представити штучну нейронну мережу у вигляді функціонального ряду зі скінченною кількістю елементів, але й вирішити питання ініціалізації вагових коефіцієнтів, через їх розрахунок як невідомих при відповідних членах ряду, та задачу оптимізації структури ШНМ, адже багатовимірний функціональний ряд враховує всі можливі взаємозв'язки між вхідними та вихідними змінними, навіть ті, що об'єктивно відсутні або їх вплив вкрай незначний, а тому, маючи експериментальні дані досліджень властивостей об'єкта, його аналітичну або фізичну модель, можна визначити наявність тих чи інших змінних стану, що підлягають врахуванню при ідентифікації об'єкта керування, а отже і структуру ідентифікуючої штучної нейронної мережі прямого поширення.

Другий розділ «Математична модель автономної системи електроживлення із воднево-кисневим паливним елементом» присвячено математичній моделі АСЕЖ із ВКПЕЛ, структура якої зображена на рис. 2. В роботі запропоновано структуру математи-

адже безпосередньо не впливає на цю характеристику, що вимагає розробки АСК АСЕЖ, як єдиним цілим, включаючи керування периферійними компонентами ВКПЕЛ; АСК має бути адаптивною, адже параметри ВКПЕЛ змінюються із часом його функціонування, і екстремальною, бо основним критерієм оптимальності є забезпечення передавання максимальної потужності; підвищення ефективності передавання максимальної потужності, можливе лише за рахунок оптимального керування периферійними системами ВКПЕЛ, що ставить вимогу теоретичного обґрунтування інтегрального функціоналу передавання максимальної потужності.

Особливої уваги заслуговує математичне моделювання ВКПЕЛ, адже його математична модель має враховувати максимальну кількість фізичних змінних стану, що дозволить дослідити їх вплив на властивості джерела та проаналізувати значущість цього впливу через призму ре-

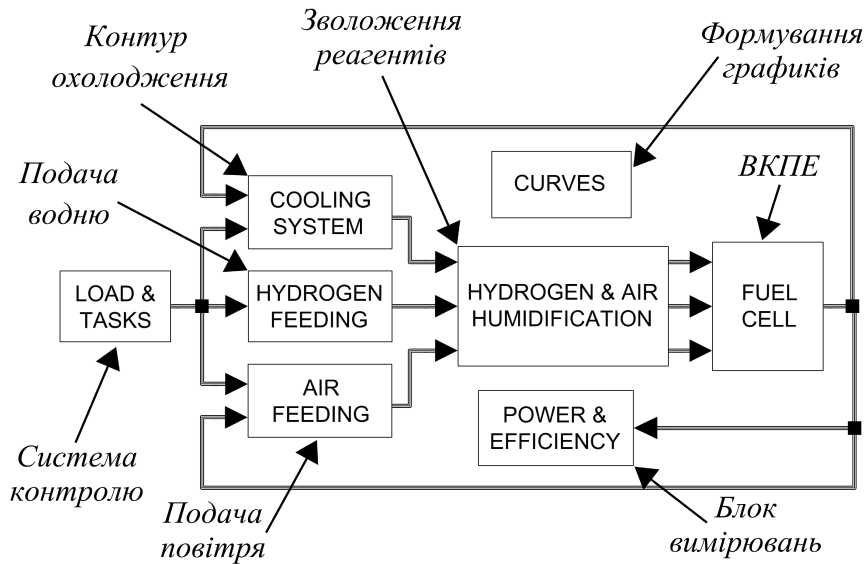


Рисунок 2 – Структура математичної моделі АСЕЖ

втрата та ККД. Термодинаміка ВКПЕЛ включає детальний опис теплового балансу і розрахунок температури комірок, для чого було враховано теплові втрати, температуру реагентів і процес охолодження. Гідродинаміка ВКПЕЛ включає визначення впливу вологості полімерної мембрани і вологості реагентів на вольт-амперну характеристику (ВАХ) ВКПЕЛ. Газова механіка ВКПЕЛ враховує змінювання тиску реагентів, що викликано споживанням паливних газів джерелом, та падіння напруги на клеммах ВКПЕЛ через процеси масообміну в ньому, а саме через дифузійний опір джерела. Крім вище наведеного, виконано моделювання роботи допоміжних компонентів ВКПЕЛ (зволожувачі водню і кисню, система охолодження, контур нагнітання повітря, контур подавання водню) та інших складових АСЕЖ (перетворювач та інвертор напруги).

Слід наголосити, що дифузія паливних газів завжди розглядалась як складова електродинамічних процесів, що враховувалось через граничний струм (1), а це не відповідає фізиці процесів в джерелі у повному обсязі, адже вплив дифузії відбивається зниженням тиску реагентів на електродах ВКПЕЛ (3), що і було враховано в рамках даної роботи (2):

$$U = U_0 + \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{p_{H_2} \sqrt{p_{O_2}}}{p_{H_2O}} \right) - \frac{RT}{nF\alpha} \ln \left(\frac{I}{I_0} \right) - jR_{OM} - \frac{RT}{nF} \ln \left(1 - \frac{I}{I_{GP}} \right), \quad (1)$$

де U_0 – термодинамічна напруга; R – універсальна газова стала; n – кількість електронів; T – температура; F – стала Фарадея; p_{H_2} – парціальний тиск на катоді; p_{O_2} – парціальний тиск на аноді; p_{H_2O} – парціальний тиск водяної пари; α – коефіцієнт перезарядження; I – сила струму; I_0 – сила обмінного струму; R_{OM} – омичний опір; I_{GP} – сила граничного струму.

$$U = U_0 + \frac{RT}{nF} \ln \left[\frac{(p_{H_2} + \Delta p_{H_2}) \sqrt{(p_{O_2} + \Delta p_{O_2})}}{p_{H_2O}} \right] - \frac{RT}{nF\alpha} \ln \left(\frac{I}{I_0} \right) - IR_{OM}; \quad (2)$$

$$\Delta p_{O_2} = \frac{Id_K}{\left| 1 - \frac{C_{H_2O}}{C_{GP}} \right|} \frac{p_K}{\sqrt{T}}, \quad \Delta p_{H_2} = \frac{Id_A}{\left| 1 - \frac{C_{H_2O}}{C_{GP}} \right|} \frac{p_A}{\sqrt{T}}, \quad (3)$$

чної моделі ВКПЕЛ, що враховує всі складові процесів, які йому притаманні, а саме електро-, термо-, гідродинаміку та газову механіку. Електродинаміка включає в себе розрахунок напруги на клеммах ВКПЕЛ через визначення напруги неробочого ходу і загального падіння напруги в залежності від температури комірок, ступеня вологості реагентів та щільності струму.

Також, до електродинаміки увійшов розрахунок потужності, енергетичних

де Δp_{O_2} – дифузійні втрати тиску на катоді; Δp_{H_2} – дифузійні втрати тиску на аноді; C_{H_2O} – концентрація водяної пари; C_{TP} – гранична концентрація водяної пари; d_A – товщина аноду; d_K – товщина катоду; p_A – загальний тиск газів на аноді; p_K – загальний тиск газів на катоді.

Третій розділ «Керування роботою автономної системи електроживлення із воднево-кисневим паливним елементом» присвячено керуванню АСЕЖ із ВКПЕЛ на базі інтелектуальної системи екстремального керування (рис. 3), де критерій оптимальності знаходиться і підтримується за допомогою пошукового алгоритму. 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.

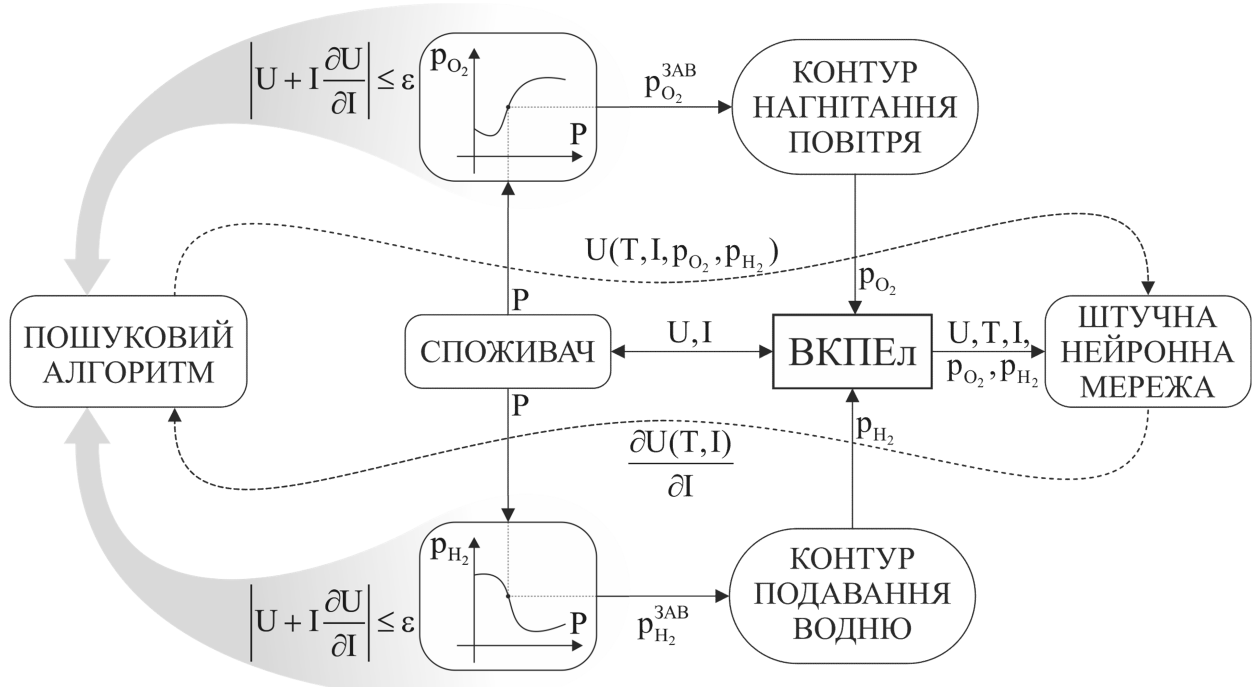


Рисунок 3 – Функціональна схема ІСЕК АСЕЖ із ВКПЕЛ

Задля реалізації вищезгаданої стратегії керування виникає необхідність в еталонній моделі об'єкта управління, що, в свою чергу, вимагає ідентифікації цього об'єкта, тим паче якщо він нелінійний. Один із можливих способів організації управління, у такому випадку, пов'язаний із процедурою адаптації на базі моделі що самоналагоджується. При цьому процес оптимізації відбувається, спочатку, на моделі об'єкта управління у прискореному масштабі часу і вже потім переноситься на реальний об'єкт.

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

$$\min_{\{P(I), p_{O_2}(I), p_{H_2}(I)\}} J = \int_0^1 \sqrt{1 + \left(\frac{\partial P}{\partial I}\right)^2 + \left(\frac{\partial p_{O_2}}{\partial I}\right)^2 + \left(\frac{\partial p_{H_2}}{\partial I}\right)^2} dI \quad (4)$$

за виконання наступних умов:

$$F(P, p_{H_2}, p_{O_2}, I, T) = 0; \left| \frac{\partial P(p_{H_2}, p_{O_2}, I, T)}{\partial I} \right| \leq \varepsilon; \frac{\partial P(I^0)}{\partial I} \approx 0; \frac{\partial P(I^1)}{\partial I} \approx 0, \quad (5)$$

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

Суть інтегрального функціоналу (4) полягає у пошуку такої функціональної залежності між потужністю ВКПЕЛ, водневим та кисневим тисками на електродах джерела, за яких поточна потужність навантаження буде знаходитись поблизу точки максимуму на потужнісній характеристиці ВКПЕЛ (рис. 4). Мінімізувати функціо-

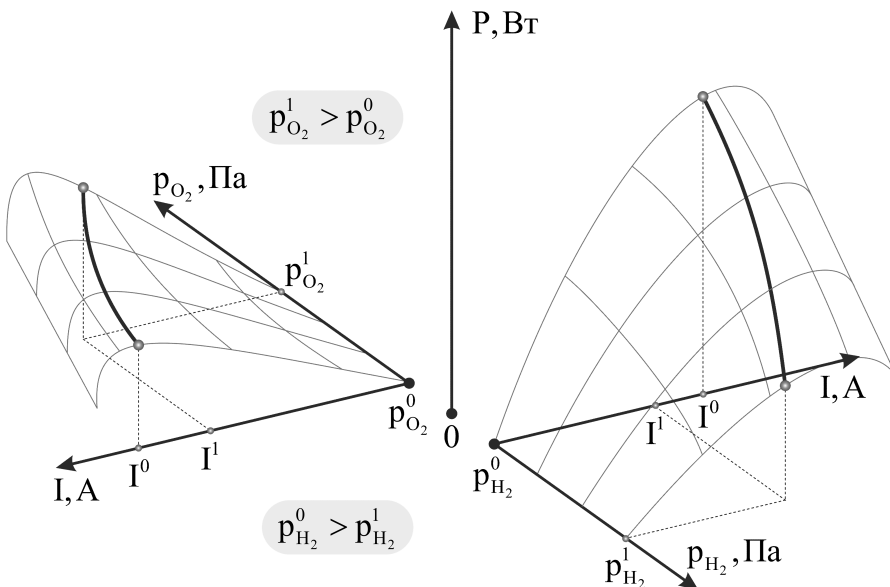


Рисунок 4 – Графічна інтерпретація функціоналу

нал (4) 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 (4)

є застосування чисельних методів до умов його розв'язання (5), які можна представити у вигляді системи рівнянь (6), врахувавши, при диференціюванні потужності, залежність напруги джерела від сили струму

$$\begin{cases} U(p_{H_2}, p_{O_2}, I, T) = \frac{P_H}{I} \\ \left| U(p_{H_2}, p_{O_2}, I, T) + I \frac{\partial U(p_{H_2}, p_{O_2}, I, T)}{\partial I} \right| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (6)$$

Розв'язання системи рівнянь (6) 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.

Втім, застосування штучних нейронних мереж передбачає вдалий вибір топології мережі (кількість шарів і нейронів в них, вигляд функцій активації), правильне застосування алгоритму тренування та його параметрів (різновид алгоритму, шаг тренування, кількість навчальних образів, швидкість тренування), коректну підгото-

вкучу даних тренування (фільтрація шумів), що, в цілому, виглядає як творчій, ані науковий процес.

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

$$\xi e^{-\frac{(x-i)^2}{2\sigma^2}}, \quad (7)$$

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, так званий, показниковий поліном Гауса (рис. 5)

$$G(x) = \sum_{i=-\alpha}^{\alpha} (-1)^i e^{-\frac{(x+i)^2}{2\sigma^2}}, \alpha \in \mathbb{Z}. \quad (8)$$

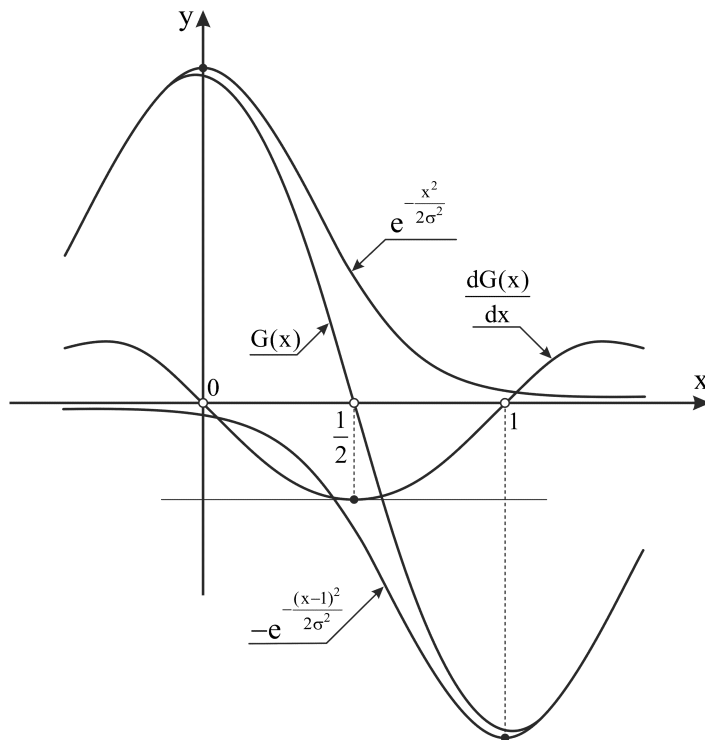


Рисунок 5 – Показниковий поліном Гауса та його перша похідна

Очевидно, що поліном (8) 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.

Представимо розвинення цільової парної функції (m) змінних у вигляді багатовимірного функціонального ряду (10) по ортогональній багатовимірній системі показникових поліномів Гауса (9) зі скінченною кількістю членів:

$$1, G(\varphi_1 x_1), G(\varphi_2 x_2), \dots, G(\varphi_j x_j), \dots, G(\varphi_1 x_1) G(\varphi_2 x_2), \\ G(\varphi_1 x_1) G(\varphi_3 x_3), \dots, \prod_{j=1, \forall i \neq j} G(\varphi_j x_j), \text{ де } j=1 \dots m, \varphi_j = 1 \dots n, \quad (9)$$

$$f(x_1, \dots, x_m) = \omega_0 + \sum_{i=1}^m \sum_{k_1=1}^{m-i+1}, \dots, \sum_{k_i=k_{i-1}+1}^m \sum_{\varphi_1=1}^{\infty}, \dots, \sum_{\varphi_i=1}^{\infty} \omega_{\varphi_1 \dots \varphi_i}^{k_1 \dots k_i} \prod_{j=1}^{i, \forall i \neq j} G(\varphi_j x_{k_j}), \quad (10)$$

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 формулами:

$$\omega_0 = \int_0^1 \dots \int_0^1 F(X) dx_1 dx_2 \dots dx_m;$$

$$\omega_{\varphi_1 \dots \varphi_i}^{k_1 \dots k_i} = \frac{\int_0^1 \dots \int_0^1 \int_0^1 f(X) \prod_{j=1}^{i, \forall i \neq j} G(\varphi_j x_{k_j}) dx_1 dx_2 \dots dx_m}{\int_0^1 \dots \int_0^1 \int_0^1 \left(\prod_{j=1}^{i, \forall i \neq j} G(\varphi_j x_{k_j}) \right)^2 dx_1 dx_2 \dots dx_m}. \quad (11)$$

Якщо рівняння (10) описує багат шарову штучну нейронну мережу прямого поширення, то формули (11) дозволяють ініціалізувати її вагові коефіцієнти, як невідомі при відповідних членах функціонального ряду.

Проаналізувавши вигляд багатовимірного функціонального ряду (10), очевидно стає топологія штучної нейронної мережі прямого поширення, що складається з трьох прихованих шарів і має не тільки фіксовану кількість нейронів в них, але й наперед визначений вигляд функцій активації (рис. 6). Так, перший, з прихованих шарів, містить нелінійні функції активації Гауса з оператором складання, а другий і третій – лінійні функції активації з оператором складання і множення відповідно.

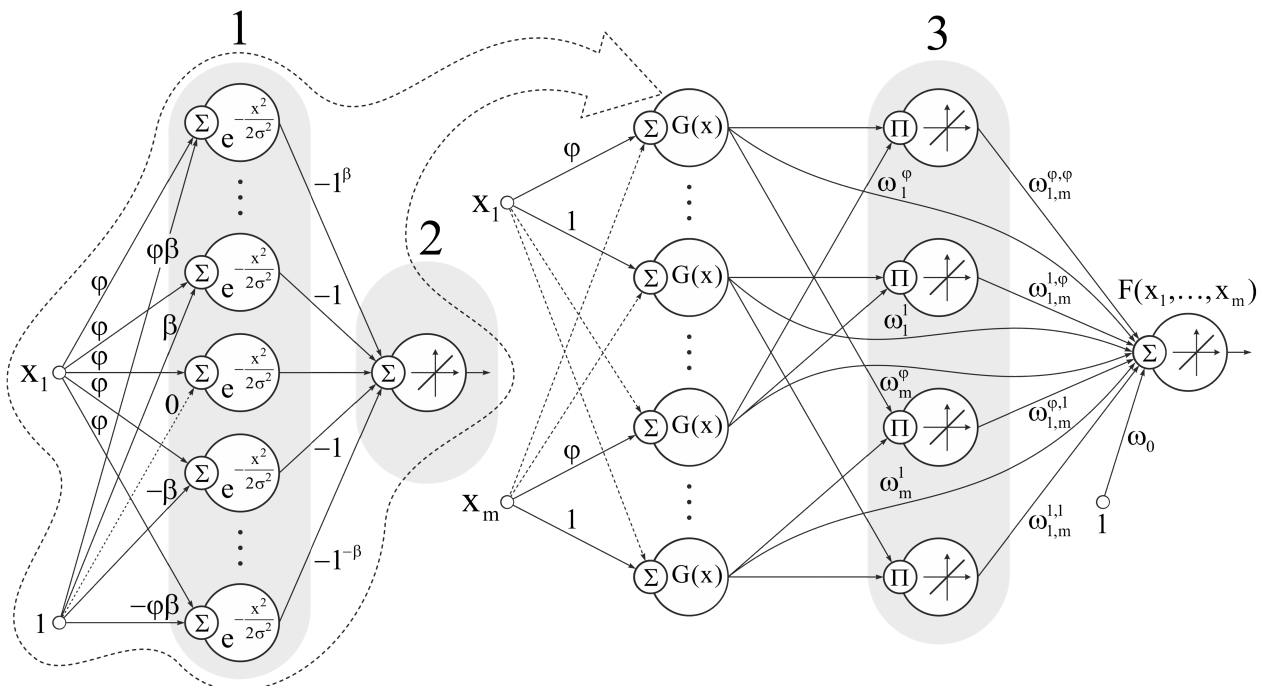


Рисунок 6 - Структура тришарової ШНМ прямого поширення

В цілому, можна стверджувати, що тришарова ШНМ зі структурою, обумовленою рівнянням (10), завжди збігається до цільової функції за умов виконання тео-

реми Боянича, для рядів Фур'є двох змінних, та теореми Теляковського, про збіжність рядів Фур'є функції декількох змінних обмеженої варіації.

Втім, найважливішим аспектом представленої ШНМ є її здатність враховувати аналітичний вигляд математичної моделі об'єкта та/або результати його експериментальних досліджень, що лягло в основу метода визначення структури ШНМПП через вигляд математичних моделей та/або характер даних експериментальних досліджень нелінійних об'єктів систем керування, включаючи об'єкти, перехідна функція яких містить неусувні точки розриву не вище першого роду.

Результати математичного моделювання роботи ВКПЕл у статичному режимі (рис. 7 – 10) демонструють збіг функціонального ряду (10) до цільової функції у вигляді математичної моделі ВКПЕл.

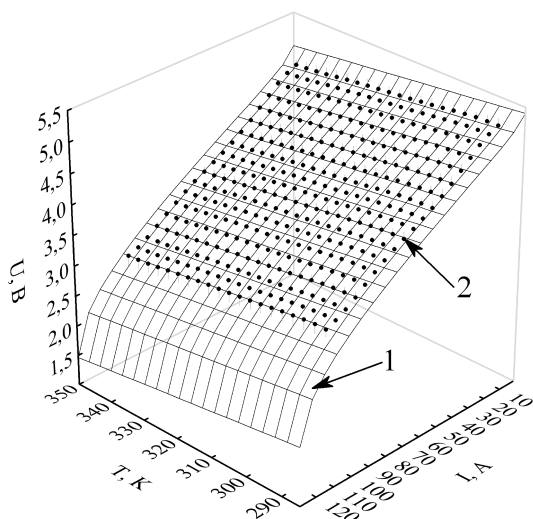


Рисунок 7 – Залежність ВАХ ВКПЕл від температури

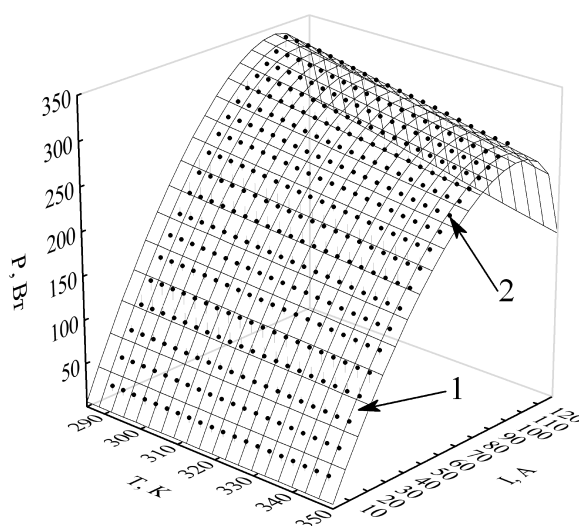


Рисунок 8 – Залежність потужнісної характеристики ВКПЕл від температури

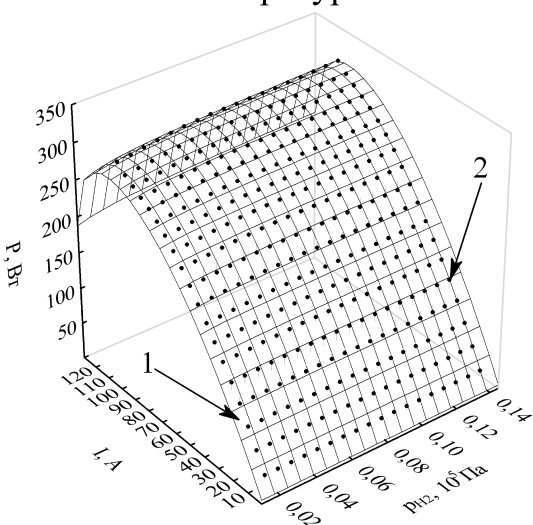


Рисунок 9 – Залежність потужнісної характеристики ВКПЕл від водневого тиску

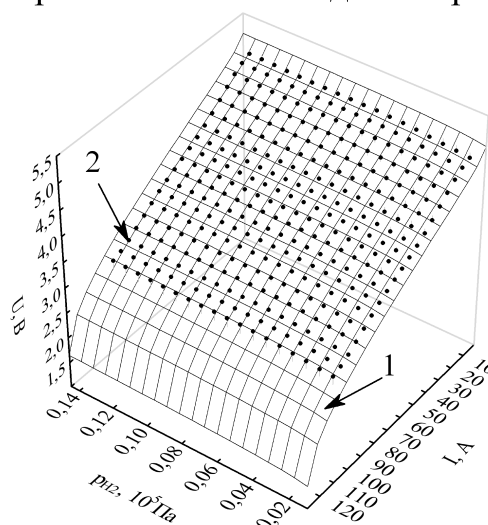


Рисунок 10 – Залежність ВАХ ВКПЕл від водневого тиску

Примітка. 1 – дані математичного моделювання, 2 – результат тренування нейронної мережі

Максимальна відносна похибка апроксимації математичної моделі ВКПЕл штучною тришаровою нейронною мережею прямого поширення складала 0,3%.

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 (6) задля мінімізації функціоналу (4).

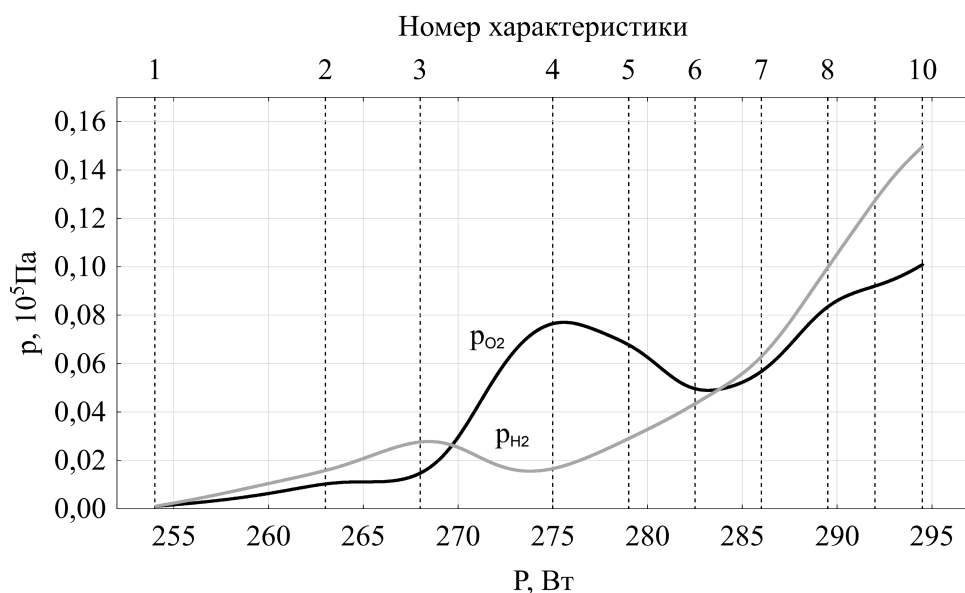


Рисунок 11 – Результат мінімізації функціоналу

трично відносно потужності ($p_{H_2}(P)$, $p_{O_2}(P)$) (рис. 11). Ця залежність визначає завдання для контурів регулювання периферійними компонентами з метою забезпечити перехід на потужнісну характеристику джерела, де потужність навантаження буде знаходитись поблизу точки максимуму. На рис. 12 продемонстровано роботу ІСЕК з пошуковим алгоритмом для десяти різних значень поточної потужності (номер характеристики).

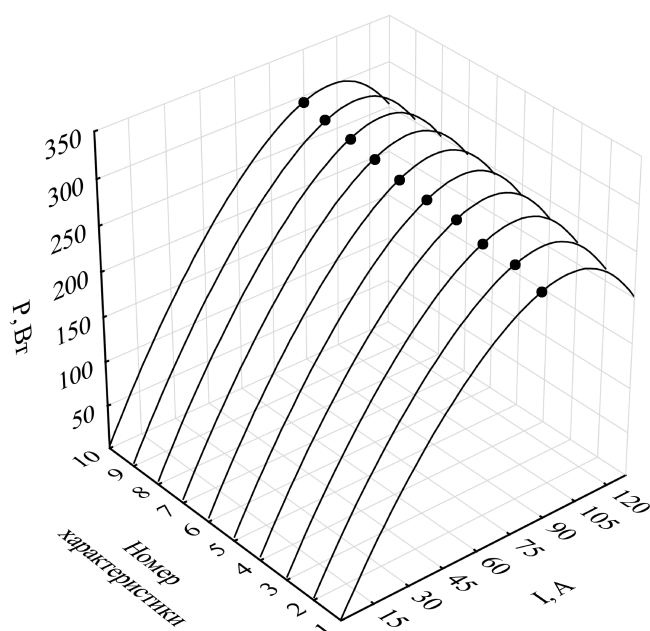


Рисунок 12 – Потужнісні характеристики ВКПЕЛ за різних значень тисків реагентів

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 параме-

трами (номер характеристики).

Класична АСК ВКПЕЛ, в рамках АСЕЖ, використовує, у якості управляючих дій, масові потоки реагентів як аналітичні функції 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. 13 – 14 представлено результат роботи класичної АСК.

Метою створення ІСЕК, в даній

дисертаційній роботі, є забезпечення передавання максимальної потужності від ВКПЕл до навантаження. Отже, ефективністю ІСЕК АСЕЖ із ВКПЕл є відношення потужності, що передається від джерела навантаженню, до максимально можливої потужності, що може бути, гіпотетично, передана споживачу.

Порівнюючи дані математичного моделювання із експериментальними даними дослідження АСЕЖ (табл. 1), можна із впевненістю стверджувати, що застосування пошукового алгоритму, у прив'язці із еталонною моделлю ВКПЕл на базі штучних нейронних мереж прямого поширення, підвищує ефективність передавання максимальної потужності, в середньому, на 10%.

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

Порівняльний аналіз залежності точок близько максимальної потужності від значень кисневого тиску, за яких досягається екстремум передавання потужності, показує, що витрати електричної енергії на роботу повітряного компресору, 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.

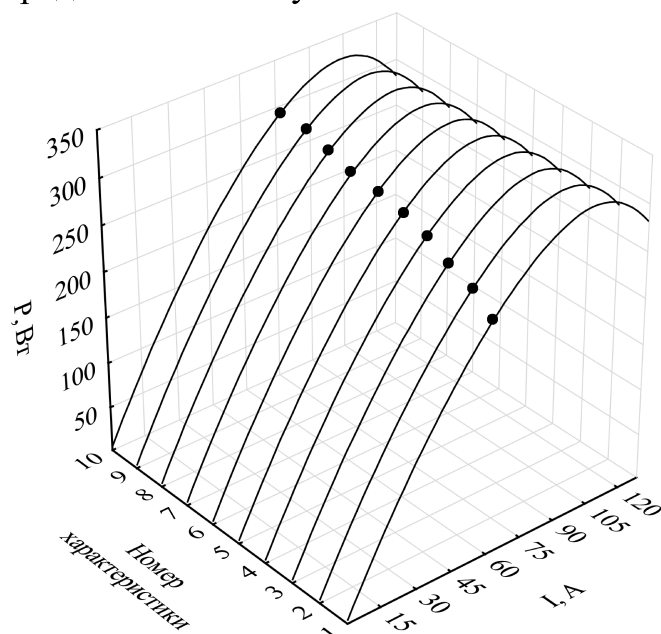


Рисунок 13 – Потужнісні характеристики ВКПЕл за різних значень тисків реагентів

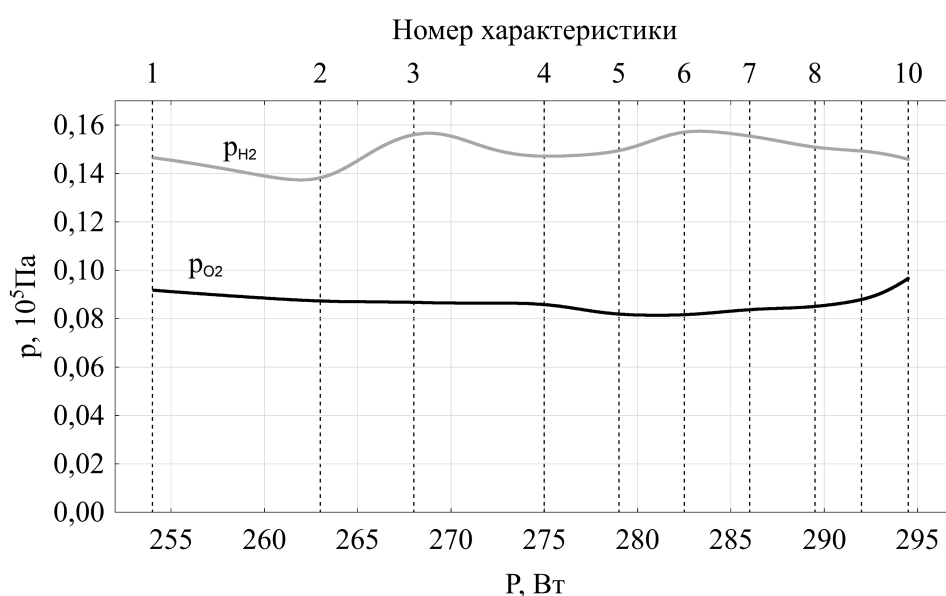


Рисунок 14 – Розподіл тисків реагентів за класичної АСК АСЕЖ із ВКПЕл

Економія електричної енергії на роботу повітряного компресора у 35,5% обумовлена зменшенням коефіцієнту стехіометрії по кисню, що цілком допустимо, адже, у моменти стрибкоподібної зміни навантаження та впродовж наступних перехідних процесів, первинним джерелом енергії АСЕЖ виступає акумуляторна батарея.

Таблиця 1 – Дані роботи класичної АСК та АСК із пошуковим алгоритмом

Номер кривої (рис. 12, 13)	Кисневий тиск, $p_{H_2} \times 10^5$, Па	Водневий тиск, $p_{O_2} \times 10^5$, Па	Питома потужність, P_H , Вт	Максимальна потужність, P_{MAX} , Вт		Ефективність, $\frac{P_H}{P_{MAX}} \cdot 100, \%$	
				I	II	I	II
1	0,0010	0,0010	254,00	273,83	327,49	92,76	77,56
2	0,0154	0,0111	263,00	282,23	328,60	93,19	80,04
3	0,0298	0,0111	268,00	287,06	328,57	93,36	81,57
4	0,0154	0,0818	275,00	289,56	328,56	94,97	83,70
5	0,0298	0,0717	279,00	293,95	328,04	94,91	85,05
6	0,0442	0,0414	282,50	294,83	328,01	95,82	86,13
7	0,0586	0,0515	286,00	297,73	328,42	96,06	87,08
8	0,1018	0,0919	289,50	304,00	328,53	95,23	88,12
9	0,1450	0,0919	293,00	306,64	328,69	95,55	89,14
10	0,1450	0,1020	293,00	306,90	330,74	95,47	88,59
Середня ефективність, %						94,73	84,70

Примітка. Дані роботи АСК із пошуковим алгоритмом наведено у стовпчику «I», а дані роботи класичної АСК – у стовпчику «II»

Розділ четвертий «Експериментальна частина» присвячено експериментальній перевірці основних положень дисертаційної роботи, зокрема достовірності математичної моделі ВКПЕЛ, та отриманню даних роботи класичної системи управління АСЕЖ.

В рамках дисертаційної роботи було використано експериментальну установку АСЕЖ із ВКПЕЛ, розроблену співробітниками кафедри електричних мереж і альтернативних джерел електричної енергії факультету електротехніки та інформаційної техніки університету ім. Отто фон Геріке (м. Магдебург, Німеччина). Вся інформація щодо конструкції експериментальної установки та параметрів її ключових вузлів була надана співробітниками вище згаданої кафедри, за що їм велика подяка.

Практичні дослідження в рамках дисертаційної роботи проводились особисто дисертантом під час його стажування на кафедрі електричних мереж і альтернативних джерел електричної енергії факультету електротехніки та інформаційної техніки університету ім. Отто фон Геріке.

Експериментальну установку можна поділити на декілька складових контурів. Насамперед – це ємність з воднем, яка забезпечує автономність пристрою; ВКПЕЛ, як первинне джерело електричної енергії АСЕЖ; периферійні компоненти та допоміжні контури (насоси, вентилі, що управляються, контури подавання кисню, водню та контур рециркуляції, система охолодження), які забезпечують роботу ВКПЕЛ; акумулятор, як первинне джерело енергії для забезпечення роботи периферійних пристроїв та системи управління на початок роботи ВКПЕЛ; перетворювач та інвертор напруги для адаптації напруги на клеммах джерела до вимог периферійних пристроїв, акумулятора та системи управління експериментальною установкою; система управління периферійними пристроями.

На рис. 15 – 18 зображено результати експериментальних досліджень АСЕЖ разом із результатами математичного моделювання роботи установки задля підтвердження достовірності математичної моделі ВКПЕл. Досліджувана АСЕЖ працювала в режимі регулювання масових витрат реагентів, що наклало певні обмеження на діапазон отриманих даних. Температура джерела регулювалась за умови не перевищення межі у 340 К.

На представлених нижче рисунках чорними точками представлено експериментально отримані дані. Сірими лініями показано відстань між експериментальними даними та поверхнею математичної моделі.

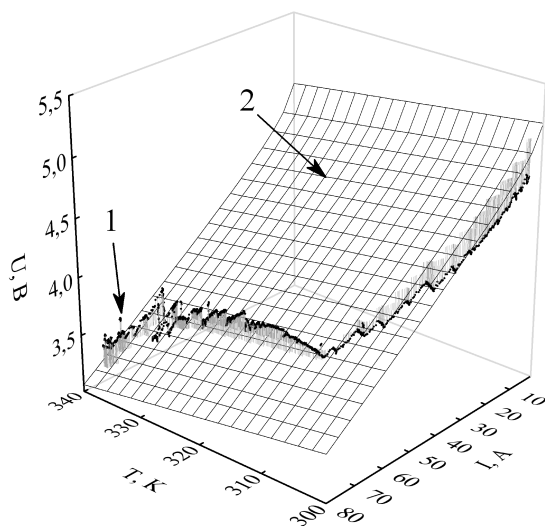


Рисунок 15 – Залежність ВАХ ВКПЕЛ від температури

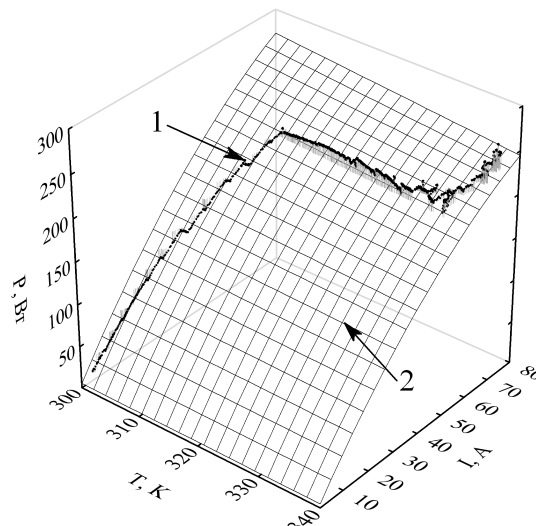


Рисунок 16 – Залежність потужнісної характеристики від температури

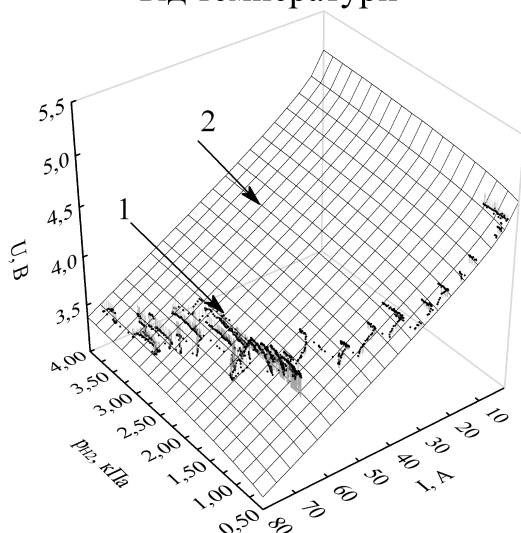


Рисунок 17 – Залежність ВАХ ВКПЕЛ від водневого тиску

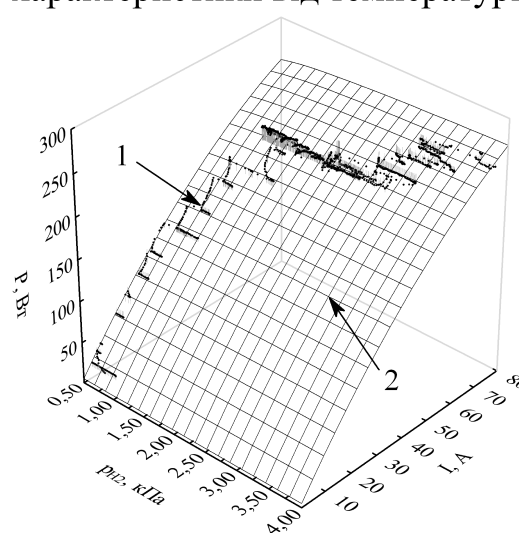


Рисунок 18 – Залежність потужнісної характеристики від водневого тиску

Примітка. 1 – виміряні дані, 2 – результат математичного моделювання

Специфічний вигляд експериментальних даних, що нагадує просторову криву на тривимірній поверхні, обумовлено обмеженнями системи керування експериментальною установкою, деактивація якої була небажана з точки зору безпеки роботи ВКПЕл, а тому зняти всі можливі робочі точки вище наведених характеристик не представилось можливим.

Результати експериментальних досліджень демонструють збіжність з результатами математичного моделювання роботи ВКПЕл з протон-обмінною полімерною мембраною. Максимальна відносна похибка, при цьому, не перевищила 4%, як для потужнісних, так і для вольт-амперних характеристик ВКПЕл.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-практична задача підвищення ефективності передавання максимальної потужності споживачу від воднево-кисневого паливного елемента, в рамках автономної системи електроживлення, через застосування штучних нейронних мереж прямого поширення.

Основні наукові і практичні результати полягають у наступному:

- 1) передавання максимальної потужності від ВКПЕл до навантаження, в рамках АСЕЖ, ускладнюється нелінійним внутрішнім опором ВКПЕл, багатовимірністю та різноманітністю взаємозв'язків між його фізичними змінними стану, наявністю енергетичних витрат на функціонування периферійних компонентів. Існуючі способи реалізації передавання максимальної потужності (енергії) не завжди видаються ефективними, адже безпосередньо не впливають на характеристики роботи ВКПЕл;
- 2) узагальнена математична модель АСЕЖ дозволяє досліджувати роботу ВКПЕл у діапазоні струмів високої щільності, що реалізувати на реальній установці не тільки складно, але й небезпечно для самого джерела;
- 3) теоретично отримані закономірності, які відбивають взаємозв'язок між дифузійним падінням напруги на клемах ВКПЕл, іонною провідністю полімерної мембрани і втратами тиску на його електродах, дозволяють удосконалити математичну модель джерела в частині газомеханічних процесів;
- 4) розробка показникових поліномів Гауса та ортогональної багатовимірної системи функції на їх базі, дозволяє представити штучні нейронні мережі прямого поширення у вигляді багатовимірних функціональних рядів зі скінченою кількістю елементів і дає подальший розвиток не тільки методам поліноміальної ідентифікації багатовимірних нелінійних об'єктів систем керування, але й методу зліченної множини змінних в задачах варіаційного числення;
- 5) застосування теорем збіжності рядів Фур'є по тригонометричній системі функцій, дає можливість ініціалізувати вагові коефіцієнти штучних нейронних мереж прямого поширення через використання функціоналу Гауса, що не тільки задає напрям гарантованого збігу ШНМ до цільової функції, але й дозволяє прискорити процеси тренування на базі відомих алгоритмів;
- 6) представлення штучних нейронних мереж прямого поширення у вигляді функціональних рядів зі скінченою кількістю елементів дозволяє визначати структуру ШНМ через вигляд математичних моделей та/або характер даних експериментальних досліджень об'єктів систем керування, що оптимізує обчислювальні ресурси таких систем;
- 7) теоретичне обґрунтування інтегрального функціоналу передавання максимальної потужності від ВКПЕл до навантаження дозволяє визначити функціональні залеж-

- ності між тисками реагентів та споживаною потужністю навантаження, врахування яких, в системі керування АСЕЖ, підвищило ефективність передавання максимальної потужності, в середньому, на 10%;
- 8) розроблена інтелектуальна система екстремального керування передаванням максимальної потужності від ВКПЕл до навантаження, з еталонною моделлю джерела на базі тришарової штучної нейронної мережі прямого поширення та пошуковим алгоритмом, може бути адаптована для ВКПЕл широкого діапазону потужності;
 - 9) результати дисертаційної роботи впроваджено у навчальному процесі на кафедрі «Системи програмного управління і мехатроніка» ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»;
 - 10) розроблені, в рамках дисертації, інтелектуальні методи ідентифікації багатовимірних нелінійних об'єктів систем керування на базі тришарових штучних нейронних мереж прямого поширення були використані ТОВ ТПФ «ДОНТЕХПРОМ» для визначення залежності коефіцієнта механічної потужності вітроустановки від швидкості та кута повороту лопаті, що підвищило точність еталонної моделі механічної складової вітроелектростанції.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Калашніков В.І. Моделювання дифузійних властивостей воднево-кисневих паливних елементів / В.І. Калашніков, О.Ю. Колларов // Наукові праці Донецького національного технічного університету, серія «Електротехніка і енергетика» – Донецьк: 2007. – Вип. 7(128). – С. 249 – 252.
2. Левшов О.В. Експериментальне дослідження вольт-амперної характеристики воднево-кисневого паливного елемента / О.В. Левшов, О.Ю. Колларов // Відновлювальна енергетика. – Київ: 2008. – Вип. 2. – С. 31 – 35.
3. Штицинський З.А. Зволоження повітря у паливних воднево-кисневих елементах / З.А. Штицинський, О.Ю. Колларов, В.І. Калашніков // Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», серія «Електротехніка, електроніка та електропривод» – Харків: 2008. – Вип. 30. – С. 49 – 50.
4. 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.
5. Калашніков В.І. Дослідження конверсії кисню у воднево-кисневому паливному елементі / В.І. Калашніков, О.Ю. Колларов // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка і енергетика». – Донецьк. – 2011. – Випуск 10(180). – С. 77 – 79.
6. Колларов О.Ю. Структура автономної системи електроприводу із живленням від паливних воднево-кисневих елементів / О.Ю. Колларов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук. – 2008. – Випуск 4/2008 (51) частина 2. – С. 42 – 44.
7. Колларов О.Ю. Ініціалізація нейронних одношарових сіток прямого поши-

рення / О.Ю. Колларов // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка і енергетика». – Донецьк. – 2011. – Випуск 10(180). – С. 73 – 76.

8. Колларов О.Ю. Удосконалення методів керування автономною системою електроживлення із воднево-кисневим паливним елементом / О.Ю. Колларов // 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., м. Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2012. – С. 149 – 150.

У наукових працях, опублікованих у співавторстві, дисертанту належить: пошук закономірності між дифузійним падінням напруги, іонною провідністю мембрани і втратами тиску на електродах ВКПЕл та експериментальна перевірка теоретичних положень [1]; експериментальне дослідження ВАХ ВКПЕл та аналіз отриманих результатів [2]; аналіз та експериментальне дослідження впливу зволоження кисню на термодинамічні процеси в ВКПЕл [3]; основна ідея та подальша перевірка теоретичних положень через математичне моделювання [4]; експериментальне дослідження конверсії кисню у ВКПЕл та аналіз отриманих результатів [5].

АНОТАЦІЇ

Колларов О.Ю. Керування автономними системами електроживлення із воднево-кисневими паливними елементами на базі штучних нейронних мереж. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. – ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», Донецьк, 2013.

Дисертацію присвячено підвищенню ефективності передавання максимальної потужності споживачу від воднево-кисневого паливного елемента в рамках автономної системи електроживлення. У якості системи управління обрано інтелектуальну систему екстремального керування із еталонною моделлю об'єкта на базі штучних нейронних мереж прямого поширення та пошуковим алгоритмом для знаходження екстремуму передавання потужності від джерела енергії до споживача.

Задля ідентифікації воднево-кисневого паливного елемента було розроблено штучні тришарові нейронні мережі прямого поширення наперед визначеної структури, що базуються на теоремах збіжності трибометричних рядів Фур'є.

Ключові слова: автономна система електроживлення, воднево-кисневий паливний елемент, штучна нейронна мережа, інтегральний функціонал, математичне моделювання, ряди Фур'є.

Колларов О.Ю. Управление автономными системами электропитания с водородно-кислородными топливными элементами на базе искусственных нейронных сетей. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по

специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы. – ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», Донецк, 2013.

Диссертация посвящена повышению эффективности передачи максимальной мощности (энергии) потребителю от водородно-кислородного топливного элемента с протон-обменной полимерной мембраной, в рамках автономной системы электропитания, что осложняется нелинейным внутренним сопротивлением водородно-кислородного топливного элемента, многомерностью и разнообразием взаимосвязей между его физическими переменными состояниями, наличием энергетических затрат на работу периферийных компонентов, без которых функционирование водородно-кислородного топливного элемента становится невозможным.

Существующие способы реализации передачи максимальной мощности (энергии) потребителю от водородно-кислородного топливного элемента, заимствованные, в большей мере, от автономных систем электропитания с солнечными элементами, часто являются не эффективными, ибо непосредственно не влияют на характеристики работы водородно-кислородного топливного элемента, что вносит существенные ограничения на достижение поставленной цели.

Исследование работы автономной системы электропитания с водородно-кислородным топливным элементом в диапазоне токов высокой плотности является опасным для источника электроэнергии ввиду ограничений массообменных процессов в нем (необходимость в топливе превосходит возможность его доставки к реакционным зонам), что может послужить причиной безвозвратного выхода из строя водородно-кислородного топливного элемента. С целью проведения исследований автономной системы электропитания, в диапазоне токов высокой плотности, была разработана обобщенная математическая модель автономной установки электропитания, включая математическую модель водородно-кислородного топливного элемента и всех периферийных компонентов, необходимых для обеспечения его функционирования.

В рамках построения математической модели водородно-кислородного топливного элемента были получены закономерности, отражающие взаимосвязь между диффузионным падением напряжения на его клеммах, ионной проводимостью мембраны и потерями давления на электродах источника, что позволило учесть геометрию мембраны и электродов в процессах математического моделирования, а, следовательно, и повысить точность такого моделирования в целом.

Для определения функциональных взаимосвязей между давлениями реагентов и потребляемой мощностью нагрузки, при которых наблюдается близко максимальная передача энергии, был обоснован оптимизационный функционал передачи максимальной мощности от водородно-кислородного топливного элемента к нагрузке.

Разработка показательных частично-периодических полиномов Гаусса и ортогональной системы функций на их базе, дала новый импульс в развитии методов полиномиальной идентификации динамических объектов систем управления.

Теоретически обоснована инициализация весовых коэффициентов искусственных нейронных сетей прямого распространения посредством применения теорем сходимости функциональных рядов Фурье по тригонометрической системе функ-

ций, что позволило сократить время тренировки искусственных нейронных сетей прямого распространения и задать направление их гарантированного схождения к целевой функции.

Предложен метод определения структуры искусственных нейронных сетей прямого распространения исходя из вида математических моделей и/или характера данных экспериментальных исследований нелинейных и/или многомерных объектов систем управления, включая объекты, переходная функция которых содержит неустранимые точки разрыва не выше первого рода, что позволило уменьшить вычислительные ресурсы системы управления автономной установкой электропитания.

Разработана интеллектуальная система экстремального управления с эталонной моделью источника энергии на базе искусственных нейронных сетей прямого распространения и поисковым алгоритмом для нахождения экстремума передачи мощности от водородно-кислородного топливного элемента к потребителю в рамках автономной системы электропитания.

Принятые к внедрению в ООО ТПФ «ДОНТЕХПРОМ» г. Донецка интеллектуальные методы идентификации многомерных нелинейных объектов систем управления на базе трехслойных нейронных сетей прямого распространения позволили повысить точность эталонной модели механической составляющей ветроустановки в части определения зависимости коэффициента механической мощности ветроэлектрической установки от быстроходности и угла поворота лопасти.

Результаты диссертационной работы внедрены в учебном процессе на кафедре «Системы программного управления и мехатроника» ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет».

Ключевые слова: автономная система электропитания, водородно-кислородный топливный элемент, искусственная нейронная сеть, интегральный функционал, математическое моделирование, ряды Фурье.

Kollarov O.Y. Control of separate power – supply system with hydrogen – oxygen cells on basis of artificial neural networks. – As the manuscript.

Dissertation for the scientific degree of engineering sciences on specialty 05.09.03 – electrotechnical complexes and systems. – SHEE «Donetsk national technical university», Donetsk, 2013.

The dissertation are devoted to increase of transfer efficiency of the maximum power (energy) to a loading from the hydrogen-oxygen cell by separate power-supply system. In the capacity of control system are choose the intelligence control system with reference model of object on the basis of artificial feed-forward neural networks and with search algorithm for a finding of an extremum of transfer of power from an energy source to the consumer.

For identification of the hydrogen-oxygen cell was developed three-layer artificial feed-forward neural networks predetermined structure, based on the convergence theorem of trigonometric Fourier series.

Key words: separate power-supply system, the hydrogen-oxygen cell, artificial neural network, integral functional, mathematical modeling, the Fourier series.