

doi:10.15199/48.2022.01.31

System wbudowany do badania właściwości elektrolizera

Streszczenie. W pracy przedstawiono autorski system wbudowany do badania właściwości elektrolizera. Zaprezentowano koncepcję pracy rozważanego układu, schemat opracowanego układu, projekt płytki drukowanej wraz z opisem sposobu mocowania elementów elektronicznych. Pokazano też przebiegi czasowe napięć i prądów w wybranych częściach układu. Przedyskutowano uzyskane wyniki.

Abstract. The paper presents the author's embedded system for measurements of the properties of the electrolyser. The concept of operation of the considered system, a diagram of the this system, a design of a printed circuit board with a description of the method of the assembly of electronic components are presented. The waveforms of voltages and currents in selected parts of the system are also shown. The obtained results are discussed. (Embedded system dedicated to investigations of electrolyser properties).

Słowa kluczowe: systemy wbudowane, elektrolizer, pomiary, właściwości elektryczne, mikrokontroler

Keywords: embedded systems, electrolyser, measurements, electrical properties, microcontroller

Wstęp

Coraz większe znaczenie dla gospodarki mają źródła energii o niskiej emisji dwutlenku węgla do atmosfery [1]. W niektórych spośród tych źródeł, np. w ogniach paliwowych wykorzystuje się wodór jako paliwo [1, 2]. Spośród wielu metod wytwarzania tego paliwa, istotne znaczenie ma elektroliza wody [3]. Realizuje się ją przy wykorzystaniu elektrolizerów.

Typowo do zasilania elektrolizerów wykorzystuje się źródła napięcia stałego [3, 4], ale znane są z literatury [5] także układy zasilane napięciem zmiennym o niewielkiej częstotliwości. W pracach [6, 7] przedstawiono modele elektrolizerów w postaci zastępczych układów RLC, a w pracy [8] postawiono tezę, że możliwa jest optymalizacja sprawności wytwarzania wodoru w procesie elektrolizy dzięki właściwemu doborowi parametrów napięcia zasilającego elektrolizer. W cytowanej pracy ograniczono się do modelowania charakterystyk elektrolizera pracującego przy zasilaniu ciągiem impulsów prostokątnych napięcia o różnej częstotliwości, natomiast nie przedstawiono wyników badań eksperymentalnych.

W niniejszej pracy opisano system wbudowany umożliwiający zasilanie elektrolizera napięciem o kształcie ciągu impulsów prostokątnych o regulowanej częstotliwości i czasie trwania impulsu oraz wysokiej wydajności prądowej. Opracowany system umożliwia także rejestrację czasowych przebiegów napięcia i prądu zasilającego elektrolizer. Wbudowane w systemie zabezpieczenia chronią elementy stopnia wyjściowego przed uszkodzeniem termicznym oraz optymalizują zużycie energii przez komponenty chłodzenia aktywnego.

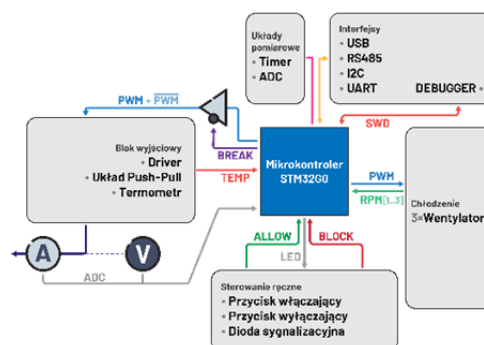
Struktura układu

Opracowany system jest zasilany z zewnętrznego zasilacza prądu stałego a jego obciążeniem jest elektrolizer alkaliczny opisany w pracach [8, 9]. Dopuszczalny zakres wartości napięcia wejściowego systemu obejmuje napięcie od 4 do 13 V. Na wyjściu zasilacza uzyskuje się napięcie o kształcie ciągu impulsów prostokątnych o zadanej częstotliwości i współczynniku wypełnienia. System ten charakteryzuje się dużą wartością mocą wyjściowej i mnogością zabezpieczeń, które utrudniają jego uszkodzenie. Schemat blokowy systemu pokazano na rysunku 1.

Układem steruje mikroprocesor STM32G071RB. Posiada on niezbędny zestaw układów peryferyjnych do implementacji wszystkich przewidzianych funkcjonalności. Mikroprocesor ten współpracuje z następującymi blokami:

a) Interfejsy zapewniające komunikację systemu z urządzeniami zewnętrznymi,

- Układy pomiarowe przeznaczone do pomiaru napięcia i czasu (zawarte w mikroprocesorze),
- Blok wyjściowy wytwarzający wyjściowy przebieg napięcia zasilającego elektrolizer o regulowanej wartości częstotliwości f oraz współczynnika wypełnienia d ,
- Elementy sterowania ręcznego umożliwiające załączenie i odłączenie obciążenia,
- Blok chłodzenia aktywnego zawierający wentylatory o regulowanej prędkości obrotowej.

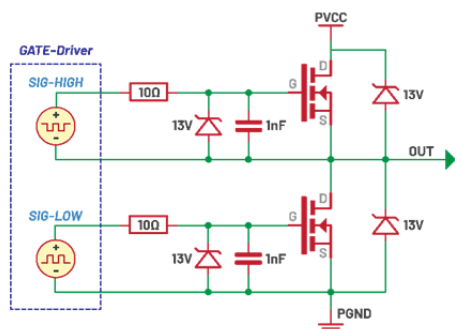


Rys. 1. Schemat funkcjonalny zasilacza

Kluczowe znaczenie dla wytworzenia sygnału zasilającego elektrolizer ma blok wyjściowy o schemacie pokazanym na rys. 2. Zawiera on parę tranzystorów MOSFET typu N PSMNR51-25YLH pracujących w układzie totem-pole. Wybrany tranzystor charakteryzuje się małą wartością rezystancji włączonego kanału $R_{ON} = 0,57m\Omega$ i dużą wartością dopuszczalną prądu drenu wynoszącą aż 380 A. Zarówno bramki tranzystorów, jak i wyjście bloku mocy, zabezpieczone są przeciwko przepięciom diodami transil o napięciu przebicia bliskim 13V oraz diodami Schottky'ego.

Sygnały podawane na bramki tranzystorów są generowane przez Gate-Driver typu 2EDF7275FXUMA1, który jest sterowany sygnałem PWM z mikrokontrolera. Między mikrokontrolerem a bramkami tranzystorów zapewniona jest separacja galwaniczna, która ogranicza szansę na uszkodzenie mikrokontrolera [10].

Sygnał SIG-HIGH jest negacją sygnału SIG-LOW, z uwzględnieniem niewielkiego opóźnienia (deadtime), które zabezpiecza układ przed jednoczesnym załączeniem obu tranzystorów. W wyniku testów ustalono, że właściwą wartością opóźnienia w tym układzie jest 1 μ s.



Rys. 2. Schemat ideowy wyjściowego układu mocy

Konstrukcja układu

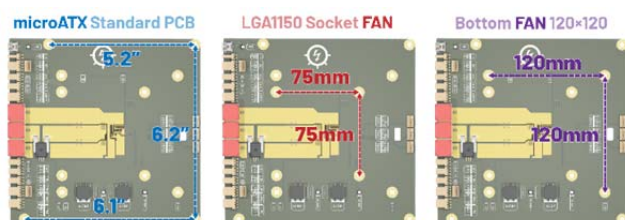
Układ opisany w poprzednim rozdziale zmontowany jest na dwustronnej płytce drukowanej, której widok pokazano na rys. 3. Widoczne są na nim widoki badanej płytki z góry (TOP), z dołu (BOTTOM) oraz widok układu wraz z zamontowanym systemem chłodzenia.



Rys. 3. Zdjęcia opisywanego zasilacza

Projekt układu umożliwia umieszczenie tego układu w obudowie standardu microATX. Główny układ chłodzenia jest wyposażony w gniazdo soket LGA1150, umożliwiające podłączenie jednego z wielu typów radiatorów aktywnych stosowanych przy chłodzeniu procesorów w komputerach stacjonarnych. Dodatkowo istnieje możliwość montażu od dołu płytki dodatkowego wentylatora umożliwiającego skuteczne chłodzenie obwodu mocy. Na rys. 4 pokazano wizualizację zmontowanego układu z zaznaczeniem otworów przewidzianych do zamontowania radiatora.

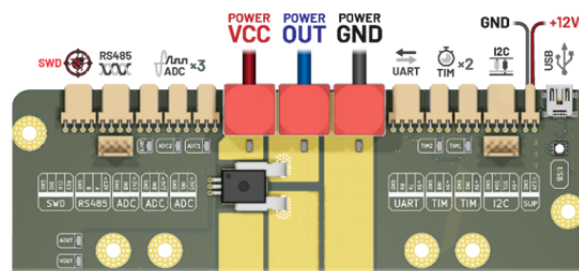
Na rys. 4 widać, że tranzystory MOS mocy zawarte w bloku wyjściowym lutowane są powierzchniowo do płytki drukowanej, a skuteczne chłodzenie tych tranzystorów zapewniają takie elementy systemu chłodzenia jak: duży pad termiczny, szerokie na 15 mm dwustronne ścieżki, specjalne złącza WP-PLUG REDCUBE od Würth Elektronik. Dzięki takiemu sposobowi montażu blok wyjściowy umożliwia uzyskiwanie prądu wyjściowego o wartości do 120 A.



Rys. 4. Wizualizacja zmontowanego układu z zaznaczeniem położenia otworów montażowych dla różnych wentylatorów

W projekcie masa układu (GND) została oddzielona od masy układu wyjściowego PGND (power GND). Pozwala to na odseparowanie zakłóceń systemu oraz układu wyjścia mocy. Do prawidłowego działania systemu należy podłączyć przewody zasilające +12V, GND oraz zasilanie układu mocy PVCC, PGND. W celu komunikacji z komputerem należy wykorzystać port USB.

Wyprowadzenia opracowanego systemu pokazano na rys. 5. Jak widać, wszystkie gniazda połączeniowe umieszczono wzdłuż jednej krawędzi płytki.



Rys. 5. Wizualizacja płytki drukowanej z wyprowadzeniami układu

Magistrale zewnętrzne I2C, UART, RS485 mogą w przyszłości pozwolić na rozbudowę systemu o urządzenia zewnętrzne takie, jak przepływomierz masowy przeznaczony do pomiaru szybkości przepływu produkowanego wodoru. Dodatkowo wyprowadzone są 3 kanały przetworników analogowo-cyfrowych do pomiaru napięcia oraz 2 kanały do pomiaru częstotliwości lub współczynnika wypełnienia. Te peryferia pozwolą na bezinwazyjną rozbudowę systemu.

Komunikacja

Do sterowania układem oraz odczytu danych wykorzystywany jest port USB. Na komputerze sterującym konieczne jest zainstalowanie sterowników do układu CP210x oraz dowolnego programu typu terminal, takiego jak Realterm.

W programie sterującym został zaimplementowany język komend wzorowany na zaimplementowanym w systemie Linux języku zapytań bash. Na przykład, aby ustawić parametry sygnału wyjściowego, należy użyć komendy:

```
OUT [freq]Hz [fill]% [deadtime]s {on/off}
OUT 1kHz 50% 1us on
```

Przy czym wszystkie parametry są opcjonalne, a ich kolejność jest dowolna.

Pomiar prądu i napięcia

Pomiar napięcia realizowany jest za pomocą 12-bitowego, wbudowanego w mikrokontroler przetwornika analogowo-cyfrowego. Wykorzystuje on napięcie referencyjne równe 3,3 V dostarczane przez precyzyjny stabilizator LDO MCP1501.

Napięcie dostarczane do układu pomiarowego skalowane jest przy pomocy wzmacniacza instrumentalnego, natomiast pomiar prądu odbywa się za pośrednictwem czujnika Halla ACS773LCB-100B-SMT-T, który zaprojektowany jest do pracy w zakresie napięć wyjściowych od 0 do 3,3 V. Pozwala on na pomiar prądu o wartości w zakresie od -100 A do 100 A. Przebiegi zmierzonego napięcia są rejestrowane przez zadaną liczbę okresów. Na podstawie tych przebiegów zapisywane są wartości minimalna, maksymalna oraz średnia.

Automatyczne odłączenie wyjścia

Prostokątny sygnał wyjściowy nie jest generowany przez układ, gdy sygnały sterujące PWM nie trafiają na bramki tranzystorów. Taki stan jest domyślnie ustawiany przy uruchomieniu systemu. Może być również wywołany poprzez:

- Wciśnięcie przycisku BLOCK,
- Zdalnie wymuszenie stanu OUT off,
- Przekroczenie dopuszczalnej temperatury radiatora TOFF,
- Brak komunikacji z termometrem I2C Error

- Brak odczytu szybkości obrotów jednego z wentylatorów
 - Zbyt duża wartość prądu wyjściowego
 - Zbyt duża wartość napięcia wyjściowego wywołana impulsem napięciowym.
 - Błąd sprzętowy HardFault Handler
 - Nieznany wyjątek Default Handler
- Zasilacz można włączyć, gdy komunikacja z termometrem jest utrzymywana i temperatura ta nie przekracza wartości T_{OFF} , poprzez:
- Wciśnięcie przycisku ALLOW
 - Zdalne wymuszenie stanu OUT on

Obecność sygnału zasilającego wskazywana jest zielonym kolorem świecenia sygnalizacyjnej diody LED, natomiast jego brak – kolorem czerwonym.

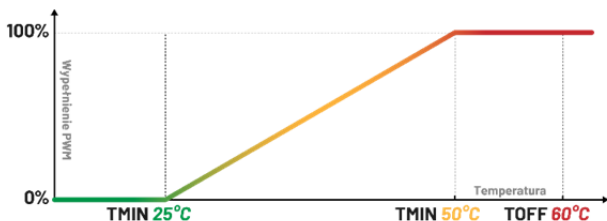
Zastosowane rozwiązanie minimalizuje możliwość wystąpienia uszkodzenia układu podczas normalnej pracy.

Pomiar prądu i napięcia jest realizowany za pośrednictwem przetwornika analogowo-cyfrowego. Zebrane próbki są analizowane i na tej podstawie wyjście mocy może być wyłączone.

Praca Wentylatorów

Prędkość obrotowa wentylatorów jest sterowana przez zmianę współczynnika wypełnienia sygnału sterującego PWM. Wraz ze wzrostem współczynnika wypełnienia sygnału PWM rośnie prędkość obrotów wentylatora.

Współczynnik wypełnienia sygnału PWM jest dobierany zależnie od wartości zmierzonej temperatury radiatora. Wypełnienie zmienia się liniowo pomiędzy wartościami T_{MIN} i T_{MAX} , co obrazuje rys. 6. W przypadku osiągnięcia przez radiator temperatury T_{OFF} następuje odłączenia sterowania bloku wyjściowego.



Rys. 6. Zależność pomiędzy pomiarem temperatury a sygnałem sterującym wentylatorami

Odczyt prędkości wentylatora odbywa się za pomocą pomiaru częstotliwości sygnału PRM. Jest to sygnał prostokątny o wypełnieniu bliskim 50%, którego częstotliwość odpowiada częstotliwości obrotów wentylatora.

Wartości T_{MIN} , T_{MAX} , T_{OFF} można zmienić z poziomu bash'a za pomocą komend o postaci

```
FUSE [tmin] [tmax] [toff]
```

```
FUSE 25C 50C 60C
```

Do zasilacza można podłączyć 3 wentylatory. Górny, dolny oraz dodatkowy, który można umieścić na obudowie ATX.

Agregacja danych

Wszystkie sygnały, zarówno wejściowe, jak i wyjściowe, są umieszczone w strukturze `SERIES_t` języka C. Fragment kodu programu odpowiadający za ustawienia parametrów wyjściowego napięcia zasilającego elektrolizer pokazano na rys. 7.

Taki sposób wprowadzania danych pozwala na wysłanie całej struktury przy pomocy rzutowania na wskaźnik, którym posługuje się funkcja przyjmująca dane do wysłania. Realizuje to komenda o postaci

```
SERIES_t series_row;
```

```
DBG_Array((uint8_t *)&series_row, sizeof(SERIES_t));
```

Rozpoczęcie agregacji danych można wywołać z konsoli używając polecenia

```
SERIES {on/off}
```

```
SERIES on
```

Przechwycone dane wymagają dekodowania i walidacji. Takie podejście sprawdza się w przypadku zapisywania większej ilości danych i wysłaniu ich jednorazowo w większej paczce. Wystarczy zadeklarować tablicę i dopisywać do niej kolejne rekordy.

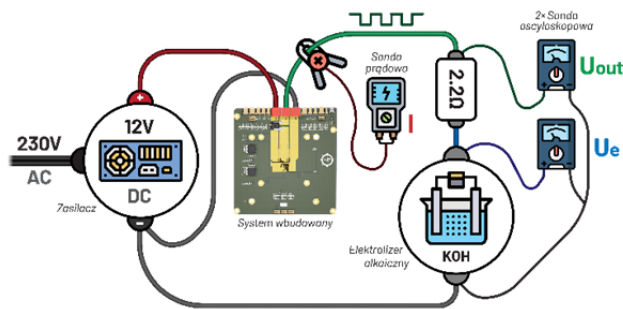
C	Src/app.h
1	<code>typedef struct {</code>
2	<code>float min;</code>
3	<code>float max;</code>
4	<code>float avg;</code>
5	<code>} SERIES_Record_t;</code>
6	<code>typedef struct {</code>
7	<code>uint64_t timestamp;</code>
8	<code>bool out_enable;</code>
9	<code>float out_frequency;</code>
10	<code>float out_fill;</code>
11	<code>float out_deadtime;</code>
12	<code>float temperature;</code>
13	<code>float humidity;</code>
14	<code>float fan_pwm;</code>
15	<code>float fan_rpm[3];</code>
16	<code>SERIES_Record_t current; // [mA]</code>
17	<code>SERIES_Record_t voltage; // [mV]</code>
18	<code>SERIES_Record_t power;</code>
19	<code>uint32_t crc;</code>
20	<code>} SERIES_t;</code>

Rys. 7. Fragment kodu programu sterującego umożliwiający definiowanie parametrów sygnału wyjściowego

Test układu

W celu zbadania praktycznej użyteczności opracowanego systemu wbudowanego przeprowadzono pomiary czasowych przebiegów napięć i prądów w tym systemie. W czasie testów badany system pracował w układzie przedstawionym na rys. 8.

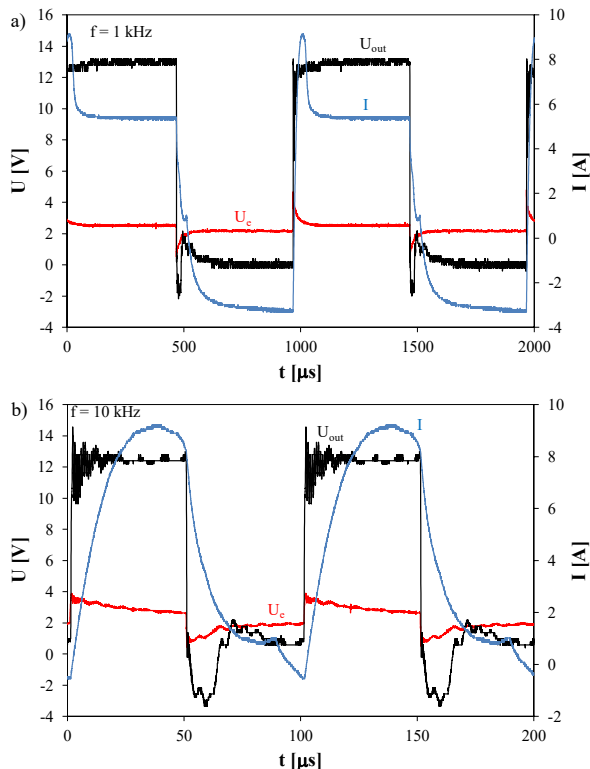
W układzie tym wykorzystano zasilacz przemysłowy MEAN-WELL o napięciu wyjściowym równym 12 V. Zasila on testowany system wbudowany, którego obciążenie stanowi szeregowo połączenie elektrolizera i rezystora o rezystancji 2,2 Ω . Za pomocą oscyloskopu były mierzone 3 sygnały: napięcie na wyjściu testowanego systemu (U_{out}), napięcie na elektrolizerze (U_e) oraz prąd (I) przepływający przez elektrolizer - za pośrednictwem sondy prądowej.



Rys. 8. Układ do testowania opracowanego systemu wbudowanego

Pomiary wykonano przy różnych wartościach częstotliwości napięcia wyjściowego z zakresu od 100 Hz do 100 kHz. W charakterze przykładu, na rys. 9 pokazano przebiegi wymierzonych napięć i prądu uzyskane przy częstotliwości równej 1kHz oraz 10kHz, przy współczynniku wypełnienia 0,5 i czasie martwym równym 1 μ s.

Na podstawie uzyskanych przebiegów napięć i prądów można stwierdzić, że układ opracowany system działa poprawnie. Napięcie na wyjściu systemu U_{out} ma kształt zbliżony do ciągu impulsów prostokątnych. Na skutek charakteru RLC impedancji elektrolizera obserwuje się przebieg prądu elektrolizera o wartościach dodatnich i ujemnych. Napięcie na elektrolizerze cechuje się wartością średnią na poziomie około 2 V.



Rys. 9. Zmierzone przebiegi napięć i prądu przy częstotliwości 1kHz (a) oraz 10kHz (b)

Przeprowadzono także testy opracowanego systemu dla mniejszych wartości rezystancji rezystora włączonego szeregowo z elektrolizerem. Uzyskano poprawne wyniki pracy układu dla prądu elektrolizera do 50 A. System chłodzenia zapewnił ograniczenie temperatury radiatorów do 50°C.

Podsumowanie

W pracy przedstawiono system wbudowany umożliwiający zasilanie elektrolizera napięciem o kształcie ciągu impulsów prostokątnych, regulowanej wartości częstotliwości i współczynnika wypełnienia. System wyposażony jest układ automatycznego ograniczania temperatury półprzewodnikowych elementów mocy poprzez

regulację prędkości obrotowej wentylatorów. Przy projektowaniu płytki drukowanej systemu zadbano o minimalizację rezystancji termicznej wymierzonych elementów poprzez zastosowanie dużych padów termicznych i grubej folii miedzianej.

W wyniki przeprowadzonych testów wykazano, że układ prawidłowo pracuje przy nieliniowym obciążeniu RLC, jakie stanowi elektrolizer alkaliczny. System pracuje prawidłowo w szerokim zakresie częstotliwości oraz wartości maksymalnych prądu obciążenia. Zastosowane oprogramowanie umożliwia wygodne sterowanie parametrami napięcia wyjściowego, zastosowane układy zabezpieczające przed nadmiernym wzrostem temperatury oraz przepięciami zapewniają bezawaryjną pracę systemu.

Opisany system będzie stosowany w dalszych badaniach autorów dotyczących właściwości elektrolizerów alkalicznych.

Autorzy: mgr inż. Emilian Świtalski, prof. dr hab. inż. Krzysztof Górecki, Uniwersytet Morski w Gdyni, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 83, 81-225 Gdynia, E-mail: e.switalski@we.umg.edu.pl, 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] 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.
- [4] 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.
- [5] N. Monk, S. Watson, "Review of pulsed power for efficient hydrogen production", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 41, 2016, pp. 7782-7791.
- [6] K. Mazloomi, N. Sulaiman, S. A. Ahmad, N. A. Yunus, "Analysis of the Frequency Response of a Water Electrolysis Cell", *International Journal of Electrochemical Science*, Vol. 8, 2013, pp. 3731-3739.
- [7] P. Górecki, K. Górecki, "The influence of a mounting manner of power MOS transistors on characteristics of the Totem-Pole circuit with RLC load", *Microelectronics International*, Vol. 33, No. 3, 2016, pp. 176-180.
- [8] K. Górecki, P. Górecki, J. Zarębski, "Electrical model of the alkaline electrolyser dedicated for SPICE", *International Journal of Circuit Theory and Applications*, Vol. 46, No. 5, 2018, pp. 1044-1054.
- [9] K. Górecki, M. Górecka, P. Górecki: Modelling properties of an alkaline electrolyser. *Energies*, Vol. 13, No. 12, 2020, 3073; doi: 10.3390/en13123073.
- [10] Nota katalogowa 2EDF7275F – EiceDRIVER™ 2EDi product family, https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-2ED,F7275F-Da taSheet-v02_06-EN.pdf?fileId=5546d462636cc8fb0163b08fd9203057