

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 544.6.018

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2025.109.0.56

СПОСІБ СКИДАННЯ НАКОПИЧЕНИХ ВОДНЮ
Й КИСНЮ З ЕЛЕКТРОЛІЗНОЇ СИСТЕМИ ПІД ВИСОКИМ ТИСКОМ

Котенко А. Л., Зіпунніков М. М., Котенко Д. А.

Інститут енергетичних машин і систем ім. А. М. Підгорного НАН України

Анотація. У статті подано спосіб регулювання скидання водню (кисню) з електролізера під час безперервної роботи електролізної комірки під тиском. Розглянуто функціональну схему роботи безмембранного електролізера, оснащеного запірно-регулювальною арматурою з ПД-регулятором. Цей спосіб дозволяє здійснювати безпечно скидання водню та кисню під час роботи та обслуговування електролізної системи високого тиску.

Ключові слова: електролізер, водень, скидання газів, регулятор тиску, функціональна схема.

Вступ

Системи електролізу лужної води потенційно можуть полегшити перехід до екологічно безпечного зберігання енергії у формі водню з огляду на їх тривале комерційне використання в промисловості [1]. Лужні електролізери вимагають менш дорогих матеріалів, як порівняти з електролізерами з протонообмінною мембраною або твердооксидними електролізерами, що призводить до зниження капітальних та експлуатаційних витрат [2, 3].

Тому проблема розроблення енергозберігальної технології лужного електролізу є актуальною для розвитку водневих технологій.

Процес розроблення безмембранних електролізерів розпочався як спосіб усунення необхідності використання мембрани в процесі електролізу води та зменшення капітальних, а також експлуатаційних витрат на електролізні комірки [4, 5].

Однак у безмембранних електролізерах перевага надається використанню лужних електролітів замість кислих, насамперед через доступність широко розповсюджених та економічно ефективних каталізаторів [6]. Ця перевага обумовлена можливістю значного зниження вартості та впливу на довкілля через використання каталітичних матеріалів.

Розроблена безмембранна технологія електрохімічної генерації водню та кисню високого тиску з використанням як матеріалів електродів недефіцитних металів, що мають змінну валентність, забезпечує зниження питомих енерговитрат на 15–17 %, як порівняти з лужними електролізерами.

Аналіз публікацій

У промисловості використовуються традиційні електролізери з рідким лужним електролітом, що забезпечує генерацію газів із тиском 0,05–1,6 МПа в діапазоні температур від 333 К до 353 К і за густини струму 1200–2500 А/м². Водночас енерговитрати (залежно від температури процесу, тиску, якості електродів, конструкції електролізера та інших факторів) змінюються в межах від 4,3 кВт·год/м³ до 5,2 кВт·год/м³ водню [7–13]. У відомих моделях електролізерів зниження енергетичних витрат досягається способом підвищення робочої температури та використання як електродів платини або рідкоземельних металів у технологічному процесі іонообмінних мембран. Це призводить до подорожчання обладнання, підвищення вимог до обслуговування, зменшення рівня надійності та зменшення ресурсу, а також обмежує рівень тиску газів, що генеруються.

Під час експлуатації мембранних електролізерів через коливання перепаду тиску між комірками та зневоднення верхньої частини мембран внаслідок розкладання фаз газорідної суміші відбувається процес викришування мембран, що призводить до руйнування конструкції електролізної комірки.

Для усунення цих недоліків деякі фірми, зокрема Chlorine Engineers Corp. Ltd», додатково оснащують прилади електричними системами розподілу струму, підвищують рівномірність густини струму між окремими комірками електролізера. З цією метою розроблені спеціальні конструкції електродних пластин, що мають елементи, які відводять гази в заелектродний простір, зок-

рема й завдяки організації високої швидкості руху газорідинної суміші способом примусової циркуляції електроліту. Зазначені заходи покращують ситуацію, але кардинально не вирішують проблеми. Найбільш ефективним є технічне рішення, що містить використання розділових мембран. Тому перспективним напрямом розвитку електролізної техніки є вдосконалення безмембранної технології електрохімічної генерації водню та кисню високого тиску з використанням виготовлених електродів із металів зі змінною валентністю [14–16].

Мета та постановка задачі

Метою роботи є розроблення способу регулювання скидання водню (кисню) з системи сепарації газів електролізера в процесі безперервної роботи електролізної системи під тиском. Для досягнення поставленої мети функціональна схема роботи електролізної системи забезпечена запірно-регулювальною арматурою з ПІД-регулятором для скидання водню та кисню з сепараторів під час роботи та подальшого обслуговування електролізера.

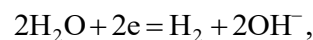
Основний матеріал дослідження

Комплексні дослідження електролізних процесів розкладання води в лужному електроліті були проведені на експериментальному стенді з однією електролізною коміркою, що дозволяє моделювати процеси, які здійснюються в основних елементах електролізної системи, яка складається з електролізної комірки, з'єднувальних трубопроводів, сепараторів і запірно-регулювальної арматури [15].

Під час проведення експериментальних досліджень було використано методику, подану в [15, 16]. У процесі реалізації запропонованої технології з циклічним типом видачі споживачеві газів (H_2 та O_2) реакція розкладання води відбувається безперервно з одночасним виділенням водню та кисню в електролізній комірці. Водночас у першому напівциклі водень виділяється на пасивному електроді в газоподібному вигляді та подається в магістраль високого тиску, а кисень зв'язується хімічно активним електродом (утворюючи хімічне з'єднання). У наступному напівциклі здійснюється електрохімічне відновлення воднем активного електрода, що супроводжується виділенням кисню на пасивному електроді та його відбором у зовнішню магістраль.

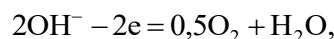
Під час електролізу води основними процесами на електродах як у кислих, так і в лужних розчинах є такі:

– на катоді – відновлення води з виділенням водню:



$$E_{H_2O/H_2}^0 = -0,828 \text{ В};$$

– на аноді – окислення води з виділенням кисню:



$$E_{H_2/OH^-}^0 = 0,401 \text{ В}.$$

У процесі роботи електролізера скидання накопиченого водню та кисню відбувається в умовах, коли тиск перевищує зазначене значення ($P_{зад}$) на помилку регулювання (ΔP), у цьому випадку ($P_{зад} + \Delta P$) – це верхня межа, за якої чистота газів буде відповідати рекомендованій. Якщо ($P_{зад} + \Delta P$) буде збільшена, то більше розчиненого в електроліті газу надійде до споживача.

На рис. 1 наведено функціональну схему роботи електролізної системи з ПІД-регулятором тиску.

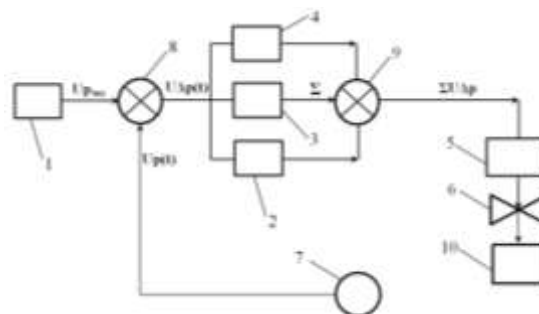


Рис. 1 – Функціональна схема роботи електролізної системи з ПІД-регулятором тиску електролізера: 1 – датчик заданого сигналу величини тиску; 2 – диференційна ланка регулятора; 3 – інтегральна ланка регулятора; 4 – пропорційна ланка регулятора; 5 – електро-механічний привід; 6 – кран; 7 – вимірювальний датчик фактичного тиску; 8, 9 – суматори; 10 – електролізер; $U_{зад}$ – сигнал величини заданого тиску; $U_p(t)$ – сигнал величини фактичного тиску; $U_{\Delta p}(t)$ – сигнал величини помилки; $\Sigma U_{\Delta p}(t)$ – сумарний сигнал помилки.

Для підтримки заданого тиску електролізної установки та мінімізації відхилень використано електромеханічний привід крана з ПІД-регулятором:

$$\Delta P = P_{\text{факт}} - P_{\text{зад}},$$

де ΔP – помилка регулювання (неузгодженість), МПа, $P_{\text{факт}}$ – фактичний тиск в електролізері, МПа.

Функції роботи пропорційної (П), інтегральної (І), диференційної (Д) ланок ПІД-регулятора визначаються за такими залежностями:

$$P = K_P U \Delta p(t),$$

де K_P – коефіцієнт посилення пропорційної ланки регулятора;

$$I = K_I \int U \Delta p(t),$$

де K_I – коефіцієнт посилення інтегрувальної ланки регулятора;

$$D = K_D \frac{dU \Delta p(t)}{dt},$$

де K_D – коефіцієнт посилення диференційної ланки регулятора.

У разі правильного вибору коефіцієнтів K_P , K_I , K_D неузгодженість $\Delta P \rightarrow 0$.

На рис. 2 наведено підтримку тиску згенерованих газів ПІД-регулятором в електролізері відносно $P_{\text{зад}}$ від моменту початку роботи до виходу на заданий режим.

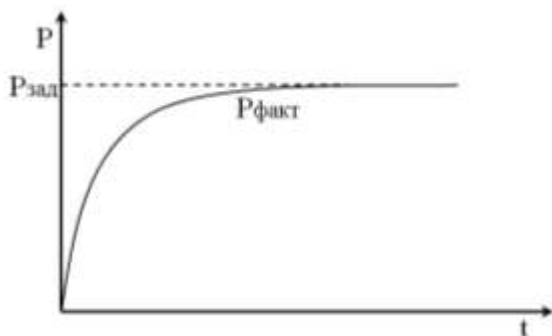


Рис. 2 – Підтримка постійного тиску згенерованих водню та кисню від початку роботи електролізера до виходу на заданий режим.

Якщо $P_{\text{факт}} = P_{\text{зад}} \rightarrow \Delta P = 0$. Тобто фактичний тиск дорівнює заданому з неузгодженістю, яка дорівнює нулю. Під час проведення відповідних регламентних робіт з

безмембранним електролізером високого тиску можливе отримання необхідної чистоти водню (кисню), що генерується. Утримання постійного заданого тиску відбувається за допомогою регулювального голкового крана з електроприводом завдяки зміні прохідного перерізу. Кран керується ПІД-регулятором. Закон керування гідравлічною схемою електролізера залежить від параметрів зворотного зв'язку ПІД-регулятора, режимів роботи електролізної комірки та споживача. Цей спосіб забезпечує безперервний режим роботи електролізера за заданого тиску.

Висновок

Розроблено спосіб регулювання безпечного скидання накопичених газів з електролізної системи високого тиску під час безперервної та циклічної роботи електролізера.

Наведено функціональну схему роботи безмембранного електролізера, оснащеного запірно-регулювальною арматурою з ПІД-регулятором для дозованого скидання водню та кисню з сепараторів до накопичувачів газу.

Розглянуто функції роботи пропорційної, інтегральної, диференційної ланок ПІД-регулятора для підтримки заданого тиску електролізної установки та мінімізації відхилень. Такий спосіб забезпечує безперервний режим роботи електролізера за заданого тиску.

Література

1. Michel Noussan, Pier Paolo Raimondi, Rossana Scita, and Manfred Hafner. The role of green and blue hydrogen in the energy transition – A technological and geopolitical perspective. Sustainability, 2020. 13(1). P. 298. <https://doi.org/10.3390/su13010298>
2. Shan Wang, Aolin Lu, and Chuan-Jian Zhong. Hydrogen production from water electrolysis: role of catalysts. Nano Convergence. 2021. 8. P. 1–23. <https://doi.org/10.1186/s40580-021-00254-x>
3. Martín David, Carlos Ocampo-Martínez, and Ricardo Sánchez-Peña. Advances in alkaline water electrolyzers: A review. Journal of Energy Storage. 2019. 23. P. 392–403. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.03.001>
4. Jiang L., Myer B., Tellefsen K., and Pau S. A planar microfabricated electrolyzer for hydrogen and oxygen generation. Journal of Power Sources. 2009. 188(1). P. 256–260. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.11.099>
5. Shigeru Ando, Hisato Haraga, Hidetaka Miyahara, Junji Tanaka, and Hiroshi Takamatsu, Mem-

- braneless water electrolyzer. 1996. Google Patents.
6. Marian Chatenet, Bruno G. Pollet, Dario R. Dekel, Fabio Dionigi, Jonathan Deseure, Pierre Millet, Richard D. Braatz, Martin Z. Bazant, Michael Eikerling, and Iain Staffell. Water electrolysis: from textbook knowledge to the latest scientific strategies and industrial developments. *Chemical Society Reviews*. 2022. <https://doi.org/10.1039/D0CS01079K>.
 7. Carmo M., Fritz D., Mergel J., Stolten D. A Comprehensive review on PEM water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2013. 38(12). Pp. 4901–4934. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.151>
 8. Rakousky C., Reimer U., Wippermann K., Kuhri S., Carmo M., Lueke W., Stolten D. Polymer electrolyte membrane water electrolysis: Restraining degradation in the presence of fluctuating power. *Journal of Power Sources*. 2017. 342. Pp. 38–47. DOI:[10.1016/J.JPOWSOUR.2016.11.118](https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2016.11.118)
 9. Schoots K., Ferioli F., Kramer G.J., van der Zwaan BCC. Learning curves for hydrogen production technology: an assessment of observed cost reductions. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2008. 33(11). Pp. 2630–2645. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.03.011>
 10. Pletcher D., Li X. Prospects for alkaline zero gap water electrolyzers for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2011. 36(23). Pp. 15089–15104. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.08.080>
 11. Langemann M., Fritz D., Müller M., Stolten D. Validation and characterization of suitable materials for bipolar plates in PEM water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015. 40(35). Pp. 11385–11391. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.04.155>
 12. Laguna-Bercero M. Recent advances in high temperature electrolysis using solid oxide fuel cells: A review. *Journal of Power Sources*. 2012. 203. Pp. 4–16. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.12.019>
 13. Phillips R., Dunnill C. Zero gap alkaline electrolysis cell design for renewable energy storage as hydrogen gas. *RSC Advances*. 2016. 6(102). Pp. 100643–100651. <https://doi.org/10.1039/C6RA22242K>
 14. Smart pv-H₂ grid energy complex / V. V. Solovey et. al. Проблеми машинобудування. 2017. 20(3). Pp. 49–53. <https://doi.org/10.15407/pmach2017.03.049>
 15. Solovey V., Nguyen Tien K., Zipunnikov M., Shevchenko A. Improvement of the membraneless electrolysis technology for hydrogen and oxygen generation. *French-Ukrainian Journal of Chemistry*. 2018. 6(2). Pp. 73–79. <https://doi.org/10.17721/fujcV6I2P73-79>.
 16. Solovey V. V., Shevchenko A. A., Kotenko A. L., Zipunnikov M. M., Nguyen Tien Khiem,

Bui Dinh Tri, Tran Thanh Hai. Development of high pressure membraneless alkaline electrolyser. *Int. J. Hydrog. Energy*. 2021. 47 (11). Pp. 6975–6985.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.01.209>.

References

1. Michel, Noussan, Pier, Paolo Raimondi, Rossana Scita, and Manfred Hafner. (2020). The role of green and blue hydrogen in the energy transition – A technological and geopolitical perspective. *Sustainability*. 13(1). P. 298. <https://doi.org/10.3390/su13010298>
2. Shan, Wang, Aolin, Lu, and Chuan-Jian, Zhong. (2021). Hydrogen production from water electrolysis: role of catalysts. *Nano Convergence*. 2021. 8. P. 1–23. <https://doi.org/10.1186/s40580-021-00254-x>
3. Martín David, Carlos Ocampo-Martínez, and Ricardo Sánchez-Peña. (2019). Advances in alkaline water electrolyzers: a review. *Journal of Energy Storage*. 23. P. 392–403. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.03.001>
4. Jiang, L., Myer, B., Tellefsen, K., and Pau, S. (2009). A planar microfabricated electrolyzer for hydrogen and oxygen generation. *Journal of Power Sources*. 188(1). P. 256–260.
5. Shigeru Ando, Hisato Haraga, Hidetaka Miyahara, Junji Tanaka, and Hiroshi Takamatsu, Membraneless water electrolyzer. 1996. Google Patents.
6. Marian Chatenet, Bruno G. Pollet, Dario R. Dekel, Fabio Dionigi, Jonathan Deseure, Pierre Millet, Richard D. Braatz, Martin Z. Bazant, Michael Eikerling, and Iain Staffell. (2022). Water electrolysis: from textbook knowledge to the latest scientific strategies and industrial developments. *Chemical Society Reviews*. <https://doi.org/10.1039/D0CS01079K>.
7. Carmo, M., Fritz, D., Mergel, J., Stolten, D. (2013). A comprehensive review on PEM water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. 38(12). Pp. 4901–4934. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.151>
8. Rakousky, C., Reimer, U., Wippermann, K., Kuhri, S., Carmo, M., Lueke, W., Stolten, D. (2017). Polymer electrolyte membrane water electrolysis: Restraining degradation in the presence of fluctuating power. *Journal of Power Sources*. 342. Pp. 38–47. DOI:[10.1016/J.JPOWSOUR.2016.11.118](https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2016.11.118)
9. Schoots, K., Ferioli, F., Kramer, G. J., B.C.C. van der Zwaan. (2008). Learning curves for hydrogen production technology: an assessment of observed cost reductions. *International Journal of Hydrogen Energy*. 33(11). Pp. 2630–2645. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.03.011>
10. Pletcher, D., Li, X. (2011). Prospects for alkaline zero gap water electrolyzers for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*. 36(23). Pp. 15089–15104. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.08.080>

11. Langemann, M., Fritz, D., Müller, M., Stolten, D. (2015). Validation and characterization of suitable materials for bipolar plates in PEM water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. 40(35). Pp. 11385–11391. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.04.155>
12. Laguna-Bercero, M. (2012). Recent advances in high temperature electrolysis using solid oxide fuel cells: a review. *Journal of Power Sources*. 203. Pp. 4–16. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.12.019>
13. Phillips, R., Dunnill, C. (2016). Zero gap alkaline electrolysis cell design for renewable energy storage as hydrogen gas. *RSC Advances*. 6(102). Pp. 100643–100651. <https://doi.org/10.1039/C6RA22242K>
14. Smart pv-H₂ grid energy complex / V. V. Solovey et. al. (2017). *Machine building problems*. 20(3). Pp. 49–53. <https://doi.org/10.15407/pmach2017.03.049>
15. Solovey, V., Zipunnikov, M., Nguyen Tien Khiem, Shevchenko, A. (2018). Improvement of the membrane-less electrolysis technology for hydrogen and oxygen generation. *French-Ukrainian Journal of Chemistry*. 6(2). Pp. 73–79. <https://doi.org/10.17721/fujcV6I2P73-79>
16. Solovey, V. V., Shevchenko, A. A., Zipunnikov, M. M., Kotenko, A. L., Nguyen Tien Khiem, Bui Dinh Tri, Tran Thanh Hai. (2021). Development of high pressure membrane-less alkaline electrolyser, *Int. J. Hydrog. Energy*. 47 (11). Pp. 6975–6985. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.01.209>

Котенко Анатолій Леонідович, провідний інженер відділу енергетичних машин,

ORCID [0000-0003-2715-634X](https://orcid.org/0000-0003-2715-634X),

kotenko19580820@gmail.com,

тел. +38 066-454-73-64,

Зіпунніков Микола Миколайович, к.т.н.,

с.н.с. відділу енергетичних машин,

ORCID [0000-0002-0579-2962](https://orcid.org/0000-0002-0579-2962),

zipunnikov_n@ukr.net,

тел. +38 066-695-68-72,

Котенко Дмитро Анатолійович, аспірант відділу енергетичних машин,

ORCID [0009-0006-7503-3837](https://orcid.org/0009-0006-7503-3837),

dima.kotenko.96@gmail.com,

тел. +38 073-810-11-50,

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

A method of discharging accumulated hydrogen and oxygen from the electrolysis system under high pressure.

Abstract. Problem. The article proposes a method for regulating the discharge of hydrogen (oxygen) from the electrolysis system during continuous operation of the electrolyzer under pressure. **Goal.** Development of a functional diagram of the operation of a membraneless electrolyzer equipped with shut-off and control valves with a PID controller. **Methodology.** This method allows for the metered discharge of hydrogen and oxygen from the corresponding separators during operation and maintenance of the electrolysis system. **Results.** The proposed method allows for the safe discharge of hydrogen and oxygen from the high-pressure electrolysis system during operation and maintenance. **Originality.** The resulting hydraulic circuit for the operation of a membraneless electrolyzer allows for the metered discharge of hydrogen and oxygen from the separators into gas storage tanks, both during the development and operation of existing high-pressure electrolyzers. When implementing the proposed technology, with the cyclical nature of the delivery of gases (H₂ and O₂) to the consumer, the water decomposition reaction occurs continuously with the simultaneous release of hydrogen and oxygen in the electrolysis cell. In this case, in the first half-cycle, hydrogen is released on the passive electrode in gaseous form and fed into the high-pressure main, and oxygen is chemically bound by the active electrode (forming a chemical compound). In the next half-cycle, electrochemical reduction of the active electrode with hydrogen is carried out, which is accompanied by the release of oxygen on the passive electrode and its withdrawal into the external main. **Practical value.** The use of this hydraulic circuit for the operation of a membraneless electrolyzer equipped with shut-off and control valves with a PID controller allows for the metered discharge of hydrogen and oxygen from the electrolysis system into gas storage tanks.

Key words: electrolyzer, hydrogen, gas discharge, pressure regulator, functional diagram.

Kotenko Anatolii Leonidovych, leading engineer of the department of power machines,

ORCID [0000-0003-2715-634X](https://orcid.org/0000-0003-2715-634X), [koten-](mailto:kotenko19580820@gmail.com)

ko19580820@gmail.com,

Zipunnikov Mykola Mykolayovych, Ph.D., senior research associate, department of power machines,

ORCID [0000-0002-0579-2962](https://orcid.org/0000-0002-0579-2962),

zipunnikov_n@ukr.net,

Kotenko Dmytro Anatoliyovych, postgraduate student of the department of power machines,

ORCID [0009-0006-7503-3837](https://orcid.org/0009-0006-7503-3837),

dima.kotenko.96@gmail.com

Anatolii Pidhornyi Institute of power machines and systems of the National academy of sciences of Ukraine, Communal str., Kharkiv, 61046, Ukraine.