

Marek MALINOWSKI  
Grzegorz PAŚCIAK  
Piotr BUJŁO  
Jacek CHMIELOWIEC

## PROTOTYPOWY ZASILACZ AWARYJNY UPS JAKO PRZYKŁAD ZASTOSOWANIA POLIMEROWEGO OGNIWA PALIWOWEGO ORAZ SUPERKONDENSATORÓW

**STRESZCZENIE** *Skonstruowano zasilacz awaryjny UPS z zespołem źródeł energii ogniwo paliwowe – superkondensatory. Do budowy zasilacza wybrano polimerowe ogniwo paliwowe o nominalnej mocy 600 W oraz dwa szeregowo połączone superkondensatory o pojemności 110 F każdy. Projekt zakładał wykonanie zasilacza z podwójnym przetwarzaniem (typu on-line), co oznacza, że odbiorniki energii podłączone do niego są odseparowane od sieci energetycznej. Wykonany UPS charakteryzuje się nominalną mocą elektryczną 500 W, wysokiej dokładności przebiegiem napięcia sinusoidalnego na wyjściu oraz czasem pracy ok. 17 minut przy obciążeniu 400 W dla zbiornika ze stopami wodorków metali. Skonstruowano system sterujący z funkcją akwizycji danych oparty na mikrokontrolerze AVR, którego zadaniem jest zarządzanie pracą zasilacza na podstawie pomiarów wielkości fizycznych UPS-a. Dane te posłużyły również do scharakteryzowania wykonanego zasilacza.*

**Słowa kluczowe:** *zasilacz UPS, ogniwo paliwowe, superkondensator*

---

**mgr Marek MALINOWSKI, dr Grzegorz PAŚCIAK,  
dr Piotr BUJŁO, dr Jacek CHMIELOWIEC**  
m.mal@iel.wroc.pl

Pracownia Niekonwencjonalnych Źródeł Energii,  
Instytut Elektrotechniki

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 248, 2010

## 1. WSTĘP

---

Dzisiejsza cywilizacja jest całkowicie uzależniona od pewnych produktów, bez których jakość i poziom życia byłyby znacząco gorsze. Do produktów tych należy energia elektryczna, której ciągłe dostarczanie jest warunkiem bezawaryjnej pracy niezliczonej ilości urządzeń i systemów elektrycznych. Złożoność systemu produkcji i przesyłu energii elektrycznej, którego podstawowymi elementami są wielkie elektrownie, sieci linii przesyłowych czy rozdzielnice, często w skutek awarii prowadzi do przerwy w dostawie prądu niosącej za sobą liczne zagrożenia. Aby temu zapobiec konstruuje się urządzenia, których funkcją jest, w razie zaniku napięcia sieci, podtrzymanie pracy podłączonych do nich odbiorników.

Podstawowym przyrządem zaprojektowanym do przejęcia funkcji zasilania w przypadku awarii sieci elektroenergetycznej jest bezprzerwowo zasilacz UPS (z ang. Uninterruptible Power Supply). Urządzenie to zasila podłączone odbiorniki czerpiąc energię z wbudowanych zasobników. W typowych UPS-ach jako zasobniki energii stosuje się akumulatory. W przypadku klasycznych zasilaczy wynika z tego cały szereg wad, do których można zaliczyć ograniczoną żywotność, będącą następstwem niewielkiej liczby cykli ładowanie – rozładowanie, względnie niewielką pojemność akumulatorów przekładającą się na długość czasu pracy zasilaczy czy w końcu okres, po którym zasilacz jest ponownie gotowy do działania, wynikający z długości czasu ładowania baterii. Powyższe wady są w pełni eliminowane dzięki układowi zasilania: ogniwo paliwowe + superkondensator. Układ ten zalicza się do alternatywnych sposobów uzyskiwania oraz gromadzenia energii elektrycznej, co w połączeniu z eliminacją wyżej wymienionych wad przyczyniło się do próby stworzenia prototypowego zasilacza UPS.

Długość czasu pracy zasilacza UPS z wbudowanym ogniwem paliwowym i superkondensatorami jest ściśle zależna od ilości wodoru (lub innego paliwa gazowego) zgromadzonego w butli. Przykładowo: ciśnieniowy zbiornik o pojemności  $3,5 \text{ dm}^3$  gromadzący 33 g wodoru zasila ogniwo paliwowe obciążone mocą 200 W przez 80 min [1]. Jest to znacząca zaleta w porównaniu do zwykłych zasilaczy nie tylko z powodu długości czasu pracy lecz przede wszystkim z uwagi na fakt generacji energii elektrycznej – klasyczne UPS-y są jedynie jej buforami. Ponadto parametry typowych superkondensatorów wykluczają inne wady UPS-ów tj. krótką żywotność oraz długi czas ładowania przez co możliwe staje się wydajne zasilanie urządzeń elektrycznych przez wiele lat użytkowania UPS-a.

Jest bezdyskusyjne, że stosowanie wodoru jako paliwa na potrzeby działania zasilacza UPS, implikuje cały szereg zalet, w wyniku czego, zasilacze

te mogą stać się znaczącą alternatywą dla komercyjnie dostępnych UPS-ów. Produktem reakcji paliwa wodorowego z powietrzem jest woda. W takim przypadku generacja energii elektrycznej przy pomocy ogniwa paliwowego wpisuje się doskonale w idee wykorzystania odnawialnych źródeł energii, spełniając przy tym wysokie normy ekologiczne. Wykorzystanie wodoru jest powiązane z problemami jego pozyskiwania i gromadzenia. Niezależnie od nich wodór jest paliwem przyszłości (głównie przez nieograniczoną ilość, produkt jego reakcji z tlenem czy wielkość jej ciepła), stąd wszelkie próby jego wykorzystania są pożądane.

## 2. KONSTRUKCJA ZASILACZA UPS Z OGNIWEM PALIWOWYM I SUPERKONDENSATORAMI

---

Zgodnie z przeznaczeniem funkcją bezprzerwowego zasilacza awaryjnego UPS, w razie przerwy lub zakłóceń dostawy energii elektrycznej z sieci energetycznej, jest ciągłe, efektywne zasilanie innych urządzeń elektrycznych. W zależności od sposobu zasilania można wyróżnić kilka typów zasilaczy UPS. Należą do nich:

- zasilacze z podwójnym przetwarzaniem (on-line),
- zasilacze „line-interactive”,
- zasilacze z bierną rezerwą (off-line).

Wykonany model zasilacza UPS z układem ogniwo paliwowe + superkondensatory zalicza się do grupy zasilaczy z podwójnym przetwarzaniem. Oznacza to, że w odróżnieniu od zasilaczy typu „line-interactive” lub off-line, wszystkie urządzenia elektryczne zasilane z UPS-a są galwanicznie odseparowane od sieci energetycznej. W ten sposób eliminuje się liczne zakłócenia obecne w sieci, przez co, możliwe jest (np. na potrzeby pracy laboratorium) podłączenie wrażliwych układów pomiarowych. Separacja galwaniczna jest również istotna dla jakości działania samego zasilacza z uwagi na czułe elementy energetyczne zasilacza (np. ogniwo paliwowe) lub wykorzystywane przyrządy, które wymagają zasilania np. przetworniki ciśnienia, czujniki temperatury, wodoru czy natężenia prądu elektrycznego.

### 2.1. Dobór oraz testy podstawowych elementów budowy zasilacza

---

Realizacja projektu budowy zasilacza wiązała się z zadaniem doboru właściwych części. Do najważniejszych należą: ogniwo paliwowe wraz z niez-

będącymi elementami (zbiornik gazu, kompresor powietrza) oraz superkondensatory. Wybrano chłodzony powietrzem stos polimerowych ogniw paliwowych o nominalnej mocy 600 W i napięciowym zakresie pracy: 14 V – 24 V. Jako magazyny energii wytypowano dwa superkondensatory o napięciu znamionowym 16,2 V i pojemności elektrycznej 110 F. W tabelach 1 oraz 2 zebrano istotne dla budowy zasilacza parametry techniczne ww. produktów.

**TABELA 1**

Parametry techniczne wybranego ogniwa paliwowego

Typ membrany	PEM
Liczba celek	24
Zakres napięcia pracy [V]	14 – 24
Moc nominalna [W]	600 W
Zakres temperatury pracy [°C]	20 – 60

**TABELA 2**

Parametry techniczne wybranych superkondensatorów

Nominalna pojemność [F]	110
Napięcie znamionowe [V]	16,2
Rezystancja wewnętrzna [mΩ]	5,4
Zakres temperatury pracy [°C]	od -40 do +65
Maksymalny prąd ciągły [A]	30
Prąd zwarciovowy [A]	3500

Ze względu na potencjalne zastosowania UPS-a (np. biurowe) zdecydowano się na zakup adsorpcyjnego zbiornika na wodór zasilającego ogniwo paliwowe. W tabeli 3 wymienione jego podstawowe dane techniczne.

Poprawne działanie ogniwa wymaga wymuszonego przepływu tlenu, stąd zasilacz został wyposażony we właściwy kompresor powietrza.

**TABELA 3**

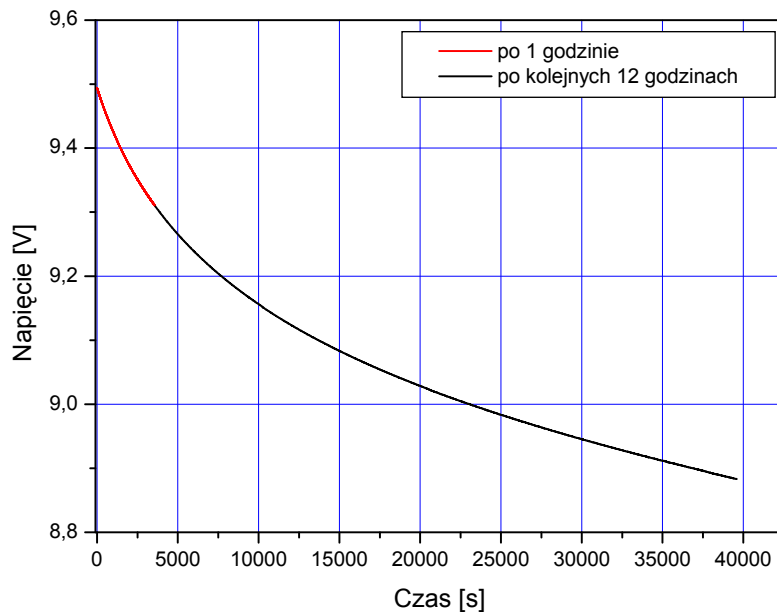
Dane techniczne zbiornika na wodór

Maksymalna pojemność	900 sl
Ciśnienie rozładowania	ok. 8 barów (20°C)
Maks. Ciśnienie ładowania	17 barów
Maks. temperatura pracy	50 °C

Przeprowadzono badania powyższych elementów w celu weryfikacji parametrów technicznych. Ma to szczególne znaczenie w przypadku ogniw paliwowych. Dla przykładu jedno z badanych ogniw paliwowych o maksymalnej, deklarowanej przez producenta mocy 1000 W w testach osiągało zaledwie 450 W. Innymi ważnymi parametrami pracy ogniwa są: napięciowy zakres pracy, temperatura działania czy wartość przepływu gazów zasilających.

W przypadku superkondensatorów wykonano:

- Pomiar samorozładowania superkondensatora przy użyciu miernika ATLAS 0531. Wyniki pomiarów przedstawia rysunek 1.



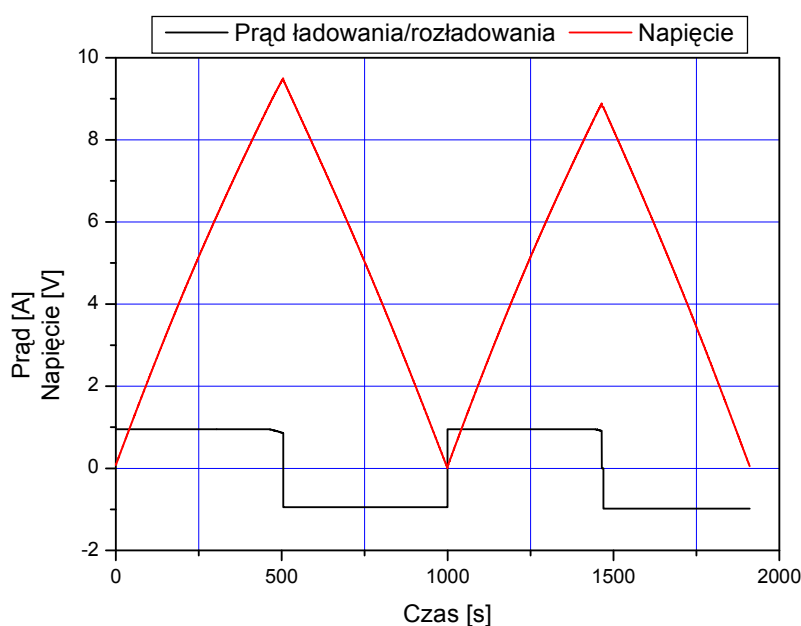
**Rys. 1. Samorozładowanie superkondensatora**

Superkondensator naładowany został do napięcia 9,5 V, po czym zarejestrowano spadek napięcia w czasie 13 godzin. W ciągu pierwszej godziny zaobserwowany został spadek napięcia o 0,2 V, w ciągu kolejnych 12 godzin napięcie mierzone na zaciskach superkondensatora było niższe od początkowego o 0,6 V. Na podstawie przeprowadzonego pomiaru stwierdzono 6% spadek napięcia na kondensatorze w ciągu 13 godzin.

Przeprowadzenie pomiarów samorozładowania jest ważne z punktu widzenia charakterystyki samych superkondensatorów, jednakże w praktyce, zasada działania zasilacza UPS praktycznie eliminuje problem samorozładowania.

- Pomiar galwanostatycznego ładowania i rozładowania pojedynczego superkondensatora. Wartości napięcia i prądu w funkcji czasu przedstawione zostały na rysunku 2. Ze względu na ograniczone możliwości

sprzętowe superkondensator ładowany był prądem o wartości 0,95 A do napięcia wynoszącego 9,5 V, które było mniejsze od napięcia nominalnego. Prąd rozładowujący miał tę samą wartość i przeciwną do ładowania polaryzację. Galwanostatyczne badania potwierdzają, że badane układy są wysokiej klasy. Ilość cykli ładowanie – rozładowanie jest tak duża (ok. 1 milion), że w praktyce układy te mogą funkcjonować przez wiele lat użytkowania zasilacza UPS.

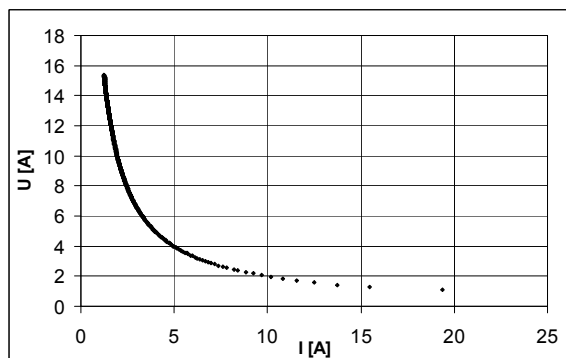


**Rys. 2. Galwanostatyczne ładowanie i rozładowanie Superkondensatora**

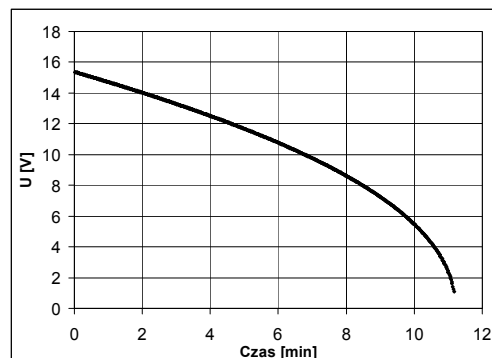
- Pomiarów charakterystyk prądowo-napięciowych superkondensatorów. W zakresie przykładania zmiennego obciążenia mierzono odpowiedź układów 16 V. Na rysunku 3 pokazano wykres napięcia w funkcji prądu dla pojedynczego superkondensatora przy stałym obciążeniu 20 W.

Z pomiarów charakterystyk prądowo napięciowych wyodrębniono również czasową charakterystykę rozładowania SC (rys. 4). Oba wykresy obrazują zdolność superkondensatorów do magazynowania energii, której pobieranie jest powiązane ze spadkiem napięcia przy jednoczesnym wzroście prądu. W wyniku tego wykorzystanie ich pociąga za sobą konieczność doboru właściwych konwerterów napięcia. Większość konwerterów napięcia projektowanych jest na standardowe napięcia 5, 12, 24, 48 (V) w związku z tym wybór superkondensatorów charakteryzujących się nominalnym napięciem 16 V przekłada się na większy zakres pracy napięciowej niż, dla przykładu, dla superkondensatora 48 V. (48 V SC z konwerterem 48 V pracuje w zakresie 40 – 48 V, natomiast dwa sze-

regowo połączone superkondensatory 16 V z wykorzystaniem 24 V konwertera mogą nawet pracować w zakresie napięć 10 – 32 V, co znacznie zwiększa ilość energii, którą można efektywnie wykorzystać).

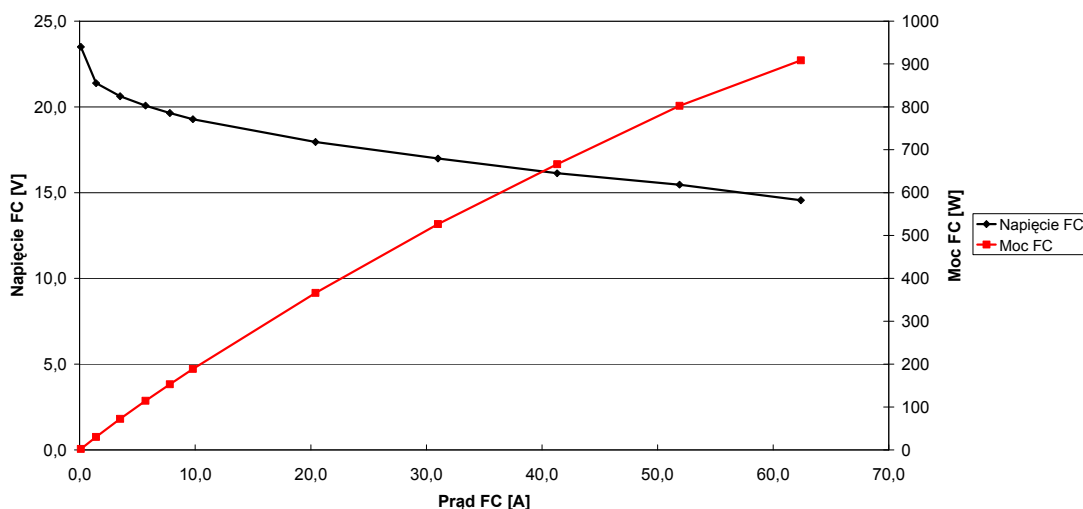


Rys. 3. Charakterystyka prądowo – napięciowa superkondensatora 110 F



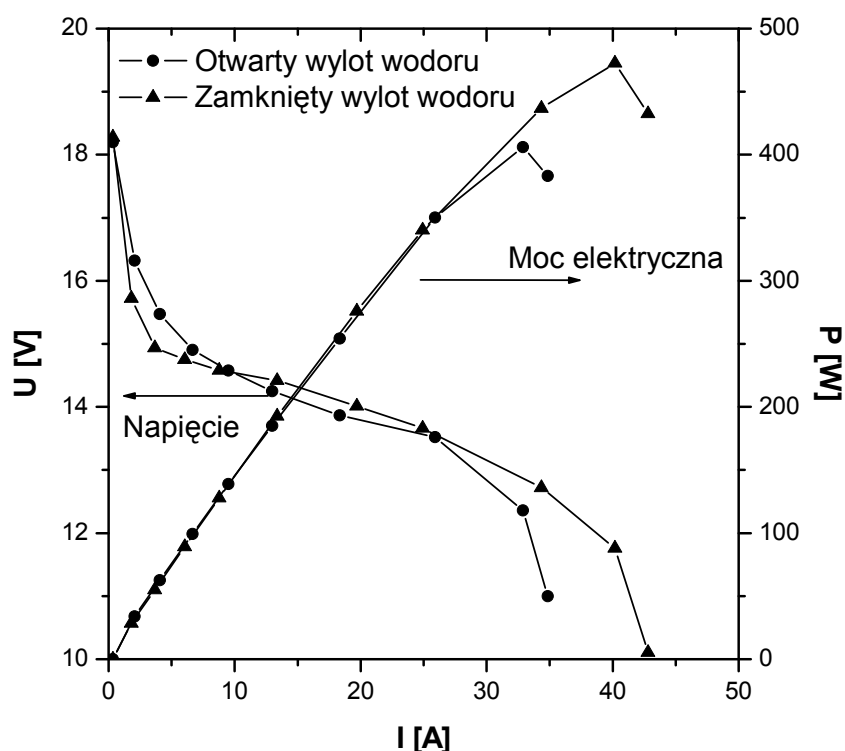
Rys. 4. Całkowite rozładowanie superkondensatora obciążeniem 20 W

W zakresie pomiarów parametrów ogniw paliwowych wykonano serię pomiarów przy zmiennym obciążeniu. Na rysunku 5 pokazano charakterystykę prądowo-napięciową polimerowego ogniwa PEMFC, wykorzystanego do budowy zasilacza awaryjnego UPS. Wykres przedstawia zarówno charakterystykę napięcia w funkcji prądu jak i mocy w zależności od natężenia prądu. Napięcie pracy przy nie obciążonym ogniwie wynosi 24 V. W miarę wzrostu obciążenia wartość ta spada aż do osiągnięcia niecałych 15 V, przy których ogniwo pracuje z maksymalną mocą ponad 900 W. Zgodnie z danymi producenta nominalna moc ogniwa wynosi 600 W, stąd projektowano UPS właśnie dla tej wartości.



Rys. 5. Wykres napięcia i mocy w funkcji natężenia prądu wybranego ogniwa paliwowego

Charakterystyki prądowo-napięciowe stosu zmierzone zostały również w układzie, kiedy wylot wodoru z ogniwa był zamknięty. Zastosowanie takiej konfiguracji przewidziano w modelu zasilacza UPS w celu zwiększenia sprawności i ekonomiczności użytkowania urządzenia. Porównanie charakterystyk zmierzonych przy otwartym i zamkniętym wylocie paliwa z ogniwa przedstawia rysunek 6.



Rys. 6. Porównanie charakterystyk pracy ogniwa działającego w przepływie wodoru i z zamkniętym wylotem paliwa, ciśnienie pracy 0,3 bar, temperatura 25 °C

Jak widać moc ogniwa zmierzona w układzie kiedy wylot wodoru jest zamknięty jest większa od mocy mierzonej w przepływie gazu. Korzystny wpływ na uzyskaną wartość może być wynikiem bardziej równomiernego rozkładu ciśnienia gazu w stosie, co z kolei wpływa na równomierną koncentrację wodoru. W przypadku przepływu gazu przez stos istnieje różnica ciśnień między wlotem i wylotem gazu, co powoduje nierównomierną koncentrację wodoru na elektrodzie. Na wylocie wodoru panuje ciśnienie atmosferyczne i zmniejsza się koncentracja wodoru. W przypadku zamkniętego wylotu ciśnienie i koncentracja paliwa w stosie jest równomierna. Wpływa to korzystnie na zmniejszenie strat koncentracyjnych, co widoczne jest na powyższej charakterystyce prądowo-napięciowej przedstawionej na rysunku 6.

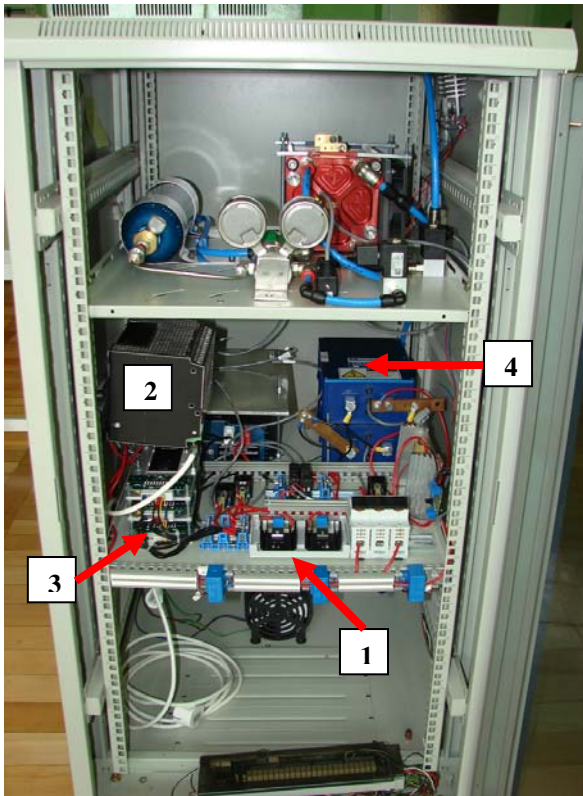


## 2.2. Projekt i budowa awaryjnego zasilacza UPS

Budowa zasilacza była wieloetapowym zadaniem, które podzielono na kilka części. Są nimi:

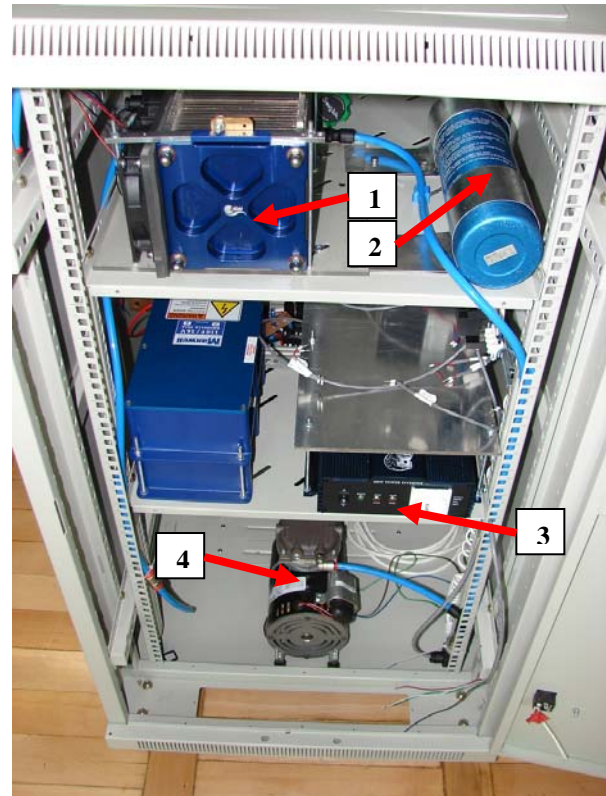
- część elektryczna (rozdz. 2.2.1),
- część gazowa (rozdz. 2.2.2),
- układ sterowania wraz z algorytmem (rozdz. 2.2.3).

Na fotografiach 1 oraz 2 pokazano wykonany zasilacz awaryjny UPS. Fotografia 1 przedstawia przednią część zasilacza natomiast fotografia 2 – tylną.



**Fot. 1. Widok na przednią część UPS-a**

- 1 – część elektryczna, w tym:
- 2 – Konwerter AC/DC,
- 3 – Konwerter DC/DC,
- 4 – Superkondensatory



**Fot. 2. Widok na tylną część UPS-a**

- 1 – ogniwo paliwowe, 2 – zbiornik wodoru,
- 3 – przetwornica DC/AC, 4 - kompresor

### 2.2.1. Część elektryczna

Wykonany model zasilacza UPS typu on-line zawiera układy podwójnego przetwarzania: AC/DC oraz DC/AC. Wykorzystanie ogniwa paliwowego (FC)

oraz układu dwóch szeregowo połączonych superkondensatorów (SC) wymusiło zastosowanie trzeciego układu przetwarzania – konwertera DC/DC pracującego w szerokim zakresie napięć wejściowych (9 – 36 V). W tabeli 4 pokazano podstawowe parametry techniczne zasilacza UPS.

Zasilacz projektowany był zgodnie z parametrami technicznymi ogniwa paliwowego. Według danych producenta moc nominalna FC wynosi 600 W. Całość tej mocy nie może być przekazana na wyjście zasilacza z uwagi na konieczność zasilania szeregu elementów jego budowy, w tym przede wszystkim: kompresora, elektrozaworów, układu sterowania czy różnych przyrządów pomiarowych. W wyniku tego maksymalna moc zbudowanego zasilacza wynosi 500 W. Dzięki zastosowaniu wysokiej klasy przetwornicy DC/AC urządzenia odbiorcze podłączone do UPS-a zasilane są zmiennym napięciem  $\sim 230\text{ V} \pm 3\%$  o wysokiej jakości przebiegu sinusoidalnego. Zasilacz może w impulsie wydatkować do 1000 W mocy jedynie w czasie, gdy superkondensatory są w dużym stopniu naładowane. Ma to szczególne znaczenie w momencie podłączenia urządzeń wymagających podczas uruchamiania dużego prądu rozruchowego. Przykładem jest kompresor powietrza, którego gwałtowny rozruch wymaga chwilowego prądu o dużym natężeniu. Podany w tabeli parametr czasu pracy zasilacza dotyczy konfiguracji UPS-a z wbudowanym adsorpcyjnym zbiornikiem na wodór. Jest to minimalny czas pracy dla tego zbiornika. Przy obciążeniu 400 W, z uwagi na stałe otwarcie wylotu wodoru FC, zużycie paliwa było względnie niewielkie. Przewiduje się wykonanie testów przy okresowym zamykaniu wyjścia, wykorzystując skonstruowany system sterowania. Ze względu na zagrożenie spowodowane nagłym wzrostem ciśnienia  $\text{H}_2$  bądź różnicy ciśnień między paliwem a utleniaczem powyżej granicznych wartości, badania te zostały odłożone na okres późniejszy. Istnieje możliwość podłączenia do zasilacza ciśnieniowego zbiornika na wodór, co znacznie wydłuża okres pracy zasilacza [1]. W skonstruowanym zasilaczu stosuje się wodór o czystości co najmniej 5.0 (99,999%). Wartość ta jest wymagana zarówno przez ogniwo paliwowe jak i zbiornik adsorpcyjny.

**TABELA 4**

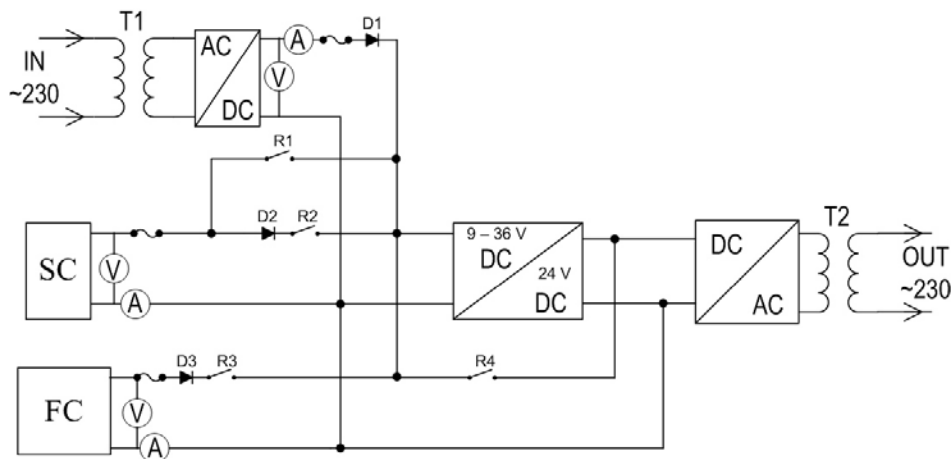
Podstawowe dane techniczne zasilacza UPS

Parametr	Wartość	Uwagi
Moc nominalna	500 W	
Napięcie wyjściowe	$\sim 230\text{ V} \pm 3\%$	Pełny sinus
Maksymalna moc impulsowa	1000 W	
Czas pracy	ok. 17 min.*	Obciążenie 400 W
Wykorzystywane paliwo	Wodór	Czystość 5.0 (99,999%)

\* dla zbiornika adsorpcyjnego, otwarty wylot wodoru, ciśnienie początkowe 0,5 bara.

Do budowy zasilacza wykorzystano polimerowe ogniwo paliwowe PEM-FC chłodzone powietrzem oraz dwa szeregowo połączone superkondensatory o pojemności 110 F i nominalnym napięciu 16,2 V. Na rysunku 7 pokazano schemat połączeń elektrycznych skonstruowanego zasilacza UPS.

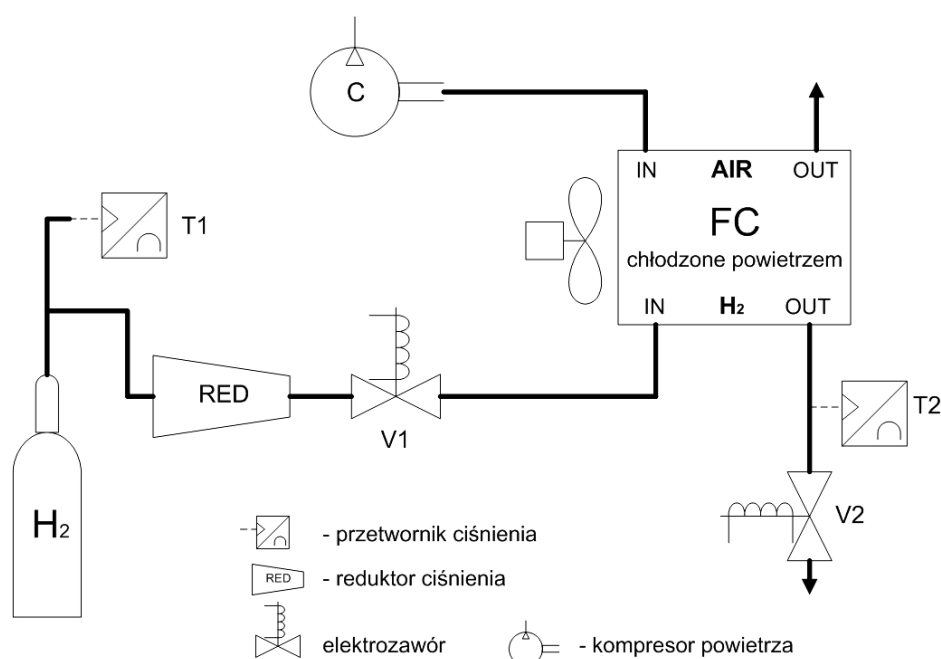
Na wejściu sieciowym zasilacza znajduje się 600 W konwerter AC/DC cechujący się maksymalnym napięciem wyjściowym 32 V. Wartość ta jest istotna z uwagi na potrzebę ładowania dwóch szeregowo połączonych 16 V superkondensatorów. W normalnym trybie pracy (obecność napięcia sieciowego) układ ten bezpośrednio zasila znajdującą się na wyjściu przetwornicę DC/AC oraz na żądanie układu sterowania doładowuje superkondensatory. Przetwornica DC/AC charakteryzuje się pełnym sinusem oraz maksymalną mocą ciągłą 600 W. Działa ona nieprzerwanie w sposób niezależny od stanu w którym aktualnie znajduje się UPS (normalny lub awaryjny). Zasilana jest bezpośrednio z układu AC/DC przy udziale superkondensatorów, które, w razie zaniku napięcia sieciowego, przejmują podtrzymanie obciążenia do momentu uruchomienia ogniwa paliwowego. Spadek napięcia SC poniżej zakresu granicznego przetwornicy skutkuje dołączeniem konwertera DC/DC, który umożliwia ciągły pobór energii nawet do osiągnięcia wartości napięcia równej 9 V. W czasie rozładowywania uruchamiane jest ogniwo paliwowe, które stopniowo przejmuje obciążenie. W układzie nie przewidziano możliwości doładowania SC przez ogniwo paliwowe, ładowanie następuje dopiero po powrocie napięcia zasilania. Wszystkie układy wejściowe są zabezpieczone bezpiecznikami chroniącymi je przed nadmiernym obciążeniem oraz diodami Schottky'ego zapobiegającym wzajemnemu ładowaniu – szczególnie istotna jest ochrona ogniwa paliwowego, którego ładowanie doprowadziłoby do zniszczenia. Załączanie poszczególnych podukładów odbywa się poprzez przekaźniki, które w odpowiednim momencie otrzymują sygnał z układu sterowania.



Rys. 7. Schemat elektryczny zasilacza UPS z ogniwem paliwowym (FC) oraz superkondensatorami (SC)

### 2.2.2. Część gazowa

Dołączenie ogniwa paliwowego wymaga właściwego postępowania, tak aby uzyskać jego prawidłowe działanie. Przełączenie obciążenia odbywa się dopiero po osiągnięciu początkowego punktu pracy. W tym celu układ monitorujący mierzy napięcie elektryczne na otwartych zaciskach. Gdy napięcie osiągnie maksymalną wartość (ok. 24 V) układ załącza ogniwo. Na rysunku 8 pokazano wykonane połączenia gazowe ogniwa paliwowego wraz z przyrządami wymaganymi do jego pracy.



**Rys. 8. Schemat połączeń gazowych wykorzystywanego ogniwa paliwowego**

Zbiornik wodoru jest poprzez reduktor ciśnienia podłączony do ogniwa. Wartość ciśnienia, ustawiana ręcznie na reduktorze, nie może przekroczyć dopuszczanego maksymalnego ciśnienia na celkach ogniwa (0,5 bar). Po stronie pierwotnej reduktora zamontowano przetwornik mierzący ciśnienie w zakresie 0 – 25 barów. Wartość ta służy do oceny ilości paliwa – głównie po podłączeniu zbiornika ciśnieniowego. Uruchomienie ogniwa odbywa się poprzez elektromagnetyczne otwarcie zaworu V1 oraz włączenie kompresora powietrza C. Zarówno paliwo wodnorowe jak i powietrze są tłoczone jednocześnie do wejść ogniwa tak, aby różnica ciśnień między nimi nie przekroczyła wartości 0,5 (jest to maksymalna dopuszczalna wartość oddziałująca na membrany poszczególnych celek ogniwa). Sterowanie pracą ogniwa tj. zużyciem wodoru oraz mocą,

w tym również temperaturą, odbywa się poprzez okresowe otwieranie elektro-zaworu V2 znajdującego się na wyjściu wodorowym. Zatkanie tego wylotu może spowodować spadek napięcia ogniwa, jednak zazwyczaj prowadzi do sprawniejszego zużycia wodoru. Parametrami podstawowymi warunkującymi częstotliwość otwierania zaworu V2 są ciśnienie mierzone w przetworniku T2 oraz napięcie elektryczne ogniwa paliwowego. Wzrost ciśnienia w pobliże granicznej wartości skutkuje otwarciem zaworu, natomiast spadek napięcia, spowodowany niskim ciśnieniem, zamyka przepływ w celu zwiększenia sprawności zużywania paliwa.

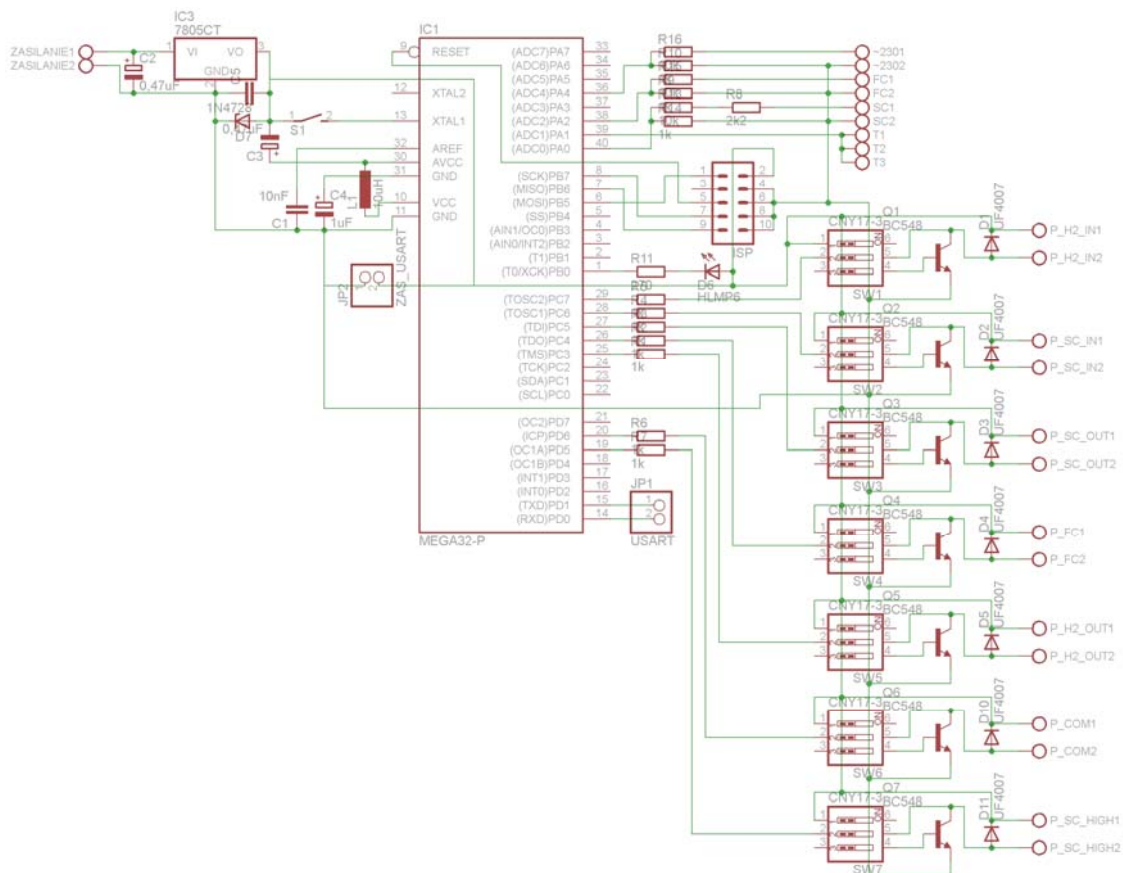
Działanie ogniwa wymaga jego efektywnego chłodzenia, dlatego wykonano układ sterowania prędkością obrotową wentylatorów zamontowanych do powierzchni ogniwa. Prędkość ta jest ściśle powiązana z temperaturą mierzoną punktowo na jego powierzchni.

### **2.2.3 Układ sterowania wraz z algorytmem**

Z uwagi na dużą liczbę podukładów UPS-a, jak również na charakterystykę jego pracy konieczne było wykonanie układu sterowania pracą zasilacza. Do tego celu wybrano mikrokontroler typu AVR, żeby z jego pomocą kontrolować działanie zasilacza zgodnie z zaimplementowanym algorytmem skompilowanym w języku C. Podstawowym zadaniem układu sterowania jest załączanie przełączników, które są przypisane różnym podukładom systemu UPS.

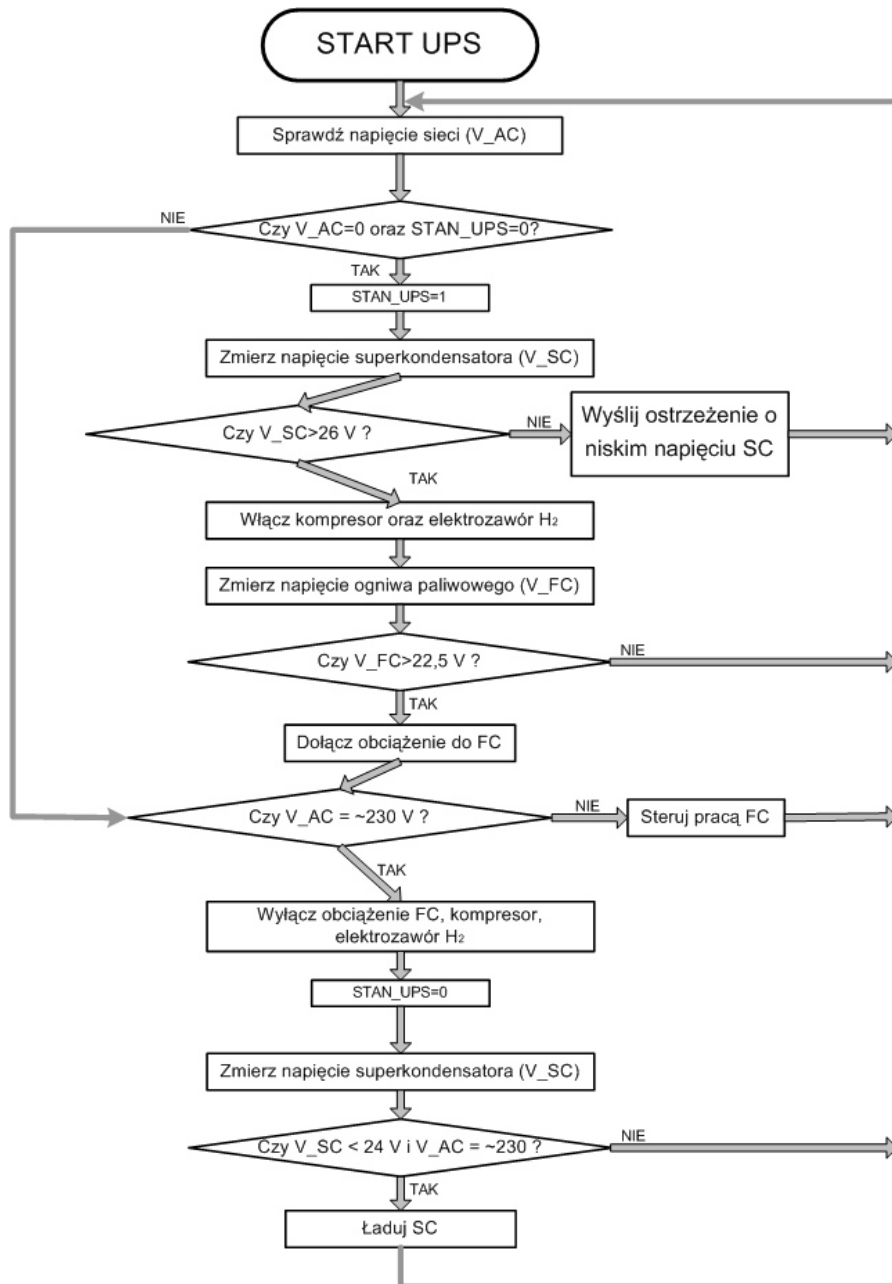
Układ sterowania zarządza przełącznikami na podstawie danych zbieranych z wielu instrumentów pomiarowych. Na rysunku 9 pokazano schemat elektroniczny układu sterowania. Mikrokontroler ( $\mu\text{C}$ ) AVR steruje cewkami przełączników w sposób pośredni. W celu ochrony działania układu wykonano separację galwaniczną cewek przełączników od pinów  $\mu\text{C}$ . Dzięki wyeliminowaniu zakłóceń, mogących się pojawiać w czasie pracy przełączników, gwarantuje to sprawną pracę układu sterowania.

Ważną funkcją układu sterowania są pomiary napięć poszczególnych podukładów zasilacza UPS. Zadanie to jest realizowane dzięki wbudowanemu w  $\mu\text{C}$  8-kanalowemu przetwornikowi ADC. Wykorzystanie właściwie dobranych dzielników napięć pozwoliło na proste i stosunkowo dokładne pomiary takich podukładów jak superkondensatory, ogniwo paliwowe, konwerter AC/DC, przetworników ciśnienia czy hallotronowych czujników prądu. Na podstawie bezpośrednich pomiarów napięć (bądź pośrednich – ciśnień lub natężeń prądów) realizowany jest algorytm sterowania. Schemat blokowy, przedstawiający pracę zasilacza zgodnie z głównym algorytmem sterowania umieszczono na rysunku 10.



Rys. 9. Schemat elektroniczny układu sterowania UPS

Wszystkie funkcje występujące w algorytmie wykonywane są w wielokrotnej pętli. Start zasilacza UPS jest równoznaczny z pomiarem stanu napięcia sieci. Jeśli sieć energetyczna zasila UPS, działanie układu sterowania ogranicza się jedynie do monitorowania stanu naładowania superkondensatorów. Odbywa się to poprzez pomiar napięcia na superkondensatorach ( $V_{SC}$ ). Jeśli  $V_{SC}$  na skutek samorozładowania SC spadnie poniżej 24 V układ sterowania uruchamia ładowanie do momentu osiągnięcia nominalnej wartości 32 V. Z uwagi na bardzo niską rezystancję wewnętrzną SC zastosowano ogranicznik prądowy, aby nie dopuścić do zniszczenia podukładu ładującego na skutek zbyt dużego obciążenia prądem ładowania. Detekcja zaniku napięcia sieciowego skutkuje przejściem zasilacza w stan pracy awaryjnej. W tym momencie wszystkie podłączone odbiorniki oraz elektryczne elementy samego UPS są zasilane wyłącznie z superkondensatorów. Jednocześnie rozpoczyna się uruchomienie ogniwa paliwowego. Warunkiem startu jest stan dostatecznego naładowania SC ( $V_{SC} > 26$  V). Jest to warunek konieczny do tego aby przełączenie na ogniwo paliwowe nie spowodowało przerwy w zasilaniu odbiorników. Start realizowany jest poprzez uruchomienie kompresora, elektrozaworu doprowadzającego



Rys. 10. Algorytm układu sterowania zasilacza UPS

wodór do wejścia FC oraz wentylatora na potrzeby chłodzenia ogniwa. Ze względu na dość duży prąd rozruchowy kompresora przetwornica, która go zasila, jest wprost podłączona do SC, dzięki czemu nie było konieczności implementowania układu łagodnego startu (typu soft start). Jeśli mierzone napięcie na FC osiągnie początkową wartość, układ sterowania załącza obciążenie przechodząc tym samym w stan pełnej pracy awaryjnej. Na tym etapie rolą układu sterowania jest kontrola mocy ogniwa poprzez, opisywane już, przytykanie ogniwa

z pomocą elektrozaworu przy jednoczesnym pomiarze ciśnienia wodoru i napięcia elektrycznego. Powrót napięcia sieciowego powoduje odłączenie obciążenia od FC. Wyłączenie kompresora i dopływu wodoru oraz stopniowy spadek prędkości obrotowej wentylatorów, aż do bezpiecznego schłodzenia ogniwa paliwowego. W ten sposób realizowany jest wielokrotnie powtarzalny algorytm układu sterującego.

### 3. BADANIE ZASILACZA UPS Z UKŁADEM OGNIWA PALIWOWEGO I SUPERKONDENSATORAMI

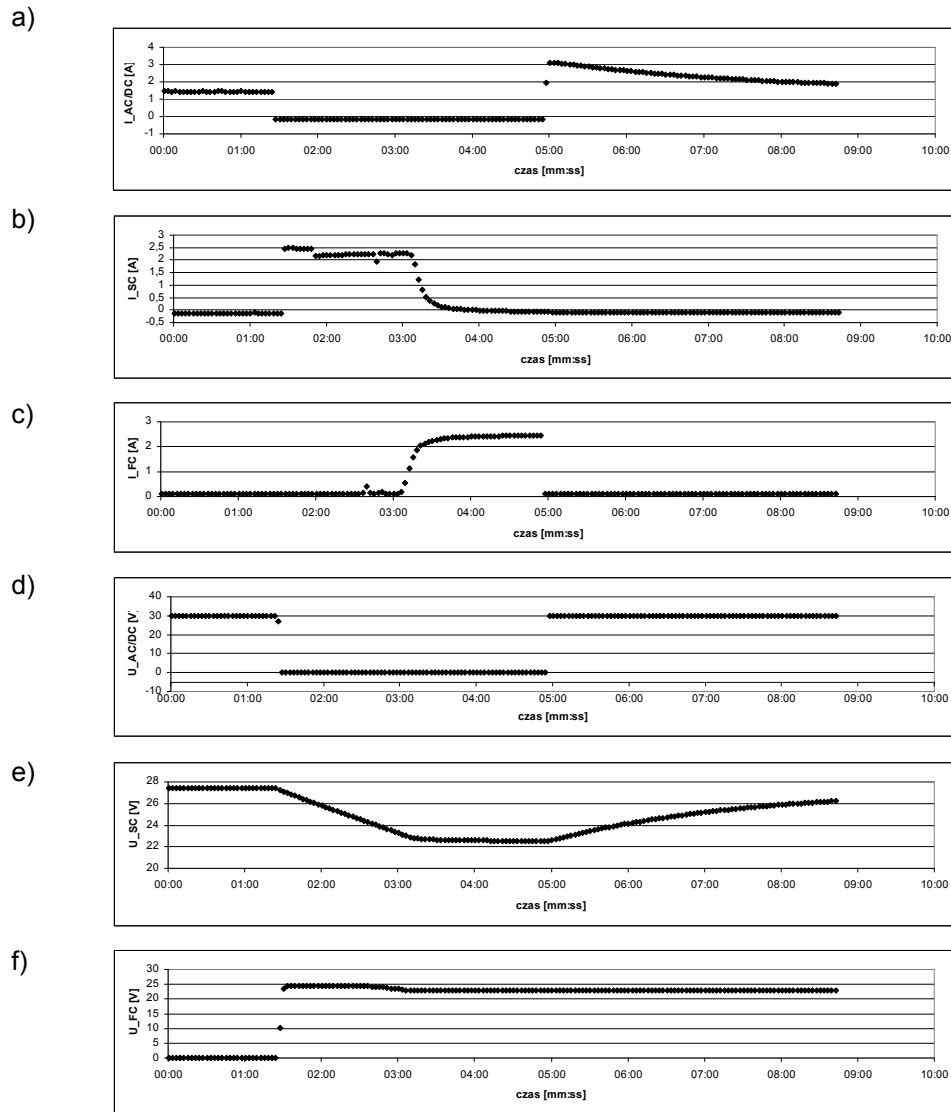
---

Uruchomienie zasilacza UPS z ogniwnem paliwowym i superkondensatorami jest złożonym procesem, w którym ilość czynników mających związek z jego pracą jest powodem różnorodności testów, które należało przeprowadzić w celu optymalizacji jego działania. W związku z tym testy zasilacza przeprowadzono w trzech różnych kierunkach.

W czasie początkowych badań zasilacza załączono UPS przy obciążeniu ok. 50 W. Test ten miał na celu sprawdzenie poprawności działania systemu sterującego w czasie przechodzenia z trybu pracy normalnej do trybu pracy awaryjnej oraz jego zachowania w czasie powrotu napięcia sieciowego, w tym kontrola procesu ładowania SC. Wykresy zobrazowane na rysunku 11 potwierdzają poprawność działania zbudowanego zasilacza UPS.

Pokazano czasowe zależności mierzonych prądów i napięć podczas działania UPS. W momencie zaniku napięcia sieciowego (11.d i a), obciążeniu zaczynają być poddawane superkondensatory (11.b). Do momentu uruchomienia ogniwa paliwowego (11.f), całość energii zużywanej przez UPS i podłączony odbiornik pochodzi z SC. Załączenie ogniwa paliwowego następuje już po kilku sekundach, jednak do momentu zrównania się napięć na obydwu źródłach energii, odbiorniki są podtrzymywane przez superkondensatory. W tym okresie ogniwo paliwowe nasycy się wodorem oraz powietrzem, tak że w momencie jego obciążenia (11.c) sprawnie zaczyna zasilać UPS. Powrót napięcia sieciowego (11.d) skutkuje odłączeniem FC, odcięciem dopływu wodoru i powietrza oraz stopniowym wyłączaniem chłodzenia ogniwa paliwowego. Jednocześnie rozpoczyna się proces ładowania superkondensatorów (11.a i 11.e) i już po kilku minutach cały cykl może być powtórzony. Powyższy test udowodnił skuteczność działania systemu sterującego, który pod obciążeniem sprawnie kontroluje proces działania zasilacza awaryjnego.

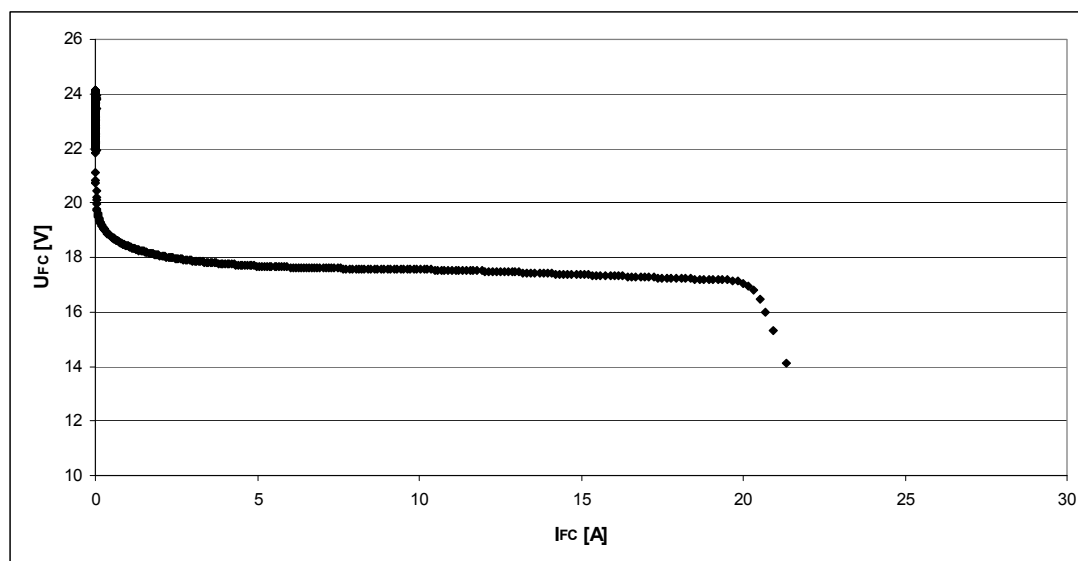




**Rys. 11. Działanie zasilacza UPS w warunkach małego obciążenia:**

a, b, c oraz d, e, f – kolejno prądy oraz napięcia: sieciowe, superkondensatorów, ogniwa paliwowego

Kolejnym testem było badanie trybu pracy awaryjnej przy zmiennym obciążeniu w celu sprawdzenia działania UPS-a w warunkach dynamicznych zmian mocy pobieranej przez odbiorniki. Badanie wykonano wykorzystując elektroniczne obciążenie H&H serii ZS. Na rysunku 12 znajdują się wyniki przeprowadzonego testu.



Rys. 12. Wyniki badań zasilacza UPS pod zmiennym obciążeniem

Z uwagi na fakt, że zasilacz UPS pracując w trybie awaryjnym, jest zasilany głównie z ogniwa paliwowego, wyniki badań są analogiczne w porównaniu z wyznaczoną charakterystyką stosowanego FC (rys. 5). W czasie testu przykładano zmienne obciążenie w zakresie od 0 do 450 W przez okres ok. 5 minut. Dane pokazują poprawność pracy UPS-a w warunkach zmiennego obciążenia. Jedynym zagrożeniem jest zjawisko nadmiernego wychłodzenia zbiornika adsorpcyjnego. Efekt ten jest powodem załamania się przedstawionej charakterystyki (w punkcie poboru 20 A prądu przez obciążenie). Dzieje się tak w wyniku zatrzymania procesu desorpcji cząsteczek wodoru z powierzchni stopów metali zbiornika. Główną przyczyną jest częściowe rozładowanie zbiornika, który na początku badań był już w pewnym stopniu opróżniony. W podanym teście ujawniła się wada wykorzystywanego zbiornika polegająca na trudności poprawnej oceny stopnia jego naładowania. Objętość zgromadzonego wodoru jest bardzo słabą zależnością ciśnienia na wyjściu zbiornika. Najlepszą oceną stopnia naładowania jest pomiar jego masy, jednak w warunkach pracy zasilacza jest on niemożliwy, przez co, wymagany jest czasowy demontaż butli w celu oszacowania objętości wodoru.

Wykonano system wykrywania pojawienia się stanów ostrzegawczych. Sprawdzenie jego działania jest ważne z punktu widzenia bezpieczeństwa pracy zasilacza UPS. Parametrami krytycznymi mogącymi świadczyć o pojawieniu się awarii lub wystąpieniu zagrożenia uszkodzenia zasilacza są:

- dolna graniczna wartość napięcia ogniwa paliwowego,
- natężenie prądu płynącego z FC,
- górne graniczne napięcie superkondensatorów,

- temperatura SC i FC,
- ciśnienie gazów ogniwa paliwowego oraz ich różnica pomiędzy wodorem i powietrzem,
- stężenie wodoru w obszarze UPS.

Dolna graniczna wartość napięcia zamontowanego ogniwa paliwowego wynosi 14V. Spadek napięcia poniżej tej wartości, w przypadku FC będącego pod obciążeniem, grozi jego uszkodzeniem ze względu na nagły wzrost prądu. System monitoruje stan napięcia i w razie wystąpienia spadku, odłącza ogniwo w celu jego ochrony oraz wysyła komunikat ostrzegawczy informujący użytkownika o jego wystąpieniu. Poprawność pracy ogniwa ocenia się w analogiczny sposób na podstawie pomiaru natężenia prądu FC.

Górne graniczne napięcie szeregowo połączonych superkondensatorów wynoszące 32,4 V jest wartością krytyczną. Przekroczenie tej wartości w procesie ładowania SC może spowodować nieodwracalne ich zniszczenie. Z tej przyczyny istotna jest kontrola napięcia SC tak, aby nie dopuścić do jego przeładowania. W razie wzrostu napięcia superkondensatorów powyżej 31 V system odłącza wszelkie układy mogące je ładować. Dodatkowym zabezpieczeniem jest fabryczny układ samorozładujący, który uruchamia się gdy napięcie przekroczy wartość dopuszczalną. W takim przypadku wzrasta temperatura superkondensatora, dlatego monitoruje się ją w celu wykrycia zagrożenia.

Pomiar temperatury pracy ogniwa paliwowego jest ważną czynnością, która może zapobiec jego uszkodzeniu. Wzrost temperatury w pobliżu wartości krytycznej może być spowodowane przez różne czynniki. Dzieje się tak w przypadku:

- zbyt dużego obciążenia dołączonego do ogniwa paliwowego,
- znaczącego wzrostu natężenia prądu elektrycznego spowodowanego zbyt małym przepływem gazów przez FC,
- awarię systemu chłodzenia FC – ogniwo nawet przy niewielkim obciążeniu musi być chłodzone.

Niezależnie od przyczyny wzrostu temperatury FC, awaria musi zostać szybko wykryta. Z tego powodu rejestruje się ją w trzech punktach: dwa czujniki zostały przymocowane do powierzchni ogniwa natomiast jeden znajduje się w pewnej odległości od niego – rejestruje temperaturę wnętrza zasilacza UPS. Wykrycie stanu awaryjnego przez system sterujący powoduje natychmiastowe odłączenie ogniwa oraz wysłanie komunikatu ostrzegawczego do panelu operatorskiego.

Poważnym zdarzeniem, które może mieć miejsce w czasie pracy zasilacza jest niekontrolowany wyciek wodoru. Z uwagi na prawdopodobieństwo wystąpienia tego zdarzenia zasilacz UPS został wyposażony w układ wykry-

wania przekroczenia stężenia wodoru. Dwa czujniki wodoru wchodzące w skład układu reagują na przekroczenie dopuszczalnego stężenia wodoru w obszarze UPS-a uaktywniając ostrzegawczy sygnał dźwiękowy.

Działania powyższych elementów zabezpieczenia zasilacza zostały przetestowane. Badanie prowadzono doprowadzając w sposób sztuczny do ich wystąpienia. Wykrywanie pojawienia się stanów awaryjnych działa w sposób prawidłowy.

## 4. PODSUMOWANIE

---

Wykonano 500 W zasilacz awaryjny UPS zawierający polimerowe ogniwo paliwowe oraz dwa szeregowo połączone superkondensatory. Projekt zasilacza eliminuje typowe wady klasycznego UPS-a takie jak krótki czas pracy, ograniczoną żywotność czy długi czas ładowania akumulatorów. Długość czasu pracy prototypowego zasilacza jest ściśle zależny od ilości wodoru magazynowanego w butli. W czasie testów podtrzymywano 400 W obciążenie przez 17 minut wykorzystując adsorpcyjny zbiornik na wodór – stosując zbiornik ciśnieniowy wartość tą można wielokrotnie zwiększyć. Z uwagi na liczbę podukładów oraz przyrządów pomiarowych zaprojektowano i wykonano system sterujący oparty na mikrokontrolerze AVR. Mierząc wartości takich wielkości jak napięcia elektryczne, natężenia prądów, ciśnienia gazów czy temperatur system zarządza przyływem energii elektrycznej. Wykonane testy potwierdziły poprawność pracy zasilacza m.in. w warunkach zmiennego obciążenia jak również w momencie wystąpienia stanu krytycznego mogącego się pojawić w wyniku przekroczenia dopuszczalnych wartości temperatur, ciśnień, stężenia wodoru bądź napięcia na ogniwie paliwowym lub superkondensatorach.

### PODZIĘKOWANIE

Zadanie zrealizowane w ramach Projektu Badawczego COST nr/COST/261/2006. Autorzy dziękują Ministerstwu Nauki i Szkolnictwa Wyższego za umożliwienie wzięcia udziału w Projekcie.

### LITERATURA

1. Bujło P., Paściak G., Chmielowiec J.: PEM Fuel Cell-Based Unit – performance and operation characteristic. Proceedings of Third International Conference on Advances in Processing, Testing and Application of Dielectric Materials APTADM 5-9, 2007.
2. Bujło P., Sikora A., Paściak G., Chmielowiec J.: Energy flow monitoring unit for Hy-IEL (PEM fuel cell-supercapacitor) electric scooter. Electrical Review, 86, 3, 2010.

3. Bujło P., Bieniecki S., Paściak G., Chmielowiec J., Mazurek B., Perz J.: Hybrid Fuel Cell Supercapacitor System for HY-IEL Electric Scooter Drive. Proceedings of 17-th World Hydrogen Energy Conference, Brisbane, Australia 15 – 19 June 2008.
4. Varkaraki E., Lymberopoulos N., Zachariou A.: Hydrogen based emergency back-up system for telecommunication applications. Journal of Power Sources, 14–22, 118, 2003.

*Rękopis dostarczono, dnia 19.10.2010 r.*

UNINTERRUPTIBLE POWER SUPPLY (UPS)  
AS A EXAMPLE OF THE FUEL CELL  
AND ULTRACAPACITORS APPLICATION

Marek MALINOWSKI, Grzegorz PAŚCIAK,  
Piotr BUJŁO, Jacek CHMIELOWIEC

**ABSTRACT** *Uninterruptible Power Supply (UPS) supplied by fuel cell and ultracapacitors has been constructed. UPS consists of 600 W polymer electrolyte membrane fuel cell (PEM-FC) and two connected in series 110 F ultracapacitors. One of the main criteria for this project was creation of the on-line UPS. This means total isolation between the supplied loads and power network. The rated power of the supply is 500 W and there is accurate sinus on its output. Using the metal hydride tank UPS has an ability to work for 17 minutes at 400 W of the load but this time can be significantly increased by mounting of the pressure tank. Control and data acquisition system has been built. The system with AVR microcontroller manages the power supply using measurement data. These data have been also using to characterize the UPS.*

