

УДК 621.311.61

КОЛЛАРОВ О. Ю.

Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет»

### ЗАСАДИ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ АВТОНОМНИМИ УСТАНОВКАМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ІЗ ВОДНЕВО-КИСНЕВИМИ ПАЛИВНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

**Анотація.** *Окреслено критерії оптимального керування автономними установками електроживлення із воднево-кисневими паливними елементами, у якості джерел електричної енергії, з метою забезпечення передавання максимальної потужності (енергії) від джерела до споживача.*

**Мета.** *Пошук та систематизація критеріїв оптимального керування автономними системами електроживлення із воднево-кисневими паливними елементами.*

**Методика.** *Аналіз сучасних методів оптимального керування автономної системи електроживлення із воднево-кисневим паливним елементом з точки зору передавання максимальної енергії споживачу.*

**Результати.** *Досліджені проблеми керування передавання максимальної потужності від автономної системи електроживлення із воднево-кисневим паливним елементом до навантаження та наведені найбільш оптимальні методи керування первинним джерелом електроенергії.*

**Наукова новизна.** *Уперше систематизовано критерії оптимального керування автономними установками електроживлення із воднево-кисневими паливними елементами з метою забезпечення передавання максимальної потужності від джерела до навантаження.*

**Практична значимість.** *Реалізація критеріїв оптимального керування автономними установками електроживлення із воднево-кисневими паливними елементами підвищить ефективність передавання електричної енергії від джерела до навантаження.*

**Ключові слова.** *Автономна система електроживлення, воднево-кисневий паливний елемент, передавання максимальної потужності, багатовимірність.*

**Вступ.** Закон України «Про альтернативні джерела енергії» встановлює наступні пріоритети в енергетиці: 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, вищезазначеним, 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 більш 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 згоряння» водню, але й вимагає, час від часу, оновлення параметрів ВКПЕл, для коректного функціонування автоматизованої системи керування АСЕЖ.

Питання передавання максимальної енергії від автономних установок електроживлення із воднево-кисневими паливними елементами до споживача широко представлено у великій кількості наукових праць [1 - 18]. Проте сукупного аналізу проведених досліджень, на предмет пошуку оптимальних режимів роботи воднево-кисневих паливних елементів у складі автономних систем електроживлення, виконано не було.

Багатовимірність та нелінійність автономної системи електроживлення, наявність багатьох, пов'язаних між собою, процесів у воднево-кисневому паливному елементі, вимагає пошуку найбільш сприятливих співвідношень параметрів роботи АСЕЖ з метою передавання максимальної потужності від джерела до навантаження.

**Постановка завдання.** Об'єктом досліджень є енергетичні процеси в автономній системі електроживлення із воднево-кисневим паливним елементом у якості первинного джерела електроенергії. Метою статті є пошук критеріїв оптимального керування автономними системами електроживлення із воднево-кисневими паливними елементами. Для досягнення мети поставлено і вирішено задачу аналізу сучасних підходів у керуванні автономними системами електроживлення із ВКПЕл, систематизовано основні критерії оптимального, з точки зору передавання максимальної енергії споживачу, керування.

**Результати досліджень.** Типова АСЕЖ із ВКПЕл має структуру зображену на рис. 1. До її складу входять первинні джерела енергії (воднево-кисневий паливний елемент і акумулятор), вторинні джерела енергії (перетворювачі та інвертори напруги), допоміжні системи, для забезпечення роботи ВКПЕл (система нагнітання повітря, система охолодження, система рециркуляції та подавання водню), навантаження і система управління, реалізована на базі контролера.

Пошук екстремуму регульованої величини, за заданих обмежень, є однією з найважливіших задач оптимізації у цілому. До таких екстремальних величин, в сенсі АСЕЖ, належать енергетичні параметри, а саме коефіцієнт корисної дії та потужність, що безпосередньо пов'язані із вольт-амперною характеристикою ВКПЕл, на яку, в свою чергу, впливає температура, вологість полімерної протон-обмінної мембрани і стехіометрія реагентів (відношення фактичних масових витрат до теоретично необхідних за даної конкретної сили струму), а, отже, і тиск паливних газів [1]. Причому, вологість полімерної мембрани повністю залежить від тиску реагентів, температури та сили струму, що протікає через комірки ВКПЕл. З огляду на це, оптимізацію роботи АСЕЖ доцільно реалізовувати за трьома основними напрямками: зволоження паливних газів, стехіометрія реагентів та температура джерела.

З точки зору наближення до передавання максимальної потужності від джерела до навантаження та подовження довговічності експлуатації ВКПЕл, зволоження паливних газів є одним з основних чинників у досягненні вищезазначеної мети [2]. Незважаючи на наявність самозволоження мембрани, за рахунок продуктів хімічної реакції [3], необхідність зовнішнього зволоження через паливні гази, що надходять до джерела, не піддається сумніву, особливо для джерел середньої та великої потужності [4].

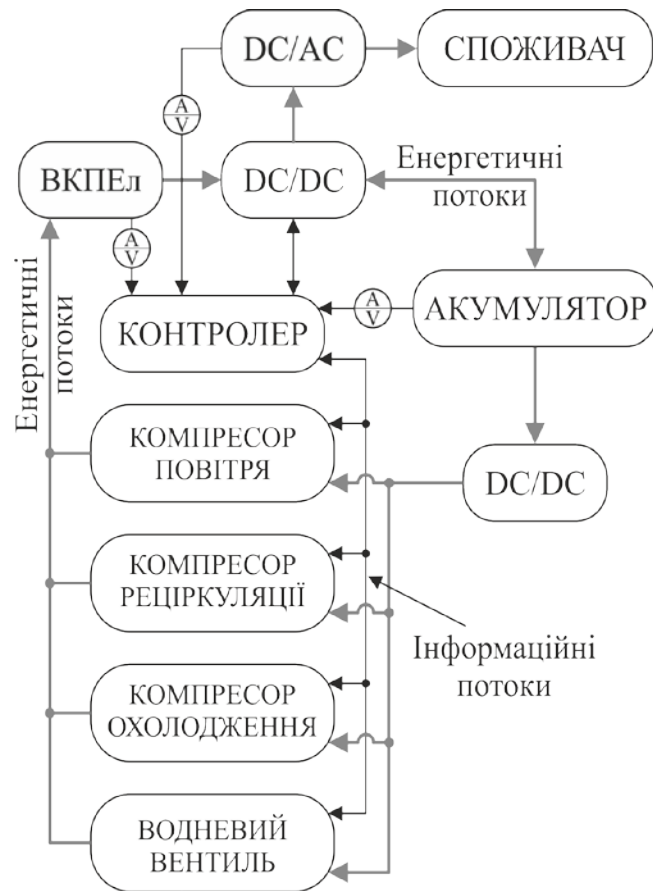


Рис. 1 Функціональна схема АСЕЖ із ВКПЕЛ

Слід звернути увагу і на вплив зволоження реагентів у прив'язці до температурного режиму роботи ВКПЕЛ, адже високі температури викликають збільшення дифузійного опору джерела, низькі ж спонукають до утворення води у рідкому стані, що загрожує блокуванням каналів в реакційних зонах і може призвести до «обвалу» напруги [5]. На даний момент існують дві концепції зволоження реагентів. Перша – це одночасне зволоження водню і кисню, що нагнітаються до ВКПЕЛ і друга – лише зволоження кисню. Остання концепція вважається найбільш раціональною з точки зору впливу на енергетичні процеси у ВКПЕЛ [6].

Іншим важливим чинником в процесі оптимізації роботи ВКПЕЛ (рис. 2) є стехіометрія реагентів. При цьому киснева стехіометрія має набагато суттєвіший вплив на енергетичні параметри ніж воднева [7], що, крім іншого, обумовлено пропорційною залежністю між енергетичними витратами на роботу компресора, який нагнітає повітря до джерела, та тиском на його електродах. Вагомою проблемою при функціонуванні ВКПЕЛ в складі АСЕЖ є загроза «кисневого голодування» комірок, як результат інерційності компресора, адже зміна питомої потужності джерела може відбутись набагато швидше ніж система керування тиском відреагує на це. «Кисневе голодування» викликає падіння напруги на клеммах ВКПЕЛ і, при досягненні певної мінімально допустимої межі, може спричинити невідворотні наслідки, як-то вихід джерела зі строю.

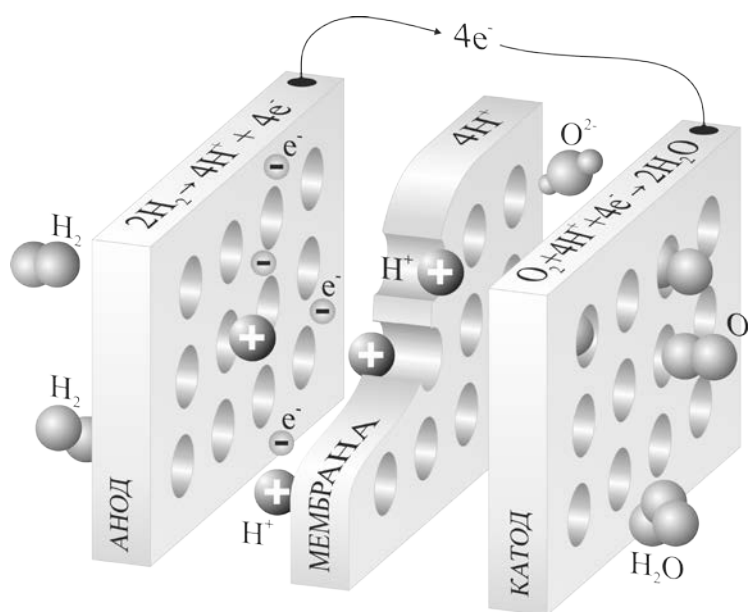


Рис. 2 Конструкція та принцип роботи ВКПЕЛ

Досягти мінімізації енергетичних витрат на периферійні компоненти, зокрема на повітряний компресор, можна за рахунок зменшення кисневої стехіометрії, бо саме системи низького тиску споживають менше енергії. Втім, системи низького тиску менш стабільні, в плані підтримки напруги на клемах ВКПЕЛ, ніж системи високого тиску, при тому що швидкість реакції на збурюючі дії, у систем низького тиску, більша ніж у систем високого тиску [8].

Аналізуючи вплив кисневого тиску на дифузійні властивості полімерної мембрани, з урахуванням її пористості та проникності, можна стверджувати, що передавання максимальної енергії від джерела навантаженню досягається за умов високого тиску на катодній стороні ВКПЕЛ [9].

Що стосується водневої стехіометрії, то проблема «водневого голодування» не є настільки вираженою, ніж проблема «кисневого голодування», адже водень подається до джерела безпосередньо з паливного баку, де зберігається під високим тиском, і реакція водневого вентиля на управляючий сигнал є набагато швидшою за реакцію компресора повітря. Як правило, воднева стехіометрія підтримується на рівні два до одного, тобто до анодній стороні ВКПЕЛ подається маса водню, що у два рази перевищує теоретично необхідну за даної конкретної сили струму [1].

Останнім вагомим чинником, який безпосередньо впливає на енергетичні параметри роботи ВКПЕЛ, є температура [6]. Відомо, що передавання максимальної потужності від джерела до навантаження досягається за умов, наближених до ізотермічних, але із підвищенням температури знижується вологість полімерної мембрани, що вимагає застосування зовнішнього охолодження ВКПЕЛ, а отже і додаткових енергетичних витрат [10]. Дуже високі або низькі температури негативним чином впливають на енергетичні параметри ВКПЕЛ. За таких умов, збільшення відносної вологості паливних газів покращує ситуацію, але це не впливає на провідність полімерної мембрани так істотно, як температура [11]. Зменшення ж відносної вологості реагентів викликає значне збільшення дифузійного опору джерела, при цьому зміна температури в діапазоні від 30 до 50 °C майже не відбивається на дифузійному опорі ВКПЕЛ [5]. Коливання відносної вологості мембрани впливає на її електричний та тепловий опір, через що теплова питома провідність полімерної мембрани постійно змінюється [12]. До того ж, тепло розподіляється асиметрично від аноду до катоду, бо на катодній стороні джерела його виділяється більше ніж на анодній [12]. Оптимальним режимом роботи ВКПЕЛ, з точки зору термодинаміки, можна вважати його роботу за найвищої температури при якій зберігається

мінімальна стехіометрія паливних газів за достатньої відносної вологості реагентів, адже максимізація напруги джерела досягається за високих температур.

Для керування роботою АСЕЖ із ВКПЕл застосовуються комбінації нелінійних та адаптивних систем. Так в роботі [13] розглянуто дві стратегії регулювання напруги гібридної енергетичної системи із паливним воднево-кисневим елементом, у якості головного джерела електроенергії, та суперконденсатора, у якості допоміжного. Перший варіант передбачає використання суперконденсатора в продовж перехідних процесів у ВКПЕл при керуванні параметрами його роботи, а другий – використання ВКПЕл лише як джерела зарядки суперконденсатора. Обидва підходи добре себе зарекомендували, а результати досліджень довели необхідність і невідворотність використання допоміжного джерела електроенергії у складі АСЕЖ із ВКПЕл.

Іншим підходом у керуванні роботою АСЕЖ із ВКПЕл є використання традиційних систем забезпечення передавання максимальної потужності споживачу. Прикладом тому є робота [14], в якій розглянуто питання передавання максимальної потужності від ВКПЕл до навантаження через застосування екстремальних систем управління з пошуковим алгоритмом. Зокрема, в роботі [14] пропонується використання двоконтурної схеми керування с проміжним перетворювачем. Зовнішній контур реалізовує пошуковий алгоритм та формує завдання внутрішньому контуру в режимі реального часу. Подібна система управління забезпечує передавання максимальної потужності від ВКПЕл до навантаження за конкретних умов роботи джерела і безпосередньо не впливає на параметри його роботи, що може стати перепорою на шляху наближення до об'єктивно максимального передавання енергії. Іншим прикладом є робота [15], в якій розглянуто аналогічну пошукову екстремальну систему керування передаванням максимальної потужності ВКПЕл на базі регульованого перетворювача напруги. Як і в першому варіанті, дана методика не враховує вплив збурювальних дій на властивості джерела, а тому наближення до екстремуму передавання енергії є сумнівним. До того ж, робота ВКПЕл сумісно із перетворювачем напруги вимагає синхронізації регулятора подачі повітря до джерела і регулятора перетворювача напруги [16], без чого спостерігається погіршення енергетичних властивостей АСЕЖ.

Беручи до уваги необхідність врахування максимальної кількості чинників, які впливають на властивості ВКПЕл, а отже і на АСЕЖ у цілому, доцільно застосувати стратегію безпосереднього керування параметрами джерела енергії, що і знайшло своє відображення у переважній більшості наукових праць, присвячених даному питанню. В цьому сенсі слід говорити про керування кисневим і водневим тиском на входах та/або виходах електродів джерела й температурою ВКПЕл, причому керування кисневим та водневим потоками знайшло своє відображення у більшості наукових досліджень.

Питання керування повітряним потоком на катодній стороні ВКПЕл розглянуто в роботі [17]. Основною метою такого керування є недопущення «кисневого голодування» комірок і одночасне наближення до передавання максимальної потужності від джерела до навантаження, через застосування адаптивного інверсного управління витратами кисню. Ідентифікацію інверсної моделі системи було здійснено на базі рекурентних нейрофазис-мереж, втім ідентифікація охопила лише катодну складову ВКПЕл, що внесло певні обмеження в наближенні до екстремуму передавання енергії.

Система регулювання вологістю полімерної мембрани ВКПЕл через управління кисневою стехіометрією побудована в роботі [18]. Стратегія підтримки постійного значення відносної вологості мембрани цілком виправдовує себе з точки зору стабільності роботи джерела, навіть за умов зміни параметрів його функціонування, адже саме відносна вологість електроліту є визначальною у досягненні екстремуму передавання потужності до навантаження, однак вимірювання відносної вологості полімерної мембрани є вкрай складним процесом, реалізувати його в рамках АСЕЖ проблематично, а непрямий розрахунок на базі існуючих емпіричних залежностей не є точним.

### Висновки

1. Запорукою наближення до передавання максимальної потужності від джерела електроенергії до навантаження є одночасне керування водневим і кисневим потоками з урахуванням температури роботи ВКПЕЛ. При цьому, доцільніше управляти тиском реагентів на електродах джерела, ані їх масовими витратами, адже саме тиск реагентів визначає рівень напруги на клеммах джерела.
2. Класичний підхід у передаванні максимальної потужності від ВКПЕЛ до навантаження, а саме використання перетворювачів напруги для пошуку екстремуму потужнісної характеристики джерела в функції сили струму, не вирішує питання у повному обсязі, адже безпосередньо не впливає на цю характеристику, що вимагає розробки автоматизованої системи керування АСЕЖ, як єдиним цілим, включаючи керування периферійними компонентами ВКПЕЛ.
3. Система керування АСЕЖ із ВКПЕЛ має бути адаптивною, адже параметри ВКПЕЛ змінюються із часом його функціонування, і екстремальною, бо основним критерієм оптимальності її роботи є реалізація передавання максимальної потужності від джерела електричної енергії до навантаження. Найбільш придатною системою, для вирішення цієї задачі, є інтелектуальна система екстремального керування з еталонною моделлю об'єкта.

### Список використаних джерел

1. Purmann Mathias. Optimierung des Betriebsverhaltens von PEM – Brennstoffzellen unter Berücksichtigung von elektrischem und Gesamtwirkungsgrad bei unterschiedlichen Lastanforderungen und Betriebsparametern / M. Purmann // Dissertation. – Magdeburg: Otto-von-Guericke Universität, 2004. – 136 p. – ISBN 978-3-929757-63-7.
2. Mengbo Ji. A Review of Water Management in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells / J. Mengbo, W. Zidong // *Energies*. – 2009. – №2. – p. 1057 – 1106.
3. Water balance in a free-breathing polymer electrolyte membrane fuel cell / Tuomas Mennola, Matti Noponen, Tanja Kallio, Mikko Mikkola, Tero Hottinen // *Journal of Applied Electrochemistry*. – 2004. – №34. – p. 31 – 36.
4. Felix Büchi N.. Operating Proton Exchange Membrane Fuel Cells Without External Humidification of the Reactant Gases / Büchi N. Felix, Supramaniam Srinivasan // *J. Electrochem. Soc.* – 1997. – №144(8). – p. 2767 – 2772.
5. Chu D. Analysis of PEM fuel cell stacks using an empirical current voltage equation / D. Chu, R. Jiang, C. Walker // *Journal of Applied Electrochemistry*. – 2000. – №30. – p. 365 – 370.
6. Optimal operating points of PEM fuel cell model with RSM / Dongji Xuan, Zhenzhe Li, Jinwan Kim, Youngbae Kim // *Journal of Mechanical Science and Technology*. – 2009. – №23. – p. 717 – 728.
7. Identification and analysis based on genetic algorithm for proton exchange membrane fuel cell stack / Li Xi, Cao Guang – Yi, Zhu Xin – Jian, Wei Dong // *J. Cent. South Univ. Technol.*. – 2006. – №4(13). – p. 428 – 431.
8. Dynamics of Low – Pressure and High – Pressure Fuel Cell Air Supply Systems / Sylvain Gelfi, Anna G. Stefanopoulou, Jay T. Pukrushpan, Huei Peng // *American Control Conference*. – 2003. – №3. – p. 2049 – 2054. – ISSN 0-7803-7896-2.
9. Shi Zhongying. Effect of Compression on the Water Management of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell With Different Gas Diffusion Layers / Zhongying Shi, Xia Wang, Laila Guessous // *Journal of Fuel Cell Science and Technology*. – 2010. – №7. – p. 1 – 7.

10. Dannenberg K. Mathematical model of the PEMFC / K. Dannenberg, P. Ekdunge, G. Lindbergh // Journal of Applied Electrochemistry. – 2000. – №30. – p. 1377–1387.
11. Afshari E.. Analysis of Heat Transport in a Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cell / E. Afshari, S.A. Jazayeri // American Journal of Applied Sciences. – 2009. – №6(1). – p. 101–108.
12. Shan Yuyao. Modeling and simulation of a PEM fuel cell stack considering temperature effects / Yuyao Shan, Song – Yul Choe // Journal of Power Sources. – 2006. – №158. – p. 274–286.
13. Control Strategies Of Embedded Fuel Cell – supercapacitor hybrid source / P. Thounthong, S. Rael, H. Gualous, D. Hissel, B. Davat, A. Berthon // 2nd European Symposium on Supercapacitors and Applications ESSCAP 2006. – Lausanne. – p. 1–6.
14. 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.
15. 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.
16. Suh Kyung – Won. Coordination of Converter and Fuel Cell Controllers / Kyung – Won Suh, Anna G. Stefanopoulou // Intelligent Control, 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on, Mediterrean Conference on Control and Automation. – 2005. – p. 563–568. – ISBN 0-7803-8936-0.
17. 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.
18. 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.

## ПРИНЦИПЫ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМИ УСТАНОВКАМИ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ С ВОДОРОДНО-КИСЛОРОДНЫМИ ТОПЛИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

КОЛЛАРОВ А. Ю.

*Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет»*

**Аннотация.** Определение критериев оптимального управления автономными установками электропитания с водородно-кислородными топливными элементами, в качестве источников электрической энергии, с целью обеспечения передачи максимальной мощности (энергии) от источника к потребителю.

**Цель.** Поиск и систематизация критериев оптимального управления автономными системами электропитания с водородно-кислородными топливными элементами.

**Методика.** Анализ современных методов оптимизации управления автономной системы электропитания с водородно-кислородным топливным элементом с точки зрения передачи максимальной энергии потребителю.

**Результаты.** Исследованы проблемы управлением передачи максимальной мощности от автономной системы электропитания с водородно-кислородным топливным элементом к нагрузке и

приведены наиболее оптимальные методы оптимизации управления первичным источником электроэнергии.

**Научная новизна.** Впервые систематизированы критерии оптимального управления автономными установками электропитания с водородно-кислородными топливными элементами с целью обеспечения передачи максимальной мощности от источника к нагрузке.

**Практическая значимость.** Реализация критериев оптимального управления автономными установками электропитания с водородно-кислородными топливными элементами повысит эффективность передачи электрической энергии от источника к нагрузке.

**Ключевые слова:** автономная система электропитания, водородно-кислородный топливный элемент, передача максимальной мощности, многомерность.

## **PRINCIPLES OF THE OPTIMAL CONTROL OF THE AUTONOMOUS INSTALLATIONS OF POWER SUPPLY WITH THE HYDROGEN-OXYGEN FUEL ELEMENTS**

KOLLAROV O.Y.

**Summary.** Definition of criteria of optimal control of autonomous installations of power supply with hydrogen-oxygen fuel elements, as sources of electric energy, for ensuring transfer of the maximum power (energy) from a source to the consumer.

**Purpose.** Search and systematization of criteria of optimal control of autonomous power supply systems with hydrogen-oxygen fuel elements.

**Technique.** The analysis of modern methods of optimization of management of an autonomous power supply system with a hydrogen-oxygen fuel element from the point of view of transfer of the maximum energy to the consumer.

**Results.** Problems by management of transfer of the maximum power from an autonomous power supply system with a hydrogen-oxygen fuel element to load are examined and the most optimal methods of optimization of management of primary source of the electric power are given.

**Scientific novelty.** Criteria of optimal control of autonomous installations of power supply with hydrogen-oxygen fuel elements with the purpose of ensuring transfer a maximum power from a source to load are systematized for the first time.

**Practical importance.** Realization of criteria of optimal control of autonomous power supply installations with hydrogen-oxygen fuel elements will increase efficiency of transfer of electric energy from a source to load.

**Keywords:** *Autonomous power supply system, a hydrogen-oxygen fuel cell, maximum power transmission, multi-dimensionality.*