

Bartosz CERAN¹

Analiza energetyczna pracy układu instalacja fotowoltaiczna–elektrolizer przeznaczonego do produkcji wodoru

Wprowadzenie

Polska jest jednym z producentów wodoru na świecie. Rocznie w Polsce produkuje się 1 mln ton wodoru, co stanowi 14% produkcji tego gazu w Europie. Wodór produkowany jest głównie w procesie reformingu parowego. Jest to wodór tzw. szary, który znajduje zastosowanie głównie w przemyśle (Ceran 2020).

Przewiduje się, że dzięki rozwojowi technologii ogniwi paliwowych, wodór będzie jednym z głównych nośników energii w przyszłości i znajdzie powszechne zastosowanie zarówno w generacji rozproszonej (Ceran 2019), (także kogeneracji rozproszonej) oraz sektorze transportu (Chmielniak 2017).

Powszechnie wiadomo, że ogniwa paliwowe z jonowymienną membraną polimerową potrzebują do pracy czystego wodoru (99,999%) (Bartosik 2016). Jedną z metod produkcji wodoru o takiej czystości, jest elektroliza wody (Kumar 2019). Zasilając elektrolizery energią z systemu elektroenergetycznego, można produkować wodór czysty, jednak nie zielony, ponieważ dostarczana energia elektryczna została wytworzona w elektrowniach opalanych paliwami kopalnymi. Wodór jest nazywany w literaturze zielonym (Wang 2019), jeśli energia dostarczana do elektrolizerów została wyprodukowana w źródłach OZE. Dzięki temu proces produkcji wodoru nie jest obciążony emisją dwutlenku węgla (Widera 2020).

Zgodnie z założeniami Polskiej Strategii Wodorowej do roku 2030 z perspektywą do roku 2040 przewiduje się wzrost liczby instalacji do produkcji wodoru typu „źródło OZE – elektrolizer” (<https://www.gov.pl>). Ma to na celu wsparcie procesu dekarbonizacji oraz produkcji czystego, zielonego wodoru. Literatura jest bogata w prace dotyczące analiz energetycznych tego typu układów. Szczególnie popularne są systemy PV-elektrolizer. Prowadzone badania naukowe głównie skupiają się na optymalizacji struktury układu PV-elektrolizer i minima-

¹ Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, Poznań; e-mail: bartosz.ceran@put.poznan.pl.

lizacji kosztów produkcji wodoru. Jest to uzasadnione, ponieważ proces produkcji wodoru w tej technologii jest jednym z najdroższych. Z drugiej strony rozwiązanie to ma duży potencjał redukcji emisji CO₂.

W literaturze jednak brakuje analiz długoterminowych, np. na okres 10 lat, które, dzięki uwzględnieniu spadku wydajności instalacji PV i elektrolizera, pozwoliłyby precyzyjnie określić koszt produkcji wodoru po kilku latach eksploatacji. Prowadzone procesy optymalizacji są realizowane dla pierwszego roku eksploatacji systemu przeznaczanego do produkcji czystego, zielonego wodoru. W opisywanych analizach nie uwzględnia się spadku wydajności procesu produkcji wodoru związanego ze spadkiem wydajności urządzeń, tj. paneli PV oraz elektrolizera.

W artykule przedstawiono analizę energetyczną pracy farmy PV o mocy zainstalowanej 1 MW_p i 4 elektrolizerów typu PEM (ang. *Proton Exchange Membrane*) o mocy 250 kW, do produkcji wodoru z uwzględnieniem wpływu spadku wydajności komponentów systemu na wzrost jednostkowego zapotrzebowania na energię elektryczną oraz na wzrost jednostkowych kosztów produkcji wodoru.

Schemat analizowanego układu

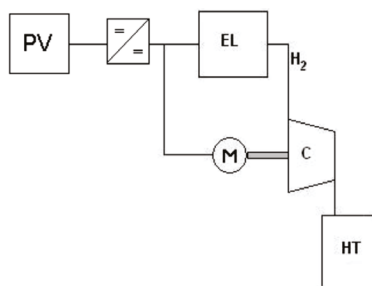
Schemat blokowy rozpatrywanego układu przedstawiono na rysunku 1.

Masę wyprodukowanego w ciągu roku wodoru można wyznaczyć na podstawie zależności (Jensen 2010):

$$m_{H_2} = \frac{A_{el} \cdot \eta_{DC/DC} \cdot \eta_{EL} \cdot \eta_{comp}}{Q_{wH_2}} \quad (1)$$

gdzie:

- A_{el} – energia elektryczna wyprodukowana przez farmę PV [kWh],
- $\eta_{DC/DC}$ – sprawność konwertera DC/DC,



Rys. 1. Schemat blokowy analizowanego układu

PV – farma fotowoltaiczna, EL – elektrolizer, HT – zbiornik wodoru, C – kompresor

Fig. 1. Block diagram of analyzed system

PV – solar farm, EL – electrolyzer, HT – hydrogen tank, FC – fuel cell, C – compressor

- η_{EL} – sprawność przetwarzania energii elektrycznej w chemiczną przez elektrolizer,
- η_{comp} – sprawność kompresora [%],
- Q_{wH_2} – wartość opałowa wodoru [kWh/kg].

Łączną moc instalacji PV wyznaczono na podstawie zależności:

$$P_{PV} = \frac{A_{el}}{T} \quad (2)$$

gdzie:

T – czas wykorzystania mocy zainstalowanej przez instalacje PV, $T = 1000$ h.

Moc instalacji PV można przedstawić za pomocą wzoru (3):

$$P_{PV} = E \cdot S \cdot [1 - \beta \cdot (\vartheta - 25)] \eta_{PV} \quad (3)$$

gdzie:

- S – powierzchnia modułów PV [m^2],
- E – natężenie promieniowania słonecznego [W/m^2],
- β – współczynnik redukcji sprawności związany z temperaturą pracy modułów [%/°C],
- ϑ – temperatura pracy modułu [°C],
- η_{PV} – sprawność modułów PV.

Spadek wydajności instalacji fotowoltaicznej, który związany jest ze spadkiem sprawności konwersji promieniowania słonecznego na energię elektryczną, opisuje wzór:

$$\Delta P_{PV} = E \cdot S \cdot [1 - \beta \cdot (\vartheta - 25)] \Delta \eta_{PV} \quad (4)$$

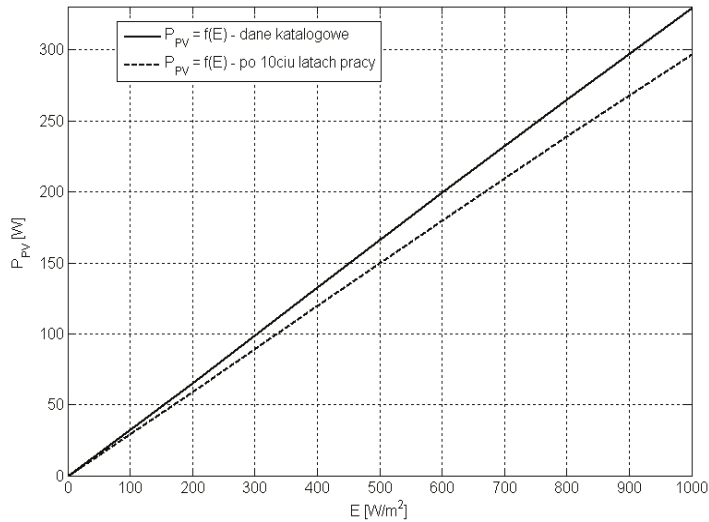
gdzie:

- ΔP_{PV} – spadek wartości mocy paneli PV,
- $\Delta \eta_{PV}$ – spadek sprawności paneli PV.

Producenci paneli PV podają w katalogach charakterystykę spadku wydajności dla 20 lat eksploatacji, gdzie gwarantowana wartość po 20 latach to nie mniej niż 80% wydajności nominalnej. Obecnie spadek wydajności wynosi od 0,6% do 1% rocznie w zależności od jakości i rodzaju paneli PV. Na rysunku 2 przedstawiono wpływ spadku wydajności panelu PV o mocy 330 W_p po 10 latach eksploatacji na charakterystykę $P_{PV} = f(E)$ (Ceran 2020).

Spadek parametrów elektrolizera wyznaczono w oparciu o autorski model starzeniowy stosu ogniwi paliwowych, który został opisany w pracy (Ceran i Orłowska 2020) na podstawie równań:

$$\Delta U_{av} = U_{av} \frac{dU_{av}}{dt} \cdot t \quad (5)$$



Rys. 2. Wpływ starzenia się paneli PV na charakterystykę $P_{PV} = f(E)$
Opracowanie własne

Fig. 2. The influence of aging of PV panels on the characteristics $P_{PV} = f(E)$

$$\Delta\eta_{El} = \frac{E_t^0}{\Delta U_{av}} \quad (6)$$

$$m_{H_2} = \frac{P_{El} \cdot \Delta\eta_{EL}}{Q_{wH_2}} \quad (7)$$

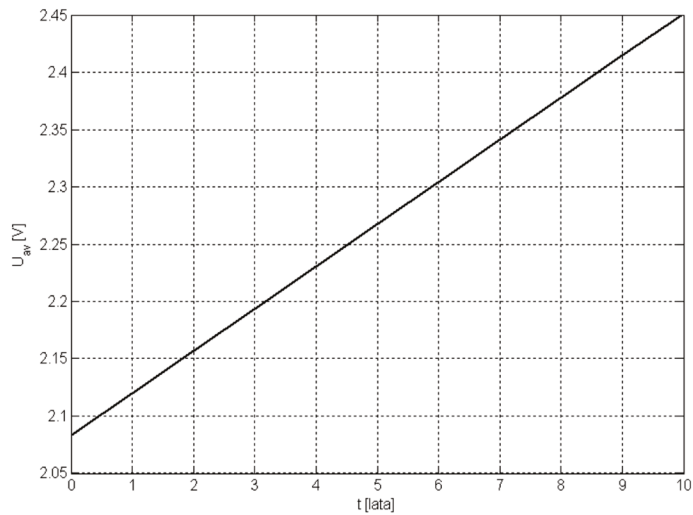
gdzie:

- ΔU_{av} – zmiana wartości średniego napięcia elektrolizera [V],
- U_{av} – wartość średniego napięcia elektrolizera [V],
- dU_{av}/dt – szybkość zmiany wartości średniego napięcia elektrolizera w czasie [V/s],
- t – czas pracy elektrolizera [s],
- $\Delta\eta_{El}$ – zmiana wartości sprawności przetwarzania energii elektrycznej na energię chemiczną w postaci wodoru,
- E_t^0 – napięcie termoneutralne (ang. *thermoneutral voltage*) [V].

Na rysunku 3 przedstawiono zmianę napięcia średniego elektrolizera o mocy 250 kW po 10 latach eksploatacji:

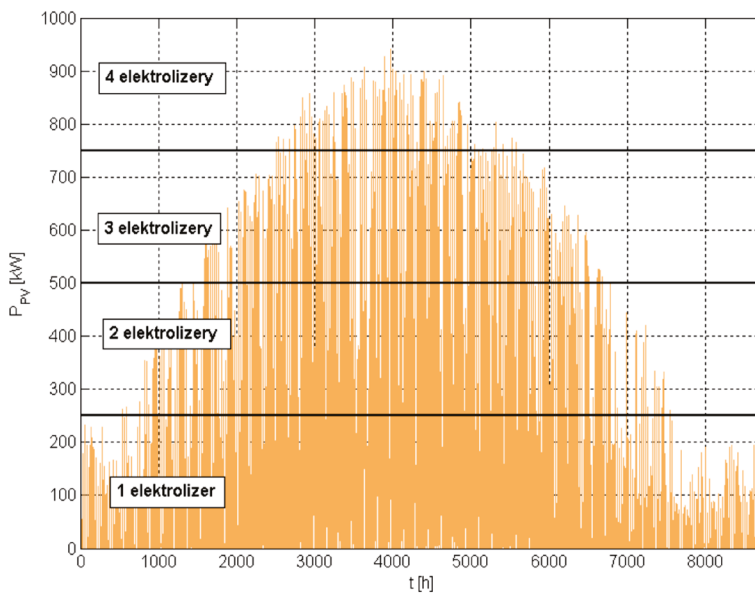
Liczbę elektrolizerów dobrano zgodnie z zależnością:

$$P_{EL} = \max(P_{PV}) \quad (8)$$



Rys. 3. Wzrost wartości U_{av} elektrolizera w funkcji lat eksploatacji
Opracowanie własne na podstawie: <https://www.hydrogen.energy.gov>

Fig. 3. Increase in the U_{av} value of the electrolyser as a function of the years of operation



Rys. 4. Wpływ produkcji energii elektrycznej przez instalacje PV na ilość pracujących elektrolizerów

Fig. 4. Impact of electricity production by PV installations on the number of working electrolysers

Jest to związane ze zmiennością produkcji energii elektrycznej przez instalację PV. Aby wykorzystać 100% energii wyprodukowanej w PV o mocy 1 MW, należy zainstalować 4 elektrolizery o mocy 250 kW (rys. 4).

Wyniki analizy energetycznej

Na podstawie analizy energetycznej określona została produkcja wodoru przez instalację PV-elektrolizer w kolejnych dziesięciu latach pracy układu z uwzględnieniem spadku wydajności komponentów systemu. W wyniku starzenia się paneli PV, roczna produkcja energii elektrycznej spada. W analizie przyjęto liniowy spadek mocy na poziomie 1% rocznie, co jest często spotykane w literaturze. Wyniki analizy przedstawiono w tabeli 1.

Rzeczywista wartość energii elektrycznej potrzebna do produkcji jednego kilograma wodoru wynosi, w pierwszym roku eksploatacji 65,67 kWh/kg.

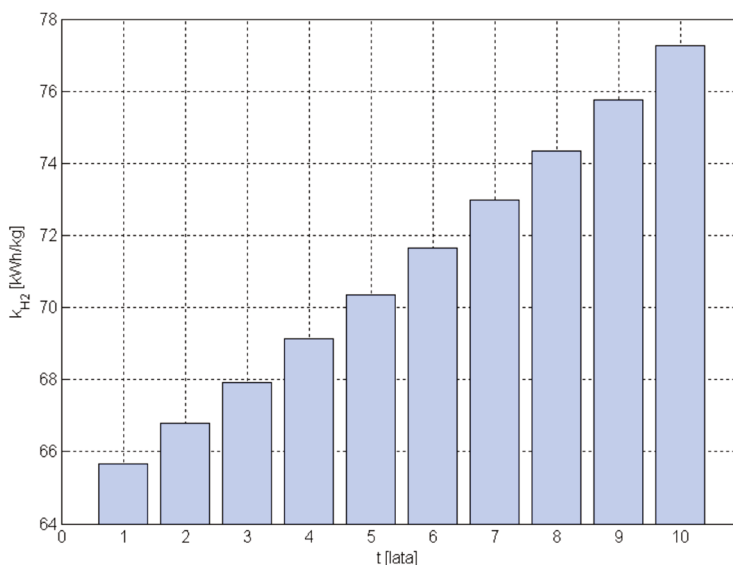
Elektrolizer, w kolejnych latach pracy, produkuje coraz mniejszą ilość wodoru w wyniku dwóch nakładających się na siebie zjawisk. Pierwszym zjawiskiem jest spadek mocy generowanej przez instalację PV w kolejnych latach. Drugim zjawiskiem jest spadek wydajności samego elektrolizera związany ze starzeniem się jego komponentów. W związku z powyższym roczna produkcja wodoru przez system spada, co skutkuje wzrostem wartości wskaźnika jednostkowego zapotrzebowania energii na produkcję 1 kg wodoru do 77,26 kWh/kg. W ciągu rozpatrywanego okresu pracy analizowanego systemu produkcji wodoru wskaźnik k_j wzrósł o 17,64%.

Na rysunku 5 przedstawiono zmiany wartości wskaźnika jednostkowego zużycia energii elektrycznej na produkcję 1 kilograma wodoru k_j [kWh/kg].

TABELA 1. Wyniki analiz energetycznej

TABLE 1. Energy analysis results

Lata	Energia PV [MWh]	Masa wyprodukowanego wodoru [kg]	Wskaźnik zużycia energii na produkcję 1 kg wodoru k_{H_2} [kWh/kg]
1	1 000	15 228,00	65,67
2	990	14 824,46	66,78
3	980	14 425,99	67,93
4	970	14 032,60	69,12
5	960	13 644,29	70,36
6	950	13 261,05	71,64
7	940	12 882,89	72,97
8	930	12 509,80	74,34
9	920	12 141,79	75,77
10	910	11 778,86	77,26



Rys. 5. Zmiana wartości wskaźnika jednostkowego zużycia energii na produkcję 1 kilograma wodoru

Fig. 5. Change in the value of the unit energy consumption index for the production of 1 kilogram of hydrogen

Koszty produkcji wodoru

Wzrost zapotrzebowania na energię potrzebną do produkcji wodoru będzie skutkowało wzrostem wartości wskaźnika jednostkowego kosztu produkcji wodoru. Jednostkowy koszt produkcji wodoru zdefiniowano wzorem:

$$k_{H_2} = \frac{K_e}{m_{H_2}} \text{ [PLN/kg]} \quad (9)$$

gdzie:

K_e – koszty eksploatacyjne związane z produkcją wodoru.

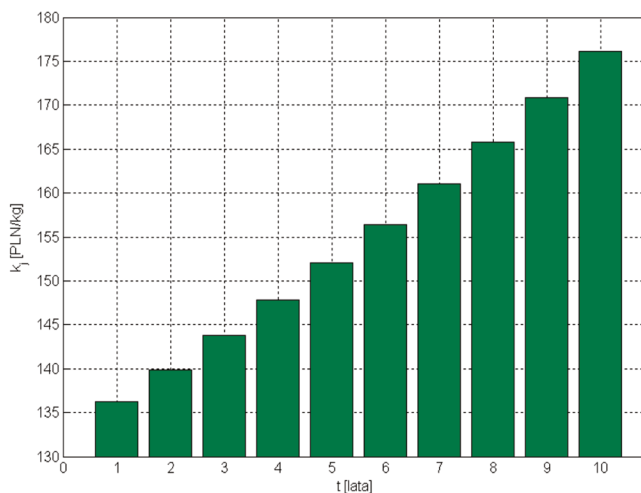
Koszty eksploatacyjne zostały wyznaczone w oparciu o równanie:

$$K_e = k_a + k_{H_2O} + k_{O\&M} \quad (10)$$

gdzie:

- k_a – koszty amortyzacji,
- k_{H_2O} – koszty zakupu wody,
- $k_{O\&M}$ – koszty operacyjne i zarządzania.

Na rysunku 6 przedstawiono zmiany wartości wskaźnika jednostkowego kosztu produkcji 1 kilograma wodoru k_j [kWh/kg].



Rys. 6. Zmiana wartości wskaźnika jednostkowego kosztu produkcji 1 kilograma wodoru

Fig. 6. Change in the value of the unit production cost index for 1 kilogram of hydrogen

Analizowana metoda produkcji czystego wodoru, jak wspomniano we wstępie, jest jedną z droższych. Jest to związane z niską gęstością energii pierwotnej dostarczanej do systemu. Szacowany jednostkowy koszt produkcji wodoru, w pierwszym roku eksploatacji systemu, wynosi 136,26 PLN/kg i wzrasta w ciągu dziesięciu lat pracy układu o 29,23% do wartości równej 176,09 PLN/kg.

Proponowany sposób analizy systemu produkcji wodoru PV-elektrolizer pozwala na bardziej dokładne określenie wskaźników energetycznych i ekonomicznych opisujących pracę układu po ich wieloletniej eksploatacji.

Podsumowanie

Proces dekarbonizacji ma być związany z rozwojem technologii wodorowych oraz ze zwiększaniem wykorzystania wodoru jako paliwa oraz jako nośnika energii.

Niezależnie od sposobu wykorzystania wodoru, czy to w transporcie, czy w energetyce rozproszonej, należy prowadzić analizy wydajności systemów produkcji i użytkowania wodoru w perspektywie długoterminowej, z uwzględnieniem spadku wydajności urządzeń produkujących lub zużywających wodór. Przeprowadzenie analiz techniczno-ekonomicznych pracy tego typu instalacji w oparciu tylko o parametry katalogowe komponentów systemu może doprowadzić do dużych różnic między planowanymi uzyskami produkcji wodoru a rzeczywistymi wartościami w kolejnych latach. Należy pamiętać, że obecnie eksploatację syste-

mów PV-elektrolizer planuje się na około 10–20 lat, gdzie po 10 latach zakłada się wymianę elektrolizera na nowy.

Przeprowadzona analiza pracy farmy fotowoltaicznej o mocy 1 MWp pracującej na 4 elektrolizery typu PEM o mocy 4×250 kW wykazała, że po dziesięciu latach eksploatacji wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną do produkcji 1 kg wodoru wrasta o 17,64%, natomiast jednostkowy koszt produkcji wodoru wzrasta o 29,23% w stosunku do roku pierwszego.

Otrzymane wyniki pokazują, że nieuwzględnianie efektu starzenia się wygeneruje istotny błąd w każdej analizie energetycznej tego typu układów.

Literatura

- Bartosik M. i in. 2016 – Bartosik, M., Kamrat, W., Kaźmierkowski, M., Lewandowski, W., Pawlik, M., Peryt, T., Skoczkowski, T., Strupczewski, A. i Szeląg, A. 2016. Magazynowanie energii elektrycznej i gospodarka wodowa. *Przegląd elektrotechniczny* 12, s. 332–340.
- Ceran, B. 2019. The concept of use of PV/WT/FC hybrid power generation system for smoothing the energy profile of the consumer. *Energy* 167, s. 853–865, DOI: 10.1016/j.energy.2018.11.028.
- Ceran, B. 2020. Multi-Criteria comparative analysis of clean hydrogen production scenarios. *Energies* 13(16), DOI: 10.3390/en13164180.
- Ceran i in. 2020 – Ceran, B., Orłowska A. i Krochmalny, K. 2020. The method of determining PEMFC fuel cell stack performance decrease rate based on the voltage-current characteristic shift. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 22(3), s. 530–535.
- Chmielniak i in. 2017 – Chmielniak, T., Lepczy, S. i Mońka, P. 2017. Energetyka wodorowa – podstawowe problemy. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* 20(3), s. 55–66.
- Jensen i in 2010 – Jensen J.O., Li, Q. i Bjerrum, N. 2010. *The energy efficiency of onboard hydrogen storage* [W:] *Energy Efficiency*. s. 143–156, DOI: 10.5772/9833.
- Kumar S.S. i Himabindu, V. 2019. Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. *Materials Science for Energy Technologies* 2, s. 442–454, DOI: 10.1016/j.mset.2019.03.002.
- [Online] <https://www.hydrogen.energy.gov> [Dostęp: 05.08.2021].
- [Online] <https://www.gov.pl/web/klimat/polska-strategia-wodorowa-do-roku-2030-z-perspektywa-do-roku-2040-opublikowana-w-monitorze-polskim> [Dostęp: 05.01.2022].
- Wang i in. 2019 – Wang, M., Wang, G., Sun, Z., Zhang Y. i Xu, D. 2019. Review of renewable energy-based hydrogen production processes for sustainable energy innovation. *Global Energy Interconnection* 2, s. 436–443, DOI: 10.1016/j.gloi.2019.11.019.
- Widera, B. 2020. Renewable hydrogen implementations for combined energy storage, transportation and stationary applications. *Thermal Science and Engineering Progress* 16, DOI: 10.1016/j.tsep.2019.100460.

Analiza energetyczna pracy układu instalacja fotowoltaiczna–elektrolizer przeznaczony do produkcji wodoru

Słowa kluczowe: wodór, elektrolizer PEM, analiza energetyczna, straty energii

Streszczenie: W publikacji przedstawiono wyniki analizy energetycznej układu farma fotowoltaiczna – elektrolizer do produkcji czystego, zielonego wodoru. Analizę przeprowadzono dla okresu 10-letniej eksploatacji systemu z uwzględnieniem wpływu spadku wydajności urządzeń na efektywność energetyczną procesu produkcji wodoru. Zdefiniowano równania bilansowe systemu. Na podstawie produkcji energii elektrycznej przez instalację PV dobrano liczbę pracujących elektrolizerów. Przedstawiono wpływ starzenia się paneli PV na charakterystykę eksploatacyjną $P_{PV} = f(E)$. Opisano model matematyczny przeznaczony do wyznaczania spadku wydajności elektrolizera na podstawie wzrostu wartości napięcia średniego U_{av} . Wyznaczono zmiany wartości wskaźnika

jednostkowego kosztu produkcji wodoru oraz zmiany wartości wskaźnika jednostkowego zapotrzebowania na energię do produkcji 1 kg wodoru. Uzyskane wyniki zaprezentowano w formie graficznej za pomocą wykresów słupkowych. W pracy zwrócono uwagę na fakt, że nieuwzględnianie spadku wydajności urządzeń prowadzi do uzyskania błędnych wyników dotyczących prognozowanej ilości produkowanego wodoru. Wykazano konieczność prowadzenia analiz techniczno-ekonomicznych pracy rozpatrywanego systemu w perspektywie długoterminowej.

Energy analysis of the system PV–electrolyser designed for the production of hydrogen

Keywords: hydrogen, PEM electrolyser, energy analysis, energy losses

Abstract: The paper presents the results of the energy analysis of the photovoltaic farm-electrolyser system for the production of clean, green hydrogen. The analysis was carried out for the 10-year period of system operation, taking into account the impact of the decrease in equipment efficiency on the energy efficiency of the hydrogen production process. The system balance equations have been defined. The number of working electrolysers was selected based on the production of electricity by PV installations. The influence of aging of PV panels on the operational characteristics of $P_{PV} = f(E)$ was presented. The described mathematical model is intended to determine the decrease in the efficiency of the electrolyser on the basis of the increase in the value of the average voltage U_{av} . Changes in the value of the unit cost of hydrogen production and changes in the unit index of energy demand for the production of 1 kg of hydrogen were determined. The obtained results are presented graphically by means of bar charts. The paper emphasizes the fact that ignoring the decrease in the efficiency of the devices leads to erroneous results regarding the forecasted amount of produced hydrogen. The necessity to conduct technical and economic analyzes of the work of the analyzed system in the long term was demonstrated.