

doi:10.15199/48.2018.09.27

Wybrane aspekty badań eksploatacyjnych autonomicznych zasilaczy dla zastosowań specjalnych

Streszczenie. Przedstawiony artykuł dotyczy zasad doboru i badań temperaturowych akumulatorowych źródeł energii elektrycznej przeznaczonych do pracy w warunkach terenowych. Zaproponowano metodykę doboru rodzaju akumulatora i określania jego niezbędnej pojemności. Wyniki przeprowadzonych badań potwierdziły prawidłowość przyjętych rozwiązań, zaś badania temperaturowe pozwoliły ograniczyć pierwotnie przewidywaną pojemność.

Abstract. The presented article concerns the principles of selection and temperature testing of battery-powered electric energy sources intended for work in field conditions. The methodology of choosing the type of battery and determining its necessary capacity has been proposed. The results of the conducted tests confirmed the correctness of the adopted solutions, while temperature tests allowed to limit the initially anticipated capacity. **The principles of selection and temperature testing of battery-powered electric energy sources intended for work in field conditions**

Słowa kluczowe: zasilanie, akumulatory, badania klimatyczne.

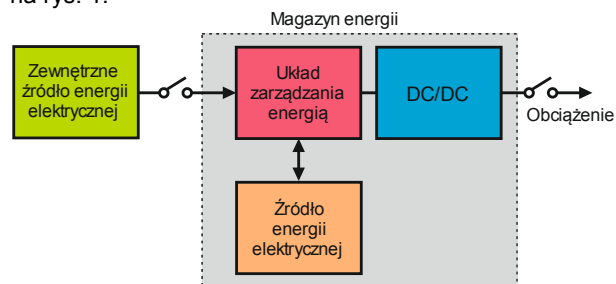
Keywords: supplying systems, batteries, climatic test.

Wstęp

Przedmiotem badań był układ zasilania przenośnego miernika wysokomocowych pól elektromagnetycznych dedykowanego do pracy w ekstremalnych warunkach środowiskowych. Zaprojektowany zasilacz musi mieć zdolność bezawaryjnej pracy w szerokim zakresie temperatur oraz w otoczeniu pól elektromagnetycznych dużych energii.

Do głównych wymagań środowiskowych dla zbudowanego układu zasilania należy zapewnienie możliwości pracy autonomicznej miernika, przez co najmniej 4 godziny oraz odzyskanie ponownej gotowości do działania w czasie nie dłuższym niż 2 godziny.

Typowa struktura układu zasilacza przedstawiona jest na rys. 1.



Rys. 1. Struktura układu zasilającego

W strukturze tej poza zasilaczem sieciowym wyróżniamy magazyn energii w skład którego wchodzi zasobnik energii elektrycznej (źródło energii elektrycznej), układ zarządzania energią oraz ewentualnie przetwornica DC/DC. Z punktu widzenia odporności na ekstremalne warunki klimatyczne najistotniejszym jest wykorzystywane źródło energii elektrycznej. Analizując wpływ poszczególnych parametrów klimatycznych na wydajność zastosowanego zasobnika energii okazuje się, że temperatura pracy ma dominującą rolę. Temperatura determinuje pojemność i rodzaj użytych akumulatorowych źródeł energii. Przykładowo znamionowa temperatura pracy bezobsługowych akumulatorów kwasowo-ołowiowych wynosi 20°C i dlatego wykorzystując je w niskich temperaturach należy uwzględnić spadek pojemności akumulatora i dobierać ją z odpowiednim zapasem [1]. W temperaturze 0°C pozostaje do dyspozycji średnio ok. 85% pojemności znamionowej a w -10°C i -20°C odpowiednio 75% i 65%. Natomiast praca w podwyższonych

temperaturach powoduje dramatyczne skrócenie żywotności ogniw, która zmniejsza się o połowę na każdy wzrost temperatury o 8°C powyżej znamionowej temperatury pracy. Oznacza to, że czas pracy akumulatora eksploatowanego w temperaturze 28°C spadnie do 50% a w 36°C do 25% projektowanej żywotności [2]. Dla akumulatorów zasadowych (np. NiMH) bardzo szkodliwe są wysokie temperatury, których przekroczenie również powodują zmniejszenie żywotności. Jest to szczególnie ważne podczas szybkiego ładowania, gdzie wymagana jest dodatkowa kontrola temperatury ogniwa. Dla ogniw NiCd dopuszczalna temperatura pracy wynosi od -20°C do +50°C, a ekstremalna temperatura pracy w krótkim okresie wynosi -50°C do +70°C [2].

Wpływ na ostateczną pojemność użytego akumulatora oprócz czynników klimatycznych mają zapotrzebowanie energetyczne zasilanych urządzeń oraz sprawność układu zabezpieczającego i stabilizatora napięcia. Zasadniczym czynnikiem powodującym zmiany napięcia na zaciskach baterii akumulatorów jest ubytek energii w czasie pracy miernika. Układ zasilania oprócz wymienionych cech elektrycznych powinien zabezpieczać odpowiednią ilość energii przy jak najmniejszej własnej masie i objętości. Należy zatem dobrać takie akumulatory, które nie tylko zapewnią odpowiednią ilość energii dla czterogodzinnej pracy w wymaganych warunkach środowiskowych, ale również będą lekkie i małe. Oznacza to, że pod uwagę powinno się wziąć akumulatory o dużej ilości energii w przeliczeniu na masę (energię właściwą) i objętość (gęstość energii). Wymaganą pojemność elektryczną akumulatora Q_{el} można obliczyć z zależności

$$(1) \quad Q_{el} = k \frac{1}{q_t \cdot q_i \cdot \eta_s \cdot U_{an}} P_{on} \cdot t_p$$

gdzie: P_{on} – moc znamionowa odbiornika [W], U_{an} – napięcie znamionowe baterii akumulatorów [V], η_s – sprawność układów pośredniczących w przekazywaniu energii [-], q_t – stosunek pojemności elektrycznej akumulatora w minimalnej temperaturze pracy miernika do pojemności elektrycznej znamionowej akumulatora [-], q_i – stosunek pojemności elektrycznej akumulatora przy znamionowym prądzie pracy miernika do pojemności elektrycznej znamionowej akumulatora [-], t_p – czas pracy miernika [h], k – współczynnik przewymiarowania uwzględniający optymalny poziom rozładowania akumulatora od 1 do 2.

Można wyróżnić dwa podstawowe typy chemicznych źródeł energii: ogniwa pierwotne oraz wtórne ogniwa ładowalne.

Ogniwa chemiczne pierwotne są najpopularniejszym źródłem energii elektrycznej prądu stałego o stosunkowo dobrej sprawności, ale ich największą wadą jest konieczność okresowej wymiany po jednorazowym użyciu. Współczesne ogniwa pierwotne zapewniają uzyskanie stosunkowo dużej energii właściwej zgromadzonej energii, przykładowo ogniwa cynkowo-powietrzne pozwalają uzyskać energię właściwą na poziomie 250 Wh/kg, litowe – 270 Wh/kg czy alkaliczne – 100 Wh/kg. Ogniwa cynkowo-powietrzne przy dużej energii właściwej mają jednak najkrótszy czas życia. W większości przypadków układy elektroniczne mogą być zasilane bezpośrednio z ogniwa chemicznych eliminując dodatkowe kondycjonery będące dodatkowym źródłem dyssypacji energii. Ogniwa pierwotne powinno się stosować do zasilania odbiorników bardzo małej mocy. Wtedy są one efektywniejsze od akumulatora, który traciłby znacznie więcej energii na skutek samorozładowania niż pobierana przez odbiornik.

Wśród ogniw wtórnych ładowalnych największą energię właściwą zapewniają akumulatory na bazie litu (od 90 do 170 Wh/kg), spotyka się również akumulatory nikielowo-wodorkowe (NiMH) o gęstości 65 Wh/kg czy NiCd o gęstości 35 Wh/kg. Tego typu akumulatory występują często jako elementy buforujące w systemach wykorzystujących inne źródła energii. Stosując ogniwa ładowalne należy uwzględnić w reżimie ich pracy czas na odtworzenie wymaganego poziomu energii. W Tab.1 przedstawiono zestawienie typowych akumulatorowych źródeł energii elektrycznej prądu stałego dostępnych na rynku wraz z ich podstawowymi parametrami [3, 4].

Tabela 1. Zestawienie parametrów źródeł energii elektrycznej prądu stałego

Rodzaj źródła energii	energia właściwa [Wh/kg]	L. cykli ład./rozł.	Nap. znam. ogniwa [V]	Czas szybkiego ładowania [h]	Temp. Pracy [°C]
Pb	40	200÷500	2,0	8-16	-20 ÷ 50
Ni-Cd	30÷35	1000	1,25	1	-40 ÷ 60
Ni-MH	65	500	1,25	2÷4	-30 ÷ 60
Li-ion	80-90	500	3,6	2÷4	-20 ÷ 60
Li-ion polimer	100÷150	300÷500	3,6	2÷3	-20 ÷ 60
Li-FePO ₄	130÷170	1000	3,3	0,2	-30 ÷ 60

Swego rodzaju alternatywą dla akumulatorów są superkondensatory, które wykazują większą gęstość mocy niż akumulatory, jednakże ilość magazynowanej energii w tej samej objętości jest dwu, trzy krotnie mniejsza niż dla akumulatorów [5, 6]. Ze względu na dość długą żywotność, krótki czas ładowania i dużą gęstość energii są ciekawą alternatywą dla typowych akumulatorów w zastosowaniu do zasilania odbiorników bardzo małej mocy.

Analizując szczegółowo parametry poszczególnych rodzajów akumulatorów przedstawionych, w Tab.1 z punktu widzenia potrzeb projektowanego układu, najlepsze parametry wykazują akumulatory litowo-żelazowo-fosforanowe (LiFePO₄), nazywane też niekiedy nanofosforanowymi. Cechuje je szeroki zakres temperatur pracy, duża żywotność oraz duża energia właściwa. W przypadku pracy w warunkach poligonowych układu zasilającego, zakłada się temperaturę pracy od -20°C do +60°C. Po przeprowadzonej analizie zdecydowano się na zastosowanie jako podstawowego magazynu energii pakietu akumulatorów o połączeniu 4S2P, pojemności elektrycznej 5,0 Ah i napięciu U=13,2 V. Pakiet ten zawiera 8 ogniw LiFePO₄ firmy A123 Systems, Inc. typu A123

ANR26650M1b o pojemności elektrycznej 2,5 Ah, napięciu 3,3 V w obudowie walcowej o średnicy 25,9 mm i wysokości 65,2 mm. Ogniwa połączone równolegle w 2 grupach po 4 szeregowo są zespolone z układem D103 10 A zabezpieczającym ogniwa przed przeładowaniem, nadmiernym rozładowaniem i zwarcie. Parametry tak skonfigurowanego pakietu akumulatorów przedstawiono w Tab. 2.

Tabela 2 Parametry wybranego pakietu akumulatorów

Parametr	Jedn. miary	Wartość
Pojemność elektryczna (znamionowa/min.)	Ah	5/4,8
Napięcie znamionowe	V	13,2
Impedancja wewnętrzna (1 kHz AC typowo)	mΩ	12
Czas standardowego ładowania prądem 1C do napięcia 14,4 V. Zalecana metoda ładowania CC/CV)	min	45
Czas szybkiego ładowania do 80% stanu naładowania przy prądzie 4C do napięcia 14,4 V Zalecana metoda ładowania metodą CC)	min	12
Maksymalny ciągły prąd rozładowania	A	140
Maksymalny impulsowy prąd rozładowania	A	240
Liczba cykli ład. / rozł. dla pełnego rozładowania prądem 10C	-	>1000
Temperatura pracy	°C	-30÷55

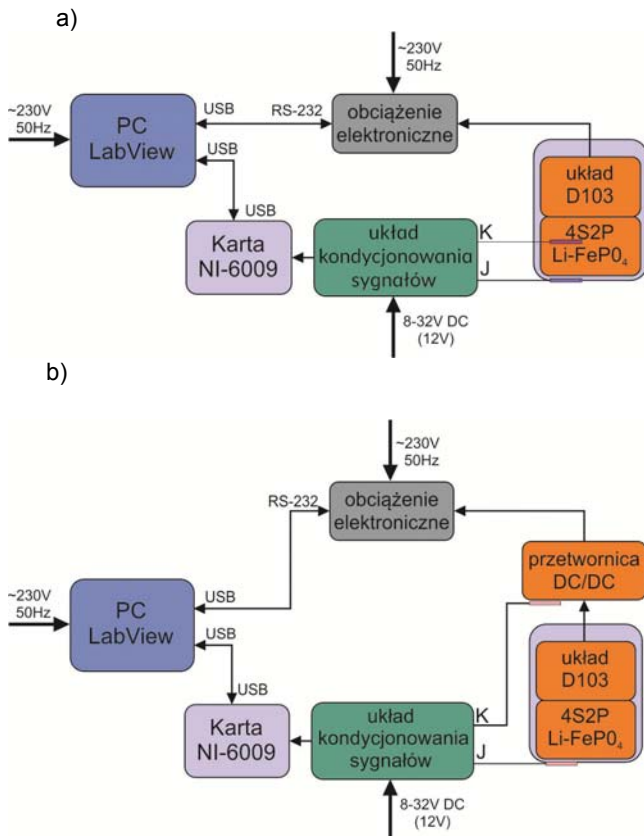
Drugim istotnym, choć opcjonalnym elementem układu zasilania, jest przetwornica DC/DC typu SD-15A-12.

Ocena przydatności zaproponowanego układu zasilania została dokonana w oparciu o wyniki badań kontrolowanego rozładowania pakietu akumulatorów w zmiennych warunkach temperaturowych i przy różnych prądach. Pomiary były wykonywane w dwóch konfiguracjach tzn. najpierw dla samego pakietu akumulatorów a następnie dla pakietu i przetwornicy DC/DC utrzymującej stałą wartość napięcia na wyjściu układu. Ze względu na pracę układu zasilania w ograniczonych warunkach wymiany ciepła, w trakcie badań zastosowano odpowiednią izolację termiczną symulującą rzeczywistą obudowę. Prowadzone badania miały na celu zweryfikowanie rzeczywistej pojemności pakietów akumulatorowych oraz sprawności przetwarzania energii w przetwornicy DC/DC w przewidywanych warunkach pracy.

2. Stanowisko pomiarowe – badania

W celu przeprowadzenia niezbędnych badań zbudowano dedykowane stanowisko pomiarowe umożliwiające wyznaczenie zależności pojemności elektrycznej i energetycznej układu zasilania od czynników środowiskowych oraz czasu i prądu rozładowania w kontrolowanych warunkach. Schemat poglądowy stanowiska przedstawiono na rys.2.

Do wyznaczenia pojemności pakietu akumulatorów Li-FePO₄ użyto obciążenia elektronicznego PPL-8613C3 umożliwiającego rozładowywanie pakietu akumulatorów stałym prądem w wymaganym czasie i możliwością regulacji wartości prądu rozładowania. Podczas testowego rozładowania pakietu akumulatorów, pomiarowi i rejestracji podlegały: prąd rozładowania, napięcia na wyjściu pakietu akumulatorów oraz wartości temperatur panujących wewnątrz i na zewnątrz układu. Do pomiaru temperatury wykorzystywano termopary typu J i K.



Rys.2. Schematy stanowiska pomiarowego do badania: (a) pakietu akumulatorów i (b) pakietu akumulatorów z przetwornicą DC/DC

Elektroniczne obciążenie umożliwiało utrzymanie stałego prądu rozładowania aż do osiągnięcia końcowego napięcia rozładowania. Procesem pomiarowym sterował program komputerowy napisany w środowisku LabView. Do badania samego pakietu akumulatorów korzystano ze schematu podanego na rys.2a natomiast po podłączeniu na wyjściu pakietu przetwornicy DC/DC badania prowadzono w układzie jak na rys. 2b.

Podczas badań w warunkach ograniczonej wymiany ciepła z otoczeniem badany układ umieszczany był w obudowach izolowanych cieplnie charakteryzujących się różnymi współczynnikami przewodności cieplnej.

Przed rozpoczęciem pomiarów, pakiet każdorazowo był ładowany w sposób zalecany przez producenta tzw. prądem jednogodzinnym za pomocą ładowarki dedykowanej o napięciu 14,6 V i prądzie 5 A. Przeprowadzone pomiary uwzględniały cztery podstawowe zagadnienia:

- 1) Badanie procesu rozładowania pakietu akumulatorów w temperaturze pokojowej (dla różnych prądów rozładowania).
- 2) Badanie procesu rozładowania pakietu akumulatorów z przetwornicą DC/DC w temperaturze pokojowej.
- 3) Badanie jak w pkt. 1) i 2) ale w warunkach utrudnionej wymiany ciepła (w obudowie).
- 4) Badanie jak w pkt. 1) w różnych temperaturach (w komorze klimatycznej w co najmniej 2 różnych skrajnych temperaturach i przy 2 różnych prądach rozładowania).

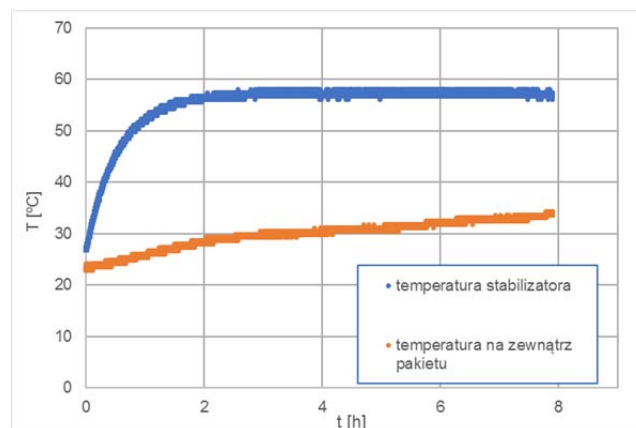
Ad 1.2. Rozładowanie w temperaturze pokojowej

Badania w temperaturze pokojowej przeprowadzono dla 2 różnych prądów rozładowania utrzymywanych na stałym poziomie przez cały czas trwania pomiarów. Wybrano wartości prądu równe 0,1C (0,1·5000=500 mA) i 1C

(1·5000=5000 mA). Proces rozładowania został zakończony w momencie, kiedy układ zabezpieczający pakiet wykrył uzyskanie końcowego napięcia rozładowania. Dla prądu 500 mA, proces rozładowania pakietu trwał ok. 10 godzin a rzeczywista uzyskana pojemność elektryczna wyniosła 5,2 Ah przy pojemności energetycznej 67,3 Wh. Należy zauważyć, że czas rozładowania trwał 10 godzin a więc 2,5 razy dłużej niż wymagany czas pracy miernika. Następnie przeprowadzono badania układu pakietu akumulatorów z podłączoną na wyjściu przetwornicą DC/DC stabilizującą napięcie na poziomie 12 V. W tym przypadku proces rozładowania pakietu trwał ok. 8 godzin a więc i tak 2 razy dłużej niż wymagany czas pracy miernika. Uzyskana przy tym rzeczywista pojemność elektryczna układu wyniosła 4,0 Ah przy pojemności energetycznej 48,0 Wh. Dla prądu rozładowania 5 A w temperaturze pokojowej bez utrudnionych warunków wymiany ciepła i bez przetwornicy DC/DC uzyskano pojemności odpowiednio 5,1 Ah i 60 Wh. W obu przypadkach zaobserwowano wzrost temperatury pakietu o około 10°C.

Ad. 3 Rozładowanie w warunkach utrudnionej wymiany ciepła

Pomiary wykonano podczas kontrolowanego rozładowania pakietu akumulatorów w obudowie styropianowej symulującej utrudnioną wymianę ciepła z otoczeniem. Oprócz pomiaru czasu rozładowania, napięcia na zaciskach układu i prądu rozładowania mierzono temperaturę: wewnątrz i na zewnątrz pakietu oraz w przypadku układu z stabilizatorem na zewnątrz pakietu i na zewnątrz stabilizatora. Przy rozładowaniu prądem 500 mA, uzyskane pojemności elektryczna i energetyczna wynosiły odpowiednio 5,2 Ah i 66,8 Wh. Pomimo utrudnienia oddawania ciepła, nie zaobserwowano istotnych różnic w rozładach temperatur. Przy obciążeniu przetwornicą DC/DC uzyskane pojemności wynosiły, 4,0 Ah i 48,1 Wh. Zaobserwowano wzrost temperatury przetwornicy DC/DC w stosunku do temperatury na zewnątrz pakietu akumulatorów osiągnął ponad 20°C różnicy (rys.3).

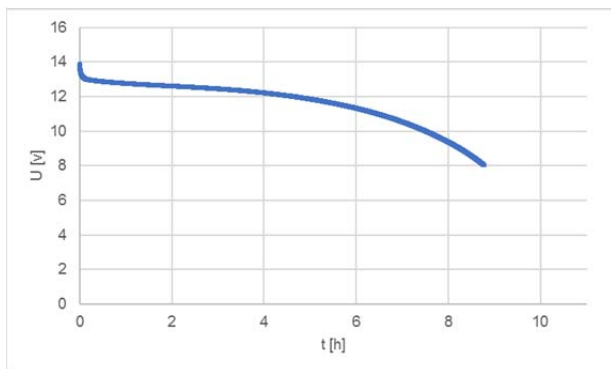


Rys.3. Przyrost zmian temperatury podczas rozładowania pakietu z przetwornicą DC/DC w obudowie styropianowej

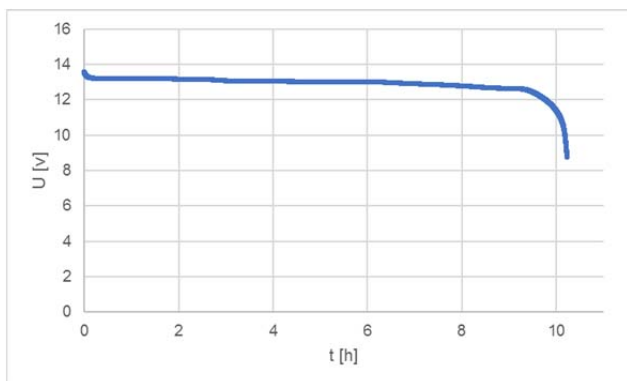
Ad. 4. Rozładowanie w komorze klimatycznej

Badania w komorze klimatycznej prowadzone były dla dwóch temperatur -20°C i $+45^{\circ}\text{C}$. W przypadku rozładowania w temperaturze -20°C prądem o wartości 500 mA uzyskano pojemności elektryczną i energetyczną odpowiednio 4,4 Ah i 51,1 Wh. Zwiększenie prądu rozładowania do 5 A spowodowało spadek pojemności energetycznej do wartości 45,5 Wh, przy niezmienniej pojemności elektrycznej. Przykładowa zmienność napięcia na wyjściu baterii przedstawiona jest na rys. 4.

Przy temperaturze 45°C i prądzie rozładowania 500 mA stwierdzono jedynie podwyższenie obydwu pojemności do wartości odpowiednio 5,1 Ah i 66,1 Wh przy znacznie mniejszym spadku napięcia w funkcji czasu (rys. 5).



Rys.4. Przebieg napięcia na wyjściu układu podczas rozładowania pakietu prądem 500mA w komorze klimatycznej w temperaturze -20°C



Rys.5. Przebieg napięcia na wyjściu układu podczas rozładowania pakietu prądem 500mA w komorze klimatycznej w temperaturze 45°C

Prowadzone badania ładowania pakietów wykazały, że czas całkowitego ponownego naładowania wynosi 1,2 h zaś towarzyszący temu wzrost temperatury jest na poziomie 15°C. Badania przeprowadzono przy utrudnionej wymianie ciepła. Uzupełnieniem prowadzonych badań było określenie współczynnika samorozładowania pakietu w okresie 1 i 2 tygodni. Średnia wartość współczynnika nie przekraczała 1,5 %.

3. Podsumowanie

Przeprowadzone badania potwierdziły trafność dokonanego wyboru pakietu akumulatorów zarówno, jeżeli chodzi o wartości deklarowanych pojemności jak i odporność na zmienne temperatury pracy. Stwierdzono

jednak, że zmniejszenie pojemności elektrycznej akumulatorów w ujemnych temperaturach jest mniejsze niż zakładano. Podczas obliczania pojemności akumulatora zgodnie z wzorem (1) przyjęto, że stosunek pojemności elektrycznej akumulatora w minimalnej temperaturze pracy miernika (-20°C) do pojemności elektrycznej znamionowej akumulatora wyniesie 0,6 tymczasem w czasie badań w komorze klimatycznej okazało się, że ten współczynnik dla akumulatora Li-FePO₄ wynosi 0,85. Mniejsza redukcja pojemności elektrycznej w temperaturze ujemnej sprawia, że obliczoną pojemność pakietu akumulatorów można zmniejszyć z 5 Ah do 3,20 Ah. W badaniach wytrzymałości na rozładowanie pakietu akumulatorów uzyskane pojemności wahały się od 5,2 Ah dla prądu rozładowania 0,5 A do 5,1 Ah dla prądu rozładowania 5 A. W obu przypadkach pakiet nie był izolowany termicznie. Dołączenie przetwornicy DC/DC zmniejszyło wyznaczoną pojemność do poziomu 4 Ah. Badania temperaturowe wykazały istotny wpływ ujemnych temperatur na sprawność układu zasilacza, obrazowało się to spadkiem pojemności o ok. 14 %. Tym niemniej przyjęte na początku projektu wymagania zostały w pełni spełnione i można uznać, że zaprojektowany zasilacz zapewni bezawaryjną pracę miernika przez więcej niż wymagane 4 godziny.

Autorzy: mgr inż. Piotr Paziewski, Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Systemów Elektronicznych, ul. Gen. W. Urbanowicza 2, 00-908 Warszawa, E-mail: Piotr.Paziewski@wat.edu.pl; dr hab. inż. Zbigniew Watral, Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Systemów Elektronicznych, ul. Gen. W. Urbanowicza 2, 00-908 Warszawa, E-mail: Zbigniew.Watral@wat.edu.pl; prof. dr hab. inż. Andrzej Michalski, Politechnika Warszawska, Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Systemów Informacyjno Pomiarowych, pl. Politechniki 1, 00-661 Warszawa, E-mail: anmi@iem.pw.edu.pl

LITERATURA

- [1] Bednarek K., Bugała A., Własności użytkowe akumulatorów kwasowo-ołowiowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 79 (2017), nr.4, 47-60.
- [2] Hutchinson R., Temperature effects on sealed lead acid batteries and charging techniques to prolong cycle life. *SANDIA REPORT*, SAND2004-3149, Unlimited Release, Printed June 2004, pp 16.
- [3] Pistoia G., *Lithium-Ion Batteries Advances and Applications*, Elsevier, 2014, pp.664.
- [4] Glaize. C., Geniès S., *Lithium Batteries and Other Electrochemical Storage Systems*, 2013, pp.354.
- [5] Kasprzyk L., Bednarek K., Elektromagnetyzm a zagrożenia gromadzenia energii, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 nr 12/2014, 221 – 224.
- [6] Bednarek K., Kasprzyk L., Zasobniki energii w systemach, elektrycznych. Część II - Analizy porównawcze i aplikacje, *Poznań University of Technology Academic Journals, Electrical Engineering*, nr 69, 2012, 209 – 218.