

## Innowacyjne zasilanie autonomicznego robota mobilnego ogniwem paliwowym

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono prototypowy, hybrydowy układ zasilania autonomicznego robota mobilnego (AGV). Układ zasilania, jako podstawowe źródło energii, wykorzystuje wodorowe ogniwo paliwowe, zasilane z niskociśnieniowej butli metalowodorkowej. Dodatkowo, układ zasilania jest wyposażony w dwa pomocnicze bufory energii, baterię akumulatorów litowo-jonowych i baterię superkondensatorów. W celu uzyskania największej sprawności, ogniwo paliwowe współpracuje z przetwornicą energoelektroniczną, śledzącą punkt pracy o maksymalnej mocy (MPPT). Prototypowy układ zasilania przebadano w symulowanych warunkach operacyjnych, bazując na profilu zapotrzebowania na moc wyznaczonym pomiarowo w badaniach rzeczywistego AGV.

**Abstract.** The paper presents a prototype, hybrid automated guided vehicle (AGV) power supply system. The power supply system applies a hydrogen fuel cell as the primary source of energy, fed from a low-pressure metal hydride cylinder. Additionally, the power supply is equipped with two auxiliary energy buffers, a lithium-ion battery and a supercapacitor bank. For best efficiency, the fuel cell works with a power electronic inverter that tracks the maximum power point (MPPT). The prototype power system was tested in simulated operating conditions, based on the power consumption profile determined by measurement in the tests of a real AGV vehicle. (A novel fuel-cell power supply for an automated guided vehicle).

**Słowa kluczowe:** ogniwo paliwowe, autonomiczny robot mobilny, projektowanie oparte na modelu.

**Keywords:** fuel-cell, automated guided vehicle (AGV), model-based design.

### Wstęp

Prace nad zastosowaniem ogniw paliwowych do zasilania robotów magazynowych AGV (Automated Guided Vehicle) są prowadzone już od pewnego czasu [1] i wciąż są podejmowane przez nowe ośrodki [2]. W sierpniu 2021 szwedzki producent ogniw paliwowych myFC Holding AB opublikował analizę [3], z której wynika że do roku 2028 rynek autonomicznych robotów mobilnych (AMR), AGV oraz wózków magazynowych, zasilanych ogniwami paliwowymi, może osiągnąć wartość 1,5 miliarda dolarów amerykańskich.

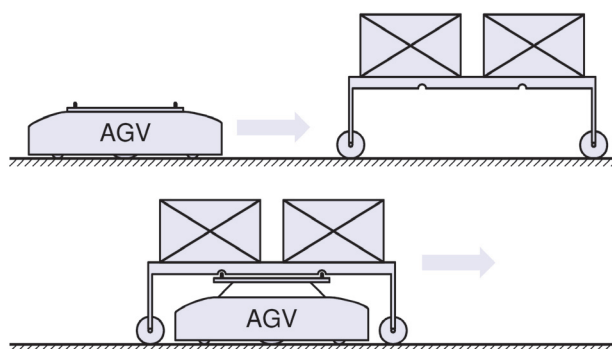
Pierwsze z zastosowań wodorowych układów zasilania dla potrzeb niemotoryzacyjnych logistycznych pojazdów przemysłowych były raportowane m.in. przez koncern Toyota w 2005 roku [4]. Zastosowanie to dotyczyło wózków widłowych, wyposażonych w ogniwa typu PEM (Proton Exchange Membrane) połączone z zestawem superkondensatorów i wymiennymi zasobnikami z wodorem. Na bazie tych doświadczeń hybrydowe układy zasilania oparte na ogniwach PEM zaczęto stosować w innych nowoczesnych rozwiązaniach mobilnych niemotoryzacyjnych, w tym również wózkach AGV. Na przykład w pracy [5] przedstawiono układ zasilania o strukturze podobnej do opisanego w tym artykule. W pracach [6,7] pokazano jeden z pierwszych układów hybrydowego zasilania wózka AGV z wykorzystaniem zasobnika z wodorem opartego na wodorkach metalu. Ponadto w pracy [8] przedstawiono podobne rozwiązanie, zaimplementowane do wózka widłowego.

Należy podkreślić, że przytoczone publikacje na temat zastosowania układów zasilania ogniwem wodorowym dla pojazdów AGV mają w większości charakter doniesień prasowych i przedstawiają ogólne ich zalety, lub też ograniczają się do ogólnej prezentacji struktury układu zasilania. Nie pokazują jednak szczegółów dotyczących parametrów elektrycznych oraz wyników pomiarów. Niniejszy artykuł wypełnia tę lukę.

Ogniwa paliwowe są obecnie szeroko stosowane w napędzie pojazdów elektrycznych i hybrydowych [9,10]. Podstawowymi zaletami hybrydowych układów zasilania z ogniwem paliwowym w porównaniu z konwencjonalnymi systemami z zastosowaniem zasilania baterijnego to: szybkie tankowanie (trwające zazwyczaj krócej niż

ładowanie baterii akumulatorów), stała wydajność, poprawiona gotowość operacyjna i wydłużony czas działania.

Projektowanie i dostrajanie hybrydowych układów zasilania dla zastosowań mobilnych, w celu osiągnięcia optymalnych rozwiązań w sensie redukcji kosztów i uzyskania najlepszych osiągnięć, może być realizowane indywidualnie pod wybraną charakterystykę pracy AGV. Wymaga to odpowiedniej strategii zarówno zarządzania energią, w celu utrzymania odpowiedniego poziomu naładowania magazynu energii, złożonego z baterii akumulatorów i superkondensatorów oraz odpowiedniego doboru zasobnika z wodorem [4]. Działania takie mogą być wspierane przez odpowiednie badania symulacyjne [11], oparte na zastosowaniu modelu matematycznego (Model-Based Design, MBD). W artykule [11] przedstawiono wyniki badań symulacyjnych, dotyczących projektowania i optymalizacji układu zasilania, opartego na ogniwie paliwowym dla AGV z zastosowaniem metodologii MBD. W niniejszym artykule przedstawiono kontynuację tych prac i pokazano wyniki badań prototypowego układu zasilania, którego weryfikację przeprowadzono w symulowanych warunkach operacyjnych.

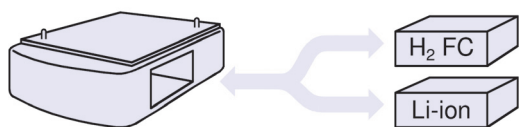


Rys.1. Idea zautomatyzowanego transportu opartego na autonomicznych robotach AGV

## AGV w systemach logistycznych

Przedmiotem badań jest układ zasilania AGV, typu FORMICA 1, produkowanego przez firmę AIUT z Gliwic. Robot jest elementem systemu transportu wewnętrznego, stanowiącego ważny aspekt automatyzacji procesów w przemyśle 4.0 [12]. Ideę transportu opartego na AGV przedstawiono na rysunku 1. Robot bez udziału operatora porusza się wzdłuż zaprogramowanej trasy, orientując się w przestrzeni za pomocą zestawu sensorów i przewożąc ładunki do 1000 kg. Działanie robotów jest koordynowane przez automatyczny system zarządzania produkcją, tworzący harmonogram przejazdów i wystawiający zlecenia transportowe.

W wersji produkcyjnej zasilanie robota stanowi bateria ogniwo litowo-jonowych, umieszczona w wymiennym module. Celem prowadzonych badań jest opracowanie hybrydowego modułu zasilania, który będzie można stosować zamiennie z baterią, zawierającego wodorowe ogniwo paliwowe (rys. 2) oraz magazyn energii. Takie podejście wpisuje się w aktualne trendy rozwoju branży autonomicznego transportu wewnętrznego [1,2,3].



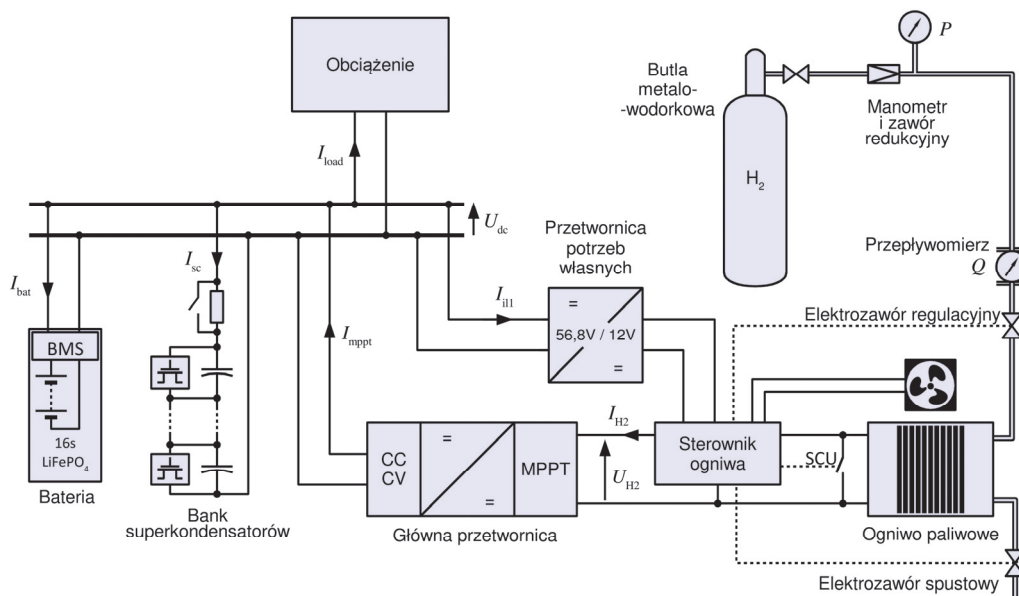
Rys.2. Koncepcja docelowa – AGV z wymiennym modulem zasilania

Na poprzednim etapie badań [11] wykonano pomiary energii pobieranej przez AGV podczas przejazdu trasą testową w różnych stanach obciążenia. Na podstawie uzyskanych wyników opracowano modelowy profil

zapotrzebowania na moc, wykorzystany w opisanych tutaj badaniach. Uzyskany profil posłużył do określenia specyfikacji elementów wodorowego układu zasilania. Po integracji prototypowego układu zasilania na stanowisku pomiarowym, profil został wprowadzony do programowalnego, dwukierunkowego zasilacza laboratoryjnego, który może pracować jako źródło lub jako obciążenie elektroniczne, umożliwiając płynne przejście pomiędzy tymi trybami pracy. W związku z tym zasilacz może pobierać energię z układu zasilania, symulując obciążenie wprowadzane przez układ napędowy ale może również zwracać energię, symulując hamowanie odzyskowe. W celu dokładnej obserwacji zjawisk związanych ze zmianą trybu pracy układu zasilania przy przejściu do hamowania odzyskowego, do profilu zapotrzebowania na moc dodano impulsy mocy o ujemnej wartości, symulujące stan hamowania z odzyskiem energii. W ten sposób zrealizowano pomiarową weryfikację poprawności działania hybrydowego układu zasilania.

## Prototypowy układ zasilania AGV

Będący wynikiem prac hybrydowy układ zasilania przedstawiono na rysunku 3. Źródłem energii jest tutaj ogniwo paliwowe, zasilane z metalowodorkowej butli niskociśnieniowej. Na wyjściu ogniwa znajduje się przetwornica główna, zasilająca główną szynę napięcia stałego. Do szyny głównej podłączony jest magazyn energii, złożony z baterii akumulatorów litowo-jonowych i banku superkondensatorów oraz przetwornica potrzeb własnych, zasilająca sterownik ogniwa paliwowego. Do szyny napięcia stałego podłączone jest również obciążenie sterowane z zaprogramowanym modelowym profilem zapotrzebowania na moc.



Rys.3. Schemat blokowy układu zasilania z ogniwem paliwowym pracującym w trybie DEA (Dead-End Anode)

## Ogniwo paliwowe

Zastosowano ogniwo paliwowe typu PEM (Proton Exchange Membrane) o mocy znamionowej 300 W wraz z dedykowanym sterownikiem. Jest to ogniwo zasilane bezpośrednio tlenem atmosferycznym. Zaletami ogniw typu PEM w stosunku do innych są mniejsza masa oraz większe bezpieczeństwo, wynikające z zastosowania elektrolitu w postaci stałej.

Sterownik ogniwa steruje pracą wentylatorów chłodzących i zapewniających zasilanie ogniwa tlenem atmosferycznym. Kontroluje również mechanizm zwierania ogniwa SCU (Short-Circuit Unit) oraz elektrozawory spustowy i zasilający, które realizują sterowanie pracą ogniwa w trybie DEA (Dead-End Anode) [13]. Mechanizm zwierania ogniwa ma na celu zwiększanie jego wydajności. W trakcie pracy ogniwa zachodzi proces utleniania

katalizatora wewnątrz jego cel, co upośledza przebieg zachodzących reakcji chemicznych. Chwilowe zwarcie elektrod ogniwa odwraca ten efekt [14] i jest wykonywane automatycznie co 10 s na 100 ms. Mechanizm ten można wyłączyć, lecz nie jest to zalecane, gdyż skutkuje przyspieszoną degradacją ogniwa. Zawór spustowy ogniwa jest cyklicznie otwierany przez sterownik, w celu zapewnienia wymiany gazów w celach ogniwa, co ma istotny wpływ na jego wydajność [15]. Ogniwo paliwowe jako źródło energii charakteryzuje się dosyć niską dynamiką, to znaczy że nie jest w stanie skokowo zmniejszyć lub zwiększyć swojej mocy. Zjawiska z tym związane przeanalizowano między innymi w pracy [16]. Ponadto, sprawność ogniwa jest największa, gdy pracuje ono przy stałej mocy obciążenia, zbliżonej do mocy znamionowej. Takie więc warunki pracy zapewniono ogniwu w rozpatrywanym układzie zasilania. W tym celu w układzie zastosowano magazyn energii złożony z baterii akumulatorów litowo-jonowych oraz banku superkondensatorów. Magazyn ten ma za zadanie wyrównywać bieżące zmiany obciążenia ogniwa, umożliwiając mu pracę w stałych warunkach.

### Butla metalowodorkowa

Zastosowano niskociśnieniową butlę metalowodorkową o pojemności 600 m<sup>3</sup> wodoru rozprężonego. Butle metalowodorkowe, w odróżnieniu do butli klasycznych, wiążą wodór chemicznie, w złożu wypełnionym wysoce porowatym proszkiem metalicznym. Wodór jest wiązany wewnątrz struktury krystalicznej ziaren proszku. Dzięki temu butla metalowodorkowa jest w stanie pomieścić nawet trzykrotnie więcej wodoru niż butla klasyczna o tych samych wymiarach, dodatkowo pracując przy znacznie niższym ciśnieniu, rzędu 10 – 20 bar, w stosunku do 200 bar dla butli klasycznej. Niższe ciśnienie zapewnia większe bezpieczeństwo użytkowania instalacji gazowej. Wadą butli metalowodorkowej jest dużo większa masa. Podczas pracy układu i poboru gazu z butli, wodór jest na bieżąco uwalniany ze złoża w szeregu reakcji chemicznych. Proces ten ma bardzo złożony przebieg [17,18,19]. Między innymi, tempo reakcji uwalniania wodoru zależy od stanu wysycenia złoża (stopnia napełnienia butli) oraz od temperatury. Proces uwalniania wodoru wymaga dostarczenia ciepła, co powoduje, że w trakcie pracy układu zasilania butla wymaga podgrzewania. W przedstawionym układzie w tym celu planuje się w przyszłości wykorzystać aktywny układ ogrzewania. Wadą takiego rozwiązania jest pogorszenie bilansu mocy BoP (Balance of Plant) w układzie zasilania, wynikające ze zwiększonego zużycia części wytworzonej energii na potrzeby własne układu.

### Przetwornica główna

Wyjściowa charakterystyka napięciowo-prądowa ogniwa paliwowego jest nieliniowa. W związku z tym, znalezienie optymalnych warunków pracy wymaga zastosowania przetwornicy głównej o wejściu wyposażonym w algorytm poszukiwania punktu pracy o maksymalnej mocy MPPT (Maximum Power Point Tracking). Przetwornice takie są stosowane powszechnie w systemach fotowoltaicznych [20], a w przypadku niniejszych badań z powodzeniem zastosowano taką przetwornicę do transferu energii elektrycznej z ogniwa paliwowego do głównej szyny napięcia stałego. Wyjście przetwornicy głównej musi z kolei obsługiwać tryb stałego prądu i stałego napięcia CC/CV (Constant Current / Constant Voltage), umożliwiające skuteczne i bezpieczne ładowanie magazynu energii. Gdy napięcie szyny prądu stałego jest mniejsze niż  $U_{dc} = 56,8$  V, czyli maksymalne dopuszczalne napięcie dla baterii 16S LiFePO<sub>4</sub>, wtedy przetwornica pracuje w trybie CC

utrzymując stały, maksymalny dopuszczalny prąd wyjściowy przy nadmiarze mocy produkowanej przez ogniwo paliwowe lub prąd mniejszy od maksymalnego, wynikający z aktualnie dostępnej mocy produkowanej przez ogniwo. Gdy napięcie  $U_{dc}$  osiągnie wartość maksymalną dopuszczalną, przetwornica przechodzi w tryb CV aby nie dopuścić do przeładowania baterii akumulatorów.

### Magazyn energii

Rolę głównego magazynu energii pełni bateria akumulatorów litowo-jonowych. Jej zadaniem jest wyrównywanie zmian obciążenia ogniwa tak, aby mogło pracować przy stałej, optymalnej mocy. W trakcie przeprowadzonych badań laboratoryjnych okazało się, że zastosowana bateria typu LiFePO<sub>4</sub>, ze względu na długie stałe czasowe nie jest w stanie odpowiednio szybko reagować na zmiany w przepływie energii, zachodzące między innymi podczas skokowej zmiany warunków pracy układu, od odbierania energii (hamowanie odzyskowe) do obciążenia (przyspieszanie). W związku z tym następowały awaryjne wyłączenia układu zasilania, spowodowane reakcją przetwornicy głównej na zbyt duże wahania napięcia szyny prądu stałego  $U_{dc}$ . Problem ten rozwiązano dodając bank superkondensatorów, charakteryzujących się znacznie lepszą dynamiką niż bateria akumulatorów. Podobny, hybrydowy magazyn energii opisano w pracy [21]. Zastosowany bank superkondensatorów ma łączną pojemność 14,5 F i jest wyposażony w aktywny układ balansujący napięcie poszczególnych kondensatorów połączonych szeregowo. Bank superkondensatorów jest dodatkowo wyposażony w układ wstępnego ładowania (rezystor zbocznikowany wyłącznikiem), konieczny w celu uniknięcia impulsu prądowego, jaki towarzyszyłby podłączeniu rozładowanych superkondensatorów bezpośrednio do szyny głównej napięcia stałego.

### Badania laboratoryjne

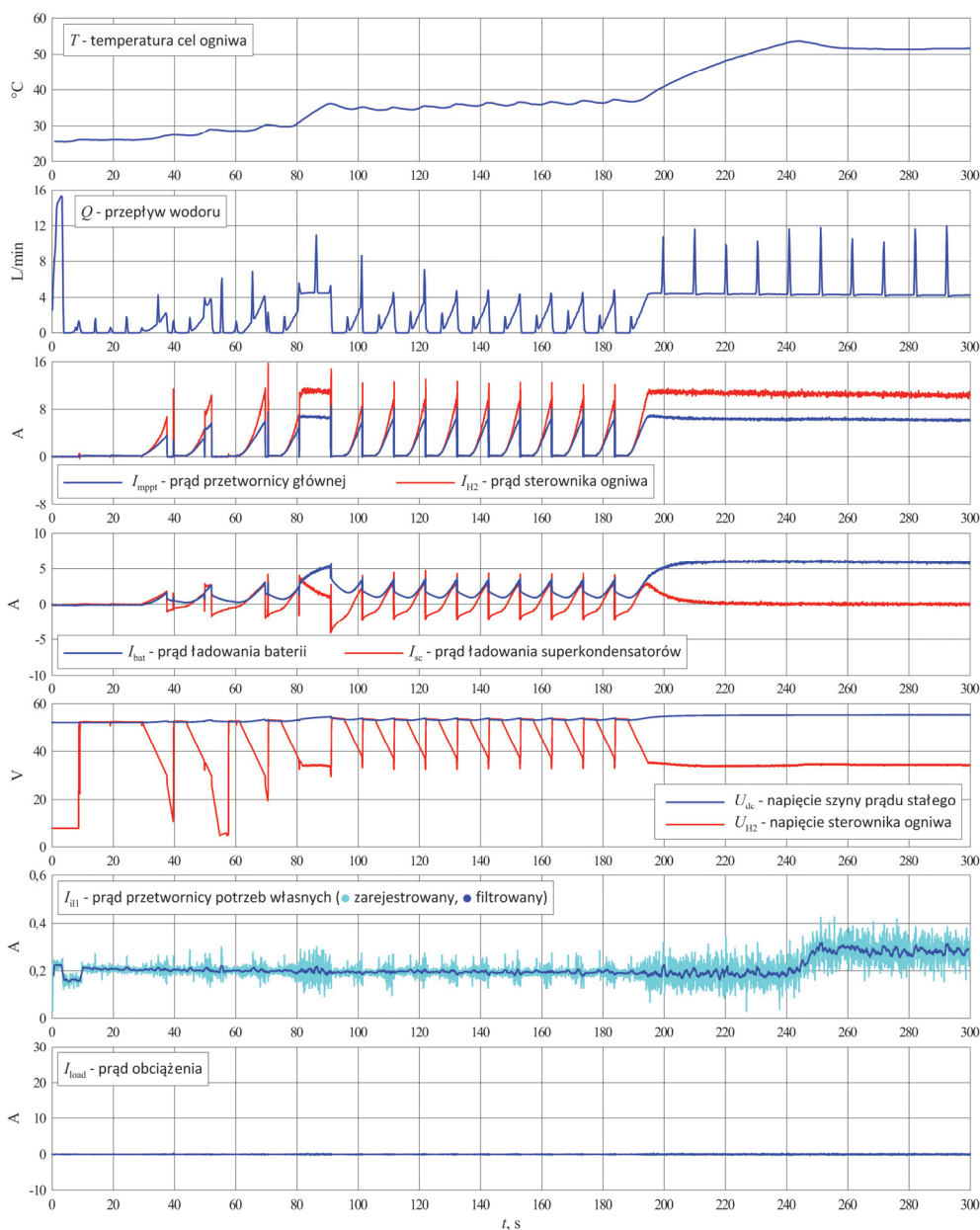
Na rysunku 4 przedstawiono przebiegi zarejestrowane podczas rozruchu ogniwa paliwowego. W chwili  $t = 0$  bateria akumulatorów i superkondensatory są już podłączone do głównej szyny napięcia stałego, co oznacza że ich inicjalizacja nastąpiła wcześniej (uruchomienie BMS baterii i wstępne naładowanie superkondensatorów). Po załączeniu ogniwa paliwowego w chwili  $t = 0$ , widoczny jest trwający około 90 s okres pracy niestabilnej, charakteryzujący się nieregularnymi przebiegami przepływu wodoru  $Q$  oraz prądu sterownika ogniwa  $I_{H_2}$ . Niestabilność pracy ogniwa wynika ze zbyt niskiej temperatury cel i jest wynikiem reakcji sterownika ogniwa na przeciążenie ogniwa przy poszukiwaniu punktu pracy o mocy maksymalnej. Gdy w chwili  $t = 90$  s cele ogniwa osiągają temperaturę około  $T \approx 35^\circ\text{C}$ , kształt przebiegów staje się regularny i składają się one z powtarzających się impulsów ( $t$  od 90 s do 190 s). Wynika to z działania mechanizmu SCU, zwierającego wyjście ogniwa co 10 s. Jak wynika z przebiegów, mechanizm ten zakłóca działanie algorytmu MPPT przetwornicy głównej – każde zwarcie powoduje spadek prądu  $I_{mppt}$  do zera, co oznacza utracenie wcześniej znalezionego punktu pracy. W związku z tym w układzie w obecnej postaci mechanizm SCU musi być wyłączony. Wyłączenie SCU następuje około  $t = 190$  s. Dopiero po tym czasie prąd ładowania baterii  $I_{bat}$  oraz napięcie sterownika ogniwa  $U_{H_2}$  stabilizują się. Widoczny jest również stały przepływ pobieranego wodoru  $Q$ , zawierający impulsy wynikające z cyklicznego przedmuchiwania ogniwa poprzez automatyczne otwieranie zaworu spustowego. Po czasie  $t = 190$  s widoczny jest również stały wzrost temperatury  $T$  cel ogniwa, oznaczający że pracują one z maksymalną mocą. Gdy temperatura przekracza około  $55^\circ\text{C}$ , załączają się

wentylatory ogniwa, przez co temperatura nieco spada, widoczny jest za to wzrost poboru prądu potrzeb własnych ogniwa  $I_{il}$ . Należy zauważyć, że podczas przedstawionego na rysunku 4 rozruchu, układ zasilania nie był obciążony ( $I_{load} = 0$ ), więc cała moc wydawana przez ogniwo paliwowe była zużywana na potrzeby własne układu oraz na doładowywanie magazynu energii.

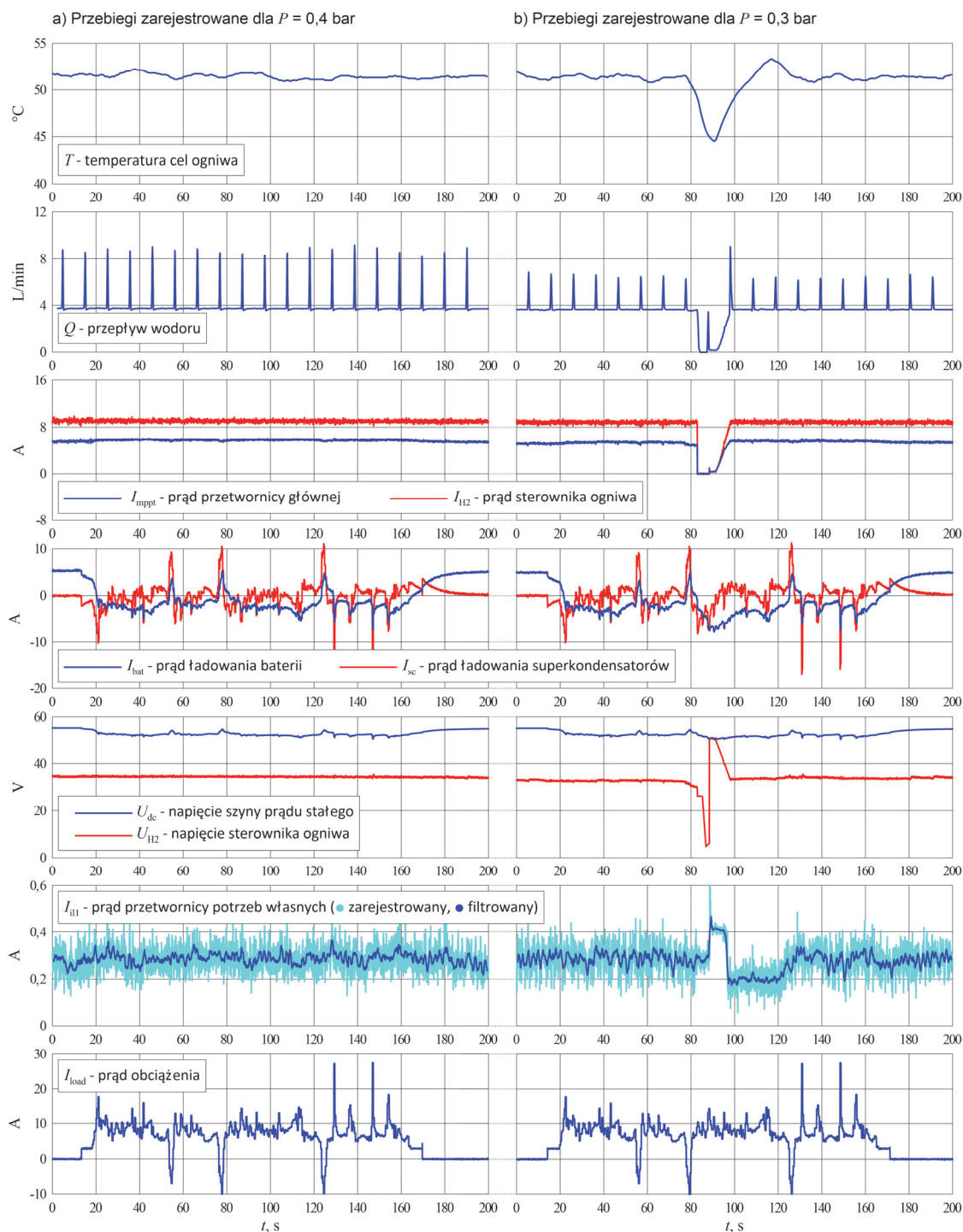
Na rysunku 5 przedstawiono przebiegi zarejestrowane podczas pracy układu zasilania obciążonego zgodnie z modelowym profilem zapotrzebowania na moc, z którego bezpośrednio wynika prąd obciążenia  $I_{load}$ , wymuszany przez zasilacz dwukierunkowy. Przedstawiono wyniki dwóch testów obciążeniowych. Podczas pierwszego (rys. 5a) ciśnienie wodoru na wejściu ogniwa paliwowego było ustawione na  $P = 0,4$  bar, zgodnie z zaleceniem producenta ogniwa. W drugim teście (rys. 5b) ciśnienie obniżono do wartości  $P = 0,3$  bar. Test ten miał na celu wykrycie potencjalnych problemów podczas pracy układu przy zbyt niskim ciśnieniu zasilania.

Przed rozpoczęciem pomiarów ogniwo zostało uruchomione, rozgrzane do optymalnej temperatury, a mechanizm SCU został wyłączony. Podczas pierwszego

testu (rys. 5a) układ zasilania działał prawidłowo i był w stanie na bieżąco pokrywać zmienne w czasie zapotrzebowanie na energię. Należy zwrócić uwagę, że ogniwo paliwowe cały czas pracowało ze stałą, optymalną mocą, o czym świadczą płaskie przebiegi prądów przetwornicy głównej  $I_{mppt}$  oraz sterownika ogniwa  $I_{H2}$ . Różnice w chwilowym zapotrzebowaniu na energię są wyrównywane przez magazyn energii, czyli baterię akumulatorów i bank superkondensatorów. Z przebiegów prądu baterii akumulatorów  $I_{bat}$  oraz superkondensatorów  $I_{sc}$  wynika, że bateria wolniej reaguje na zmiany obciążenia – przebieg jej prądu zmienia się mniej dynamicznie. Gwałtowne, skokowe zmiany obciążenia są wyrównywane głównie przez superkondensatory, których prąd zmienia się ze znacznie mniejszą stałą czasową. Jest to wyraźnie widoczne w trzech chwilach, w których układ zasilania odbiera moc z obciążenia (AGV hamuje odzyskowo). Towarzyszą temu strome impulsy prądu  $I_{load}$  (chwilę  $t \approx 55$  s, 77 s i 124 s), którym odpowiadają około 10 A impulsy prądu ładowania superkondensatorów  $I_{sc}$  i o połowę mniejsze impulsy prądu ładowania baterii akumulatorów  $I_{bat}$ .



Rys.4. Wyniki badań laboratoryjnych – rozruch ogniwa paliwowego



Rys.5. Wyniki badań laboratoryjnych – symulowane warunki operacyjne

W drugim teście (rys. 5b), przy obniżonym ciśnieniu, widoczną różnicą jest nieco niższa wartość przepływu wodoru  $Q$ . Ustawione na zaworze regulacyjnym obniżone ciśnienie nie jest tutaj jedynym niekorzystnym czynnikiem. Oprócz tego, butla wodoru była w znacznym stopniu opróżniona, tak, że kolejnego testu już nie udało się przeprowadzić bez ponownego jej napełnienia. Należy zauważyć, że zdolność butli metalowodorkowej do wydawania wodoru, oraz dynamika tego procesu, zależą od stanu jej napełnienia. W trakcie testu doszło do awaryjnego wyłączenia ogniwa paliwowego. Proces ten rozpoczął się w chwili  $t \approx 80$  s. Oprócz ustawionego zbyt niskiego ciśnienia, nałożyły się tutaj skutki jeszcze dwóch zdarzeń. Po pierwsze, po otwarciu zaworu spustowego ogniwa w chwili  $t$

$= 78$  s wartość przepływu  $Q$  nieznacznie spadła, co świadczy o ograniczonej możliwości wydawania wodoru przez prawie pustą butlę. Po drugie, w tym samym czasie miał miejsce gwałtowny stan nieustalony – przejście od hamowania odzyskowego do obciążenia o dużej wartości, skutkujący widocznym spadkiem napięcia szyny prądu stałego  $U_{dc}$ , który przeniósł się na napięcie wyjściowe sterownika ogniwa  $U_{H2}$ . W rezultacie sterownik zasygnalizował błąd i wyłączył ogniwo. Należy zauważyć, że pomimo wyłączenia ogniwa, obciążenie zostało przejęte przez baterię i superkondensatory, więc układ zasilania jako całość pokrywał zadane zapotrzebowanie na moc.

## Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone badania laboratoryjne w symulowanych warunkach operacyjnych wykazały, że przedstawiony układ zasilania jest w stanie dostarczyć wymaganą ilość energii wykorzystanemu w badaniach AGV. Przed wdrożeniem zaproponowanego rozwiązania należy jednak wprowadzić w układzie pewne udoskonalenia. Przede wszystkim, długotrwałe działanie ogniwa paliwowego bez załączonego układu SCU nie jest wskazane, gdyż obniża jego żywotność. Konieczne jest więc znalezienie rozwiązania umożliwiającego stosowanie SCU w taki sposób, aby mechanizm ten nie zakłócał algorytmu poszukiwania punktu pracy o maksymalnej mocy (MPPT). Kolejnym koniecznym udoskonaleniem jest powiązanie działania ogniwa paliwowego ze stanem naładowania baterii. W układzie o obecnej strukturze, w chwili gdy bateria uzyskuje stan pełnego naładowania a układ zasilania nie jest obciążony, ogniwo paliwowe zaczyna pracować na biegu jałowym, cały czas jednak pobierając wodór, w związku z cyklicznym przedmuchiwaniami. Jest to niepotrzebna strata. Ponadto, podczas pracy z pełną mocą, zawartość wodoru w gazach wylotowych ogniwa jest niewielka i nie przekracza kilku procent, dominuje natomiast para wodna. Tymczasem, na biegu jałowym, gazy wylotowe zawierają znaczną ilość niewykorzystanego wodoru, co może stanowić zagrożenie zwłaszcza w pomieszczeniach zamkniętych. Konieczne jest więc wprowadzenie jednostki sterującej wyłączającej ogniwo paliwowe, gdy stan naładowania baterii jest odpowiednio wysoki a obciążenie układu zasilania jest niewielkie.

*Autorzy pragną podziękować firmie AIUT z Gliwic za ceną wymianę doświadczeń oraz za udostępnienie do badań autonomicznego robota mobilnego FORMICA 1. Pragniemy również podziękować studentom Politechniki Śląskiej, Albertowi Kadłubkowi, Dawidowi Kosztyłe, Kacprowi Kozdrasiowi, Tomaszowi Pelanowi, Piotrowi Smorzowi oraz Michałowi Szostokowi za pomoc w przygotowaniu stanowiska pomiarowego.*

*Badania współfinansowane przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego w ramach projektu „Politechnika Śląska jako Centrum Nowoczesnego Kształcenia opartego o badania i innowacje” nr POWR-03.05.00-00-Z098/17/00.*

**Autorzy:** dr inż. Tadeusz Białoń, E-mail: [tadeusz.bialon@polsl.pl](mailto:tadeusz.bialon@polsl.pl), dr inż. Roman Niestrój, E-mail: [roman.niestroj@polsl.pl](mailto:roman.niestroj@polsl.pl), Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Katedra Elektrotechniki i Informatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, dr inż. Tomasz Rogala, E-mail: [tomasz.rogala@polsl.pl](mailto:tomasz.rogala@polsl.pl), dr hab. inż. Wojciech Skarka, prof. Pol. Śl., E-mail: [wojciech.skarka@polsl.pl](mailto:wojciech.skarka@polsl.pl), Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, ul. Konarskiego 18A, 44-100 Gliwice

## LITERATURA

- [1] Komunikat prasowy, FMC trialing fuel cells for automatic guided vehicles, *Fuel Cells Bulletin*, 2009, No. 7, 3
- [2] Komunikat prasowy, myFC fuel cells for warehouse robots trial, *Fuel Cells Bulletin*, 2021, No. 9, 6
- [3] Informacja prasowa firmy myFC Holding AB, Sztokholm 27.09.2021, <https://www.myfc.se/investor-relations/archives/news>
- [4] Artal-Sevil J.S., Bernal-Agustín J.L., Duflo-López R., Domínguez-Navarro J.A., Forklifts, automated guided vehicles and horizontal order pickers in industrial environments. Energy management of an active hybrid power system based on

- batteries, PEM fuel cells and ultracapacitors, *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 15 (2017), No. 1, 859 - 864
- [5] Naghmash A., Zhizhen L., Hammad A., Ammar A., Double integral sliding mode controller for wirelessly charging of fuel cell-battery-super capacitor based hybrid electric vehicle, *Journal of Energy Storage*, 51 (2022), No. 104288, 1-13
- [6] Guizzi G.L., Manno M., Del Falco M., Hybrid fuel cell-based energy system with metal hydride hydrogen storage for small mobile applications, *International Journal of Hydrogen Energy*, 34 (2009), No. 7, 3112-3124
- [7] De Falco M., Guizzi G.L., Manno M., Picano A., Ugolini F., Development of a hybrid fuel cell-based energy system for small mobile applications, *ECOS 2008 - Proceedings of the 21st International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*, 2008, 1801-1817
- [8] Lototskyya M. V., Tolja I., Davidsa M. W., Klochkova Y. V., Parsonsa A., Swanepoelc D., Ehlersc R., Louw G., van der Westhuizen B., Smithd F., Polleta B. G., Sita C., Linkov V., Metal hydride hydrogen storage and supply systems for electric forklift with low-temperature proton exchange membrane fuel cell power module, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41 (2016), No. 31, 13831-13842
- [9] Armghan H., Ali N., Ahmad I., Munir M.F., Khan S., Armghan A., Nonlinear controller analysis of fuel cell-battery-ultracapacitor-based hybrid energy storage systems in electric vehicles, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 43 (2018), No. 6, 3123-3133
- [10] Rahman A.U., Ahmad I., Malik A.S., Variable structure-based control of fuel cell-supercapacitor-battery based hybrid electric vehicle, *Journal of Energy Storage*, 29 (2020), 101365
- [11] Niestrój R., Rogala T., Skarka W., An Energy Consumption Model for Designing an AGV Energy Storage System with a PEMFC Stack, *Energies*, 13 (2020), No. 13, 3435
- [12] De Ryck M., Versteijhe M., Debrouwere F., Automated guided vehicle systems, state-of-the-art control algorithms and techniques, *Journal of Manufacturing Systems*, 54 (2020), 152-173
- [13] Kurnia, J.C. Sasmito, A.P. Shamim T., Advances in proton exchange membrane fuel cell with dead-end anode operation: A review, *Applied Energy*, 252 (2019), 113416
- [14] Zhang C., Liu H., Zeng T., Chen J., Lin P., Deng B., Liu F., Zheng Y., Systematic study of short circuit activation on the performance of PEM fuel cell, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46 (2021), No. 45, 23489-23497
- [15] Vasilyev A., Andrews J., Dunnett S.J., Jackson L.M., Dynamic Reliability Assessment of PEM Fuel Cell Systems, *Reliability Engineering & System Safety*, 210 (2021), 107539
- [16] Li X., Han K., Song Y., Dynamic behaviors of PEM fuel cells under load changes, *International Journal of Hydrogen Energy*, 45 (2020), No. 39, 20312-20320
- [17] Talagañis B.A., Meyer G.O., Aguirre P.A., Modeling and simulation of absorption-desorption cyclic processes for hydrogen storage-compression using metal hydrides, *International Journal of Hydrogen Energy*, 36 (2011), No. 21, 13621-13631
- [18] Cho J. H., Yu S. S., Kim M. Y., Kang S. G., Lee Y. D., Ahn K. Y., Ji H. J., Dynamic modeling and simulation of hydrogen supply capacity from a metal hydride tank, *International Journal of Hydrogen Energy*, 38 (2013), No. 21, 8813-8828
- [19] Busqué R., Torres R., Grau J., Roda V., Husar A., Mathematical modeling, numerical simulation and experimental comparison of the desorption process in a metal hydride hydrogen storage system, *International Journal of Hydrogen Energy*, 43 (2018), No. 35, 16929-16940
- [20] Nota aplikacyjna, Introduction to Photovoltaic Systems Maximum Power Point Tracking, *Texas Instruments*, Application Report SLVA446, Nov. 2010.
- [21] Hanschek A.J., Bouvier Y.E., Jesacher E., Grbović P.J., Analysis and Comparison of Power Distribution System Topologies for Low-Voltage DC-DC Automated Guided Vehicle Applications, *Energies* 15 (2022), No. 6, 2012