

doi:10.15199/48.2024.06.11

System sterowania zasilaniem elektrolizera alkalicznego

Streszczenie. W pracy przedstawiono opracowany i wykonany system do badania właściwości elektrolizera alkalicznego. Zaprezentowano koncepcję i konstrukcję urządzenia, jego schemat blokowy, opis oprogramowania software procesora wbudowanego NIOS II oraz firmware układu FPGA. Opisano dedykowaną aplikację opracowaną dla środowiska LabVIEW. Przedstawiono wyniki pomiarów ilustrujących wpływ sygnału sterującego na wybrane parametry elektrolizera. Przedyskutowano uzyskane wyniki pomiarów.

Abstract. This paper presents a developed and constructed system for testing the properties of an alkaline electrolyzer. The concept and design of the device, its block diagram, description of the NIOS II embedded processor software and the FPGA firmware are presented. A dedicated LabVIEW application is described. Measurements results illustrating the influence of the control signal on selected electrolyzer parameters are presented. The obtained results of measurements were discussed. (**Alkaline electrolyzer power control system**)

Słowa kluczowe: elektrolizer alkaliczny, wodór, system sterowania, FPGA, LabVIEW, NIOS II, Altium Designer, Quartus Prime, Verilog
Keywords: alkaline electrolyzer, hydrogen, control system, FPGA, LabVIEW, NIOS II, Altium Designer, Quartus Prime, Verilog

Wstęp

Odnawialne źródła energii są obecnie szybko rozwijającą się gałęzią gospodarki światowej. Szczególnie rozwijaną technologią są ogniwa paliwowe, gdzie jako nośnik energii wykorzystywany jest wodór [1, 2]. Gaz ten jest postrzegany jako paliwo przyszłości służące do wytwarzania energii elektrycznej do napędu pojazdów bez zanieczyszczania środowiska. Wodór może być również używany do przechowywania nadmiaru energii elektrycznej wytwarzanej przez odnawialne źródła energii, takie jak systemy fotowoltaiczne czy farmy wiatrowe [3]. Jednym ze sposobów wytwarzania wodoru jest proces elektrolizy [4], który realizowany jest za pomocą elektrolizerów.

Najczęściej do zasilania elektrolizerów stosuje się źródła napięcia stałego [4, 5], jednak znane są z literatury [6] także rozwiązania zasilania tego urządzenia napięciem o przebiegu impulsowym. W pracy [7] przeanalizowano zasilanie elektrolizera alkalicznego napięciem o przebiegu prostokątnym. Autorzy stawiają tam tezę, że możliwa jest optymalizacja sprawności wytwarzania wodoru w procesie elektrolizy, dzięki właściwemu doborowi parametrów napięcia zasilającego elektrolizer. W pracy [8] zaproponowano model elektrolizera w postaci obwodu elektrycznego dedykowanego do analizy w środowisku SPICE. Zaprezentowane w cytowanej pracy wyniki obliczeń prezentują wpływ amplitudy, wartości średniej prądu, współczynnika wypełnienia i częstotliwości napięcia zasilania na produktywność oraz sprawność przeprowadzanego procesu elektrolizy.

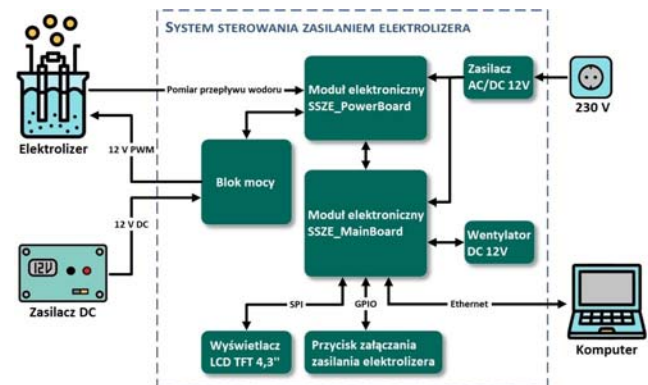
W niniejszej pracy przedstawiono kompletny, autorski system sterowania zasilaniem elektrolizera napięciem o przebiegu impulsowym. Układ sterowania urządzenia został oparty na programowalnej matrycy bramek FPGA, co umożliwiło precyzyjną regulację oraz odczyt parametrów pracy systemu, takich jak częstotliwość oraz współczynnik wypełnienia napięcia zasilającego.

W kolejnych rozdziałach opisano koncepcję budowy urządzenia i jego konstrukcję. Omówiono architekturę oprogramowania oraz aplikację monitorującą wykonaną w środowisku LabVIEW. Przedstawiono również wyniki pomiarów wpływu sygnału sterującego na wybrane parametry elektrolizera. Przedyskutowano uzyskane wyniki.

Koncepcja budowy urządzenia

Na rys. 1 przedstawiono schemat blokowy systemu zasilania elektrolizera wraz z zasilaczem zewnętrznym, elektrolizerem alkalicznym oraz komputerem, służącym do monitorowania parametrów pracy systemu.

Urządzenie zostało oparte na dwóch modułach elektronicznych SSZE_MainBoard oraz SSZE_PowerBoard, które pełnią odpowiednio funkcje układu sterującego oraz wykonawczego.



Rys. 1. Schemat blokowy systemu sterowania zasilaniem elektrolizera

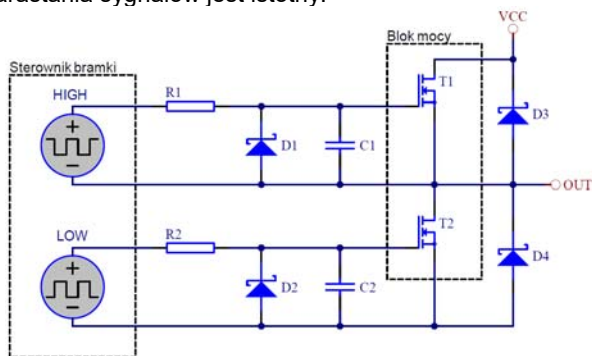
Układem sterującym modułu SSZE_MainBoard jest układ FPGA Cyclone IV typ EP4CE22F1717N produkcji Intel, który realizuje wszystkie operacje z poziomu odpowiednio skonfigurowanych bramek logicznych oraz z poziomu zaimplementowanego procesora wbudowanego NIOS II. Moduł obsługuje sieć Ethernet, wyświetlacz LCD, przycisk zasilania oraz steruje pracą wentylatora.

Zadaniem modułu SSZE_PowerBoard jest sterowanie blokiem mocy za pomocą wbudowanego sterownika bramki typu 2EDF7275F [9]. Dodatkowo moduł zawiera układy wykonawcze dla pomiarów realizowanych przez przetwornik analogowo-cyfrowy układu sterującego.

Główną funkcją opracowanego systemu sterowania zasilaniem elektrolizera jest przekształcenie napięcia stałego z zewnętrznego zasilacza w ciąg impulsów prostokątnych o regulowanym współczynniku wypełnienia i wysokiej wydajności prądowej, dochodzącej do 70 A.

Na rys. 2 przedstawiono uproszczony schemat ideowy wyjściowego układu mocy, który składa się ze sterownika bramki, bloku mocy oraz komponentów zabezpieczających i stabilizujących pracę układu. Blok mocy natomiast stanowią umieszczone na radiatorze tranzystory MOSFET wraz z czujnikiem temperatury. Układ mocy przekształca napięcie stałe VCC pochodzące z zewnętrznego zasilacza DC na napięcie w kształcie ciągu impulsów prostokątnych, które

poprzez wyjście OUT zasilają elektrolizer. Napięcie to wytwarzane jest za pomocą pary tranzystorów MOSFET, pracujących w układzie totem-pole i załączanych przez sterownik bramki. Zastosowane w układzie diody D1, D2, D3 oraz D4 zabezpieczają sterownik bramki oraz tranzystory przed przepięciami i wraz z kondensatorami C1 oraz C2 utrzymują stabilność całego układu mocy. Rezystory R1 i R2 poza funkcją ochronną przed przepięciami, minimalizują również wpływ pojemności bramki, co jest ważne w szybkich układach, gdzie czas narastania sygnałów jest istotny.



Rys. 2. Schemat ideowy wyjściowego układu mocy

Układ FPGA generuje dwa sygnały prostokątne odwrócone w fazie oraz przesunięte względem siebie o określone opóźnienie (*Dead Time*), które zabezpiecza tranzystory przed jednoczesnym przewodzeniem. Ze względu na precyzyjną kontrolę czasu realizacji instrukcji oraz równoległą pracę dla wszystkich wykonywanych zadań, układ FPGA jest pożądanym rozwiązaniem. System pozwala na zadawanie parametrów napięcia zasilającego, takich jak częstotliwość oraz współczynnik wypełnienia.

W projekcie zastosowano tranzystory mocy MOSFET typu IXFN420N10T produkcji IXYS w obudowie SOT-227-4 charakteryzujące się niską rezystancją włączenia $R_{DS(on)} = 2,3 \text{ m}\Omega$ oraz wysokim dopuszczalnym prądem pracy, wynoszącym aż 420 A [10]. Zostały one umieszczone poza obwodem drukowanym, powodując, iż generowane w nich ciepło zostało w dużym stopniu odseparowane od układu sterowania. Aby umożliwić całkowitą separację galwaniczną układu wysokoprądowego zasilania elektrolizera od reszty urządzenia, do pomiarów napięcia i prądu zasilania elektrolizera zastosowano odpowiednio izolowany wzmacniacz pomiarowy typu AMC1411 oraz przekładnik prądowy typu HAI50-TP.

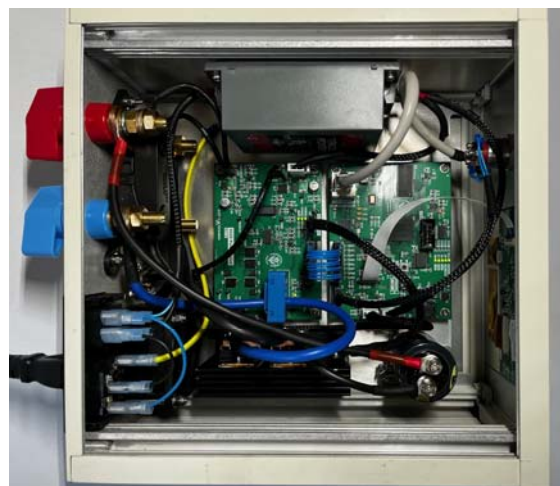
Układy pomiarowe urządzenia pozwalają na monitorowanie parametrów pracy, m.in. napięcia oraz prądu zasilania elektrolizera, temperatury radiatora tranzystorów wykonawczych oraz wartości przepływu wodoru. Dzięki zaimplementowaniu kontrolera Ethernet możliwa jest komunikacja z urządzeniem poprzez sieć LAN.

Konstrukcja urządzenia

Urządzenie zostało zaprojektowane jako przenośny przyrząd w kompaktowej metalowej obudowie, z zabezpieczonymi wejściami i wyjściami. Jako interfejs użytkownika zastosowano wyświetlacz LCD TFT 4,3" z ekranem dotykowym. Na rys. 3 przedstawiono widok opracowanego urządzenia.

Moduły elektroniczne zostały zamocowane na aluminiowej płycie bazowej urządzenia. Również na płycie bazowej został umieszczony aluminiowy wyłaczany radiator, do którego zostały zamocowane tranzystory mocy. W radiatorze został umieszczony czujnik temperatury, który służy do sterowania prędkością obrotową wentylatora osiowego. Na płycie bazowej został również umieszczony

bezpiecznik 100 A, zabezpieczający układ zasilania elektrolizera przed przeciążeniem.



Rys. 3. System sterowania zasilaniem elektrolizera – widok wnętrza urządzenia

Na tylnym panelu urządzenia znajdują się dwie pary wysokoprądowych zacisków laboratoryjnych, które służą do podłączenia zasilacza zewnętrznego DC oraz elektrolizera.

Oprogramowanie

Oprogramowanie systemu sterowania zasilaniem elektrolizera składa się z oprogramowania sprzętowego firmware układu FPGA wykonanego w środowisku QUARTUS PRIME w języku Verilog oraz oprogramowania procesora wbudowanego NIOS II zrealizowanego w środowisku ECLIPSE w języku C++.

Architektura oprogramowania została zorganizowana w taki sposób, aby procesor NIOS II wykorzystać jedynie do obsługi wyświetlacza, komunikacji Ethernet, obsługi pamięci zewnętrznej SDRAM oraz wykonania niezbędnych przeliczeń zmiennoprzecinkowych, wykorzystywanych do wyświetlania wartości mierzonych w postaci dziesiętnej. Wszystkie inne operacje, w szczególności te wpływające na bezpieczeństwo użytkownika urządzenia realizowane są w układzie FPGA, który charakteryzuje się wysoką wydajnością oraz niezawodnością.

Praca układu FPGA opiera się na taktowaniu zewnętrznego generatora o częstotliwości 40 MHz, co przekłada się na pracę w krokach czasowych trwających 25 ns. Wszystkie operacje wykonywane są na liczbach binarnych. W głównej instancji oprogramowania firmware zadeklarowane są wszystkie fizyczne piny I/O oraz zaimplementowane wzajemne relacje pomiędzy instancjami wykonawczymi obsługującymi pracę poszczególnych podzespołów elektronicznych urządzenia.

W oprogramowaniu urządzenia wbudowano szereg zabezpieczeń chroniących urządzenie przed uszkodzeniem wynikającym z przegrzania lub przeciążenia.

Aplikacja LabVIEW

Do celów zdalnego monitoringu pracy systemu sterowania zasilaniem elektrolizera została opracowana w środowisku LabVIEW aplikacja „SSZE_Monitoring”. Komunikacja pomiędzy systemem a aplikacją oparta została o protokół UDP, natomiast transmisja danych realizowana jest poprzez sieć LAN i przebiega od urządzenia do aplikacji. „SSZE_Monitoring”. Posiada ona klasyczny instalator i jest przeznaczona do stosowania na komputerach PC. Panel sterowania aplikacji przedstawiono na rys. 4. Został on podzielony na dwa funkcjonalne moduły nazwane PARAMETRY PRACY oraz KOMUNIKACJA.

W module PARAMETRY PRACY prezentowane są wartości parametrów pracy systemu sterowania zasilaniem elektrolizera, takie jak napięcie, prąd, częstotliwość oraz współczynnik wypełnienia napięcia zasilania elektrolizera, wartość przepływu wodoru oraz temperatura radiatora. Ikona status wskazuje, czy elektrolizer jest aktualnie zasilany. Szary kolor ikony świadczy o braku zasilania, natomiast pulsujący czerwony sygnalizuje załączenie zasilania. W oknie KOMUNIKATY wyświetlane są bieżące informacje nt. pracy urządzenia, takie jak stan komunikacji z urządzeniem, czy też komunikaty alarmowe.



Rys. 4. Panel sterowania aplikacji LabVIEW „SSZE_Monitoring”

Moduł KOMUNIKACJA umożliwia skonfigurowanie parametrów sieciowych, takich jak adres IP oraz port urządzenia.

Parametry pracy

System sterowania zasilaniem elektrolizera umożliwia zmianę kluczowych parametrów zasilania elektrolizera, takich jak częstotliwość oraz współczynnik wypełnienia. Zmian dokonuje się za pomocą przycisków „+” i „-” na dotykowym wyświetlaczu w menu USTAWIENIA pokazanym na rys. 5.



Rys. 5. Widok menu USTAWIENIA

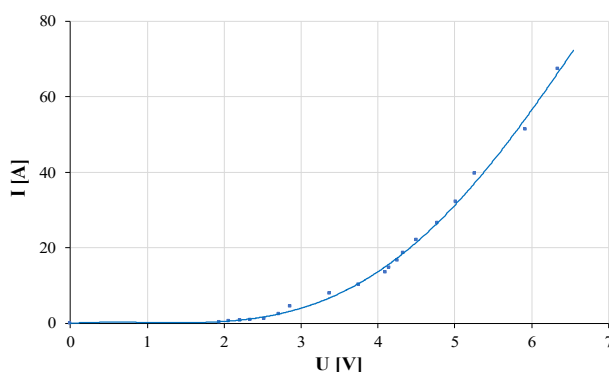
Zakres zmian częstotliwości wynosi od 1 Hz do 50 kHz, natomiast współczynnika wypełnienia - od 5% do 85%. Ponadto na ekranie tym prezentowane są też informacje nt. poziomu napięć zasilania modułów elektronicznych urządzenia oraz prędkości obrotowej wentylatora.

Wyniki pomiarów

W celu oceny poprawności działania opracowanego urządzenia przeprowadzono testy, których wyniki zaprezentowano w dalszej części tego rozdziału. W testach tych wykorzystano elektrolizer alkaliczny opracowany przez

firmę SESCOM i opisany w pracy [7]. W czasie pomiarów znajdował się w nim roztwór wodny wodorotlenku potasu o stężeniu 0,1%. Pomiary wykonywano oscyloskopem ROHDE & SCHWARZ typu RTB2004 oraz multimetrem cyfrowym SIGLENT typu SDM3055. Do pomiaru prądu dodatkowo wykorzystana została sonda PINTEC typu PA-677 z ustawionym dzielnikiem 50 mV/A. Jako źródło napięcia zasilania służył zasilacz wysokoprądowy Mean Well typu SPV-1500-12. Do regulacji poziomu prądu w układzie zastosowano rezystor suwakowy o nominalnej rezystancji 1,1 Ω .

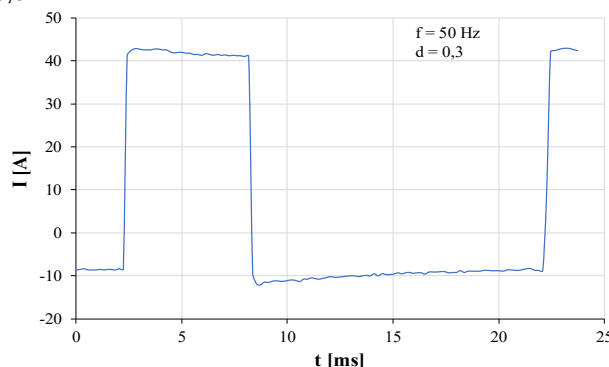
Na rys. 6 przedstawiono zmierzoną charakterystykę prądowo-napięciową badanego elektrolizera. Układ pomiarowy składał się z zasilacza napięcia stałego o napięciu znamionowym 12 VDC, do którego poprzez rezystor suwakowy dużej mocy został podłączony elektrolizer.



Rys. 6. Zmierzona charakterystyka prądowo - napięciowa elektrolizera

Zmierzone charakterystyki mają charakter zbliżony do wykładniczego. W trakcie pomiarów osiągnięto przepływ prądu o wartości około 70 A. Napięcie na elektrolizerze nie przekroczyło 7 V. Na rys. 6 można zaobserwować próg napięcia minimalnego na zaciskach elektrolizera o wartości ok. 2 V. Zjawisko to świadczy o obecności napięcia elektrochemicznego.

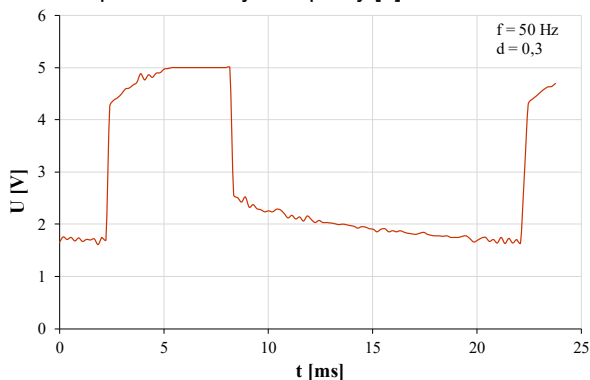
Na rys. 7 oraz 8 zaprezentowano zmierzone za pomocą opracowanego systemu odpowiednie przebiegi czasowe prądu oraz napięcia elektrolizera dla częstotliwości sygnału zasilającego $f = 50$ Hz, natomiast na rys. 9 oraz 10 analogiczne przebiegi dla częstotliwości $f = 5$ kHz. W obu przypadkach współczynnik wypełnienia napięcia wynosi $d = 0,3$.



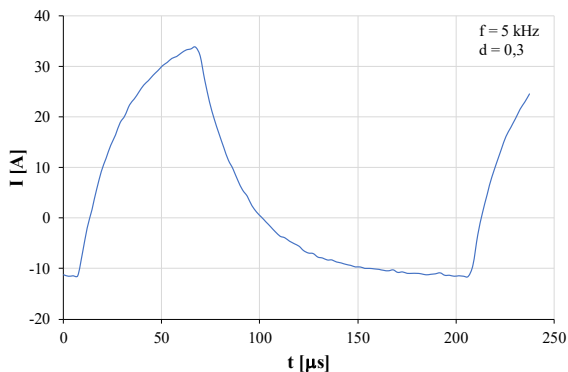
Rys. 7. Zmierzony przebieg prądu zasilania elektrolizera przy częstotliwości $f = 50$ Hz

Jak widać na rys. 7-10, dla częstotliwości 50 Hz zarówno napięcie, jak i prąd zasilania mają kształt zbliżony do prostokątnego, natomiast dla częstotliwości 5 kHz widoczna jest zmiana kształtu mierzonego sygnału napięcia zasilającego, który wraz ze wzrostem częstotliwości zbliża

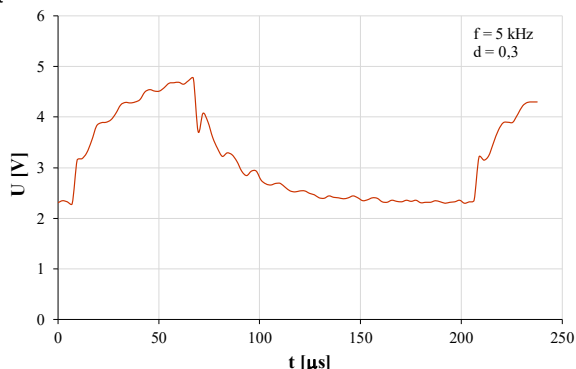
się do kształtu przebiegu eksponencjalnego. Wynika to z faktu, że dla zakresu wyższych częstotliwości impedancja elektroliza ma charakter indukcyjny. Jest to zgodne z wnioskami przedstawionymi w pracy [7].



Rys. 8. Zmierzony przebieg napięcia zasilania elektrolizera przy częstotliwości $f = 50$ Hz



Rys. 9. Zmierzony przebieg prądu zasilania elektrolizera przy częstotliwości $f = 5$ kHz



Rys. 10. Zmierzony przebieg napięcia zasilania elektrolizera przy częstotliwości $f = 5$ kHz

Ponadto prąd zasilania przy niskich stanach napięcia zasilającego przyjmuje wartości ujemne. Związane jest to z istnieniem zjawiska przepięcia indukcyjnego, występującego w momencie przerwania przepływu prądu przez odbiornik o charakterze indukcyjnym. Indukowany jest w takim momencie prąd wsteczny.

Na przebiegach napięcia daje się również zaobserwować obecność składowej stałej napięcia o wartości ok. 2 V, która potwierdza występowanie napięcia elektrochemicznego.

Podsumowanie

W pracy przedstawiono autorski system do badania właściwości elektrolizera alkalicznego. Opracowane urządzenie składa się z dwóch modułów (sterującego i

wykonawczego), bloku mocy z tranzystorami MOSFET, dotykowego wyświetlacza LCD oraz układu chłodzenia. Dodatkowo system jest wyposażony w aplikację wykonaną w środowisku LabVIEW, służącą do zdalnego monitorowania parametrów procesu elektrolizy poprzez sieć komputerową LAN.

Przeprowadzone testy wykazały, że opracowane urządzenie i dedykowane oprogramowanie działają poprawnie. Umożliwiają one przeprowadzenie badań właściwości elektrolizera przy zasilaniu go ciągiem impulsów prostokątnych. Podczas realizacji badań urządzenie umożliwiało precyzyjną regulację oraz odczyt parametrów pracy elektrolizera. Stwierdzono także poprawność działania zaimplementowanych zabezpieczeń.

Przeprowadzone za pomocą zaprezentowanego systemu pomiary charakterystyki elektrolizera alkalicznego wykazały istotny wpływ częstotliwości na czasowe przebiegi prądu i napięcia zasilającego ten elektrolizer. Tylko w przypadku niskiej wartości $f = 50$ Hz uzyskuje się przebiegi prądu i napięcia na elektrolizerze o kształcie zbliżonym do ciągu impulsów prostokątnych. Z kolei, dla częstotliwości $f = 5$ kHz uzyskano eksponencjalne przebiegi $U(t)$ oraz $I(t)$. Świadczy to o dużej wartości indukcyjności wewnętrznej badanego elektrolizera. Warto zauważyć, że przy zasilaniu elektrolizera ciągiem impulsów prostokątnych występuje składowa stała napięcia na elektrolizerze przekraczająca nawet 2 V.

Autorzy: Mgr inż. Rafał Pilarski, Uniwersytet Morski w Gdyni, Szkoła Doktorska, ul. Morska 83, 81-225 Gdynia, E-mail: r.pilarski@sd.umg.edu.pl. prof. dr hab. inż. Krzysztof Górecki, Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 83, 81-225 Gdynia, E-mail: k.gorecki@we.umg.edu.pl.

LITERATURA

- [1] T. Elmer, M. Worall, S. Wu, S.B. Riffat: Fuel cell technology for domestic built environment applications: State of-the-art. review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 42, 2015, pp. 913-931.
- [2] P.E. Dodds, I. Staffell, A.D. Hawkes, F. Li, P. Grunewald, W. McDowall, P. Ekins: Hydrogen and fuel cell technologies for heating: A review, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 40, 2015, pp. 2065-2083.
- [3] K. Górecki, E. Świtalski, P. Górecki: Modeling the Influence of the Electrolyte Concentration on Electrical Characteristics of an Alkaline Electrolyzer, Energies 2022, 15, 8090.
- [4] M. Carmo, D.L. Fritz, J. Mergel, D. Stolten: A comprehensive review on PEM water electrolysis, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 38, 2013, pp. 4901-4934.
- [5] K. Mazloomi, N. Sulaiman, H. Moayedi: An Investigation into the Electrical Impedance of Water Electrolysis Cells – with a View to Saving Energy, International Journal of Electrochemical Science, Vol. 7, 2012, pp. 3466-3481.
- [6] N. Monk, S. Watson: Review of pulsed power for efficient hydrogen production, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 41, 2016, pp. 7782-7791.
- [7] K. Górecki, P. Górecki, J. Zarębski: Electrical model of the alkaline electrolyser dedicated for SPICE, Int J Circ Theor Appl. 2018, 46, 1044-1054.
- [8] K. Górecki, M. Górecka, P. Górecki: Modelling Properties of an Alkaline Electrolyser, Energies 2020, 13, 3073.
- [9] Nota katalogowa: Infineon Technology, EiceDRIVER 2EDi product family, Final datasheet, Rev. 2.7, 2021-09-10, https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-2EDF7235K-DataSheet-v02_07-EN.pdf?fileId=5546d462636cc8fb0163b09014d8305d
- [10] Nota katalogowa: IXYS, IXFN420N10T Datasheet, DS100199A (7/15), <https://www.littelfuse.com/media?resourceType=datasheets&itemId=93010b97-b427-4881-9bfb-f8e15d2c6ad0&fileName=littelfuse-discrete-mosfets-n-channel-trench-gate-ixfn420n10t-datasheet>