

Marcin MARCINEK

TESTOWANIE IMPULSOWEJ ŁADOWARKI SOLARNEJ: BUDOWA ORAZ WŁAŚCIWOŚCI

STRESZCZENIE *W poniższym artykule przedstawiono aplikacyjne rozwiązanie solarnej ładowarki akumulatorów Li-Ion. Opisane zostały dostępne tryby ładowania, sposób poszukiwania maksymalnego punktu mocy, sposób generowania sygnału sterującego tranzystorem oraz wpływu doboru indukcyjności na pracę układu. Zaprezentowane zostały podstawowe charakterystyki ładowarki.*

Słowa kluczowe: *ładowarka solarna, fotowoltaika, maksymalny punkt mocy*

1. WSTĘP

Obecnie na świecie produkowanych jest coraz więcej przenośnych urządzeń, które wymagają mobilnego układu zasilania. W urządzeniach tych, do zmagazynowania potrzebnej energii, wykorzystuje się różnego typu chemiczne akumulatory, których technologia produkcji wymaga odpowiednich, często mocno restrykcyjnych warunków ładowania. Coraz częściej stosowane są akumulatory Li-Ion; wypierają one zasadowe akumulatory typu NiCd i NiMH.

mgr inż. Marcinek MARCIN
e-mail: marcinek@zut.edu.pl

Katedra Elektroenergetyki i Napędów Elektrycznych
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

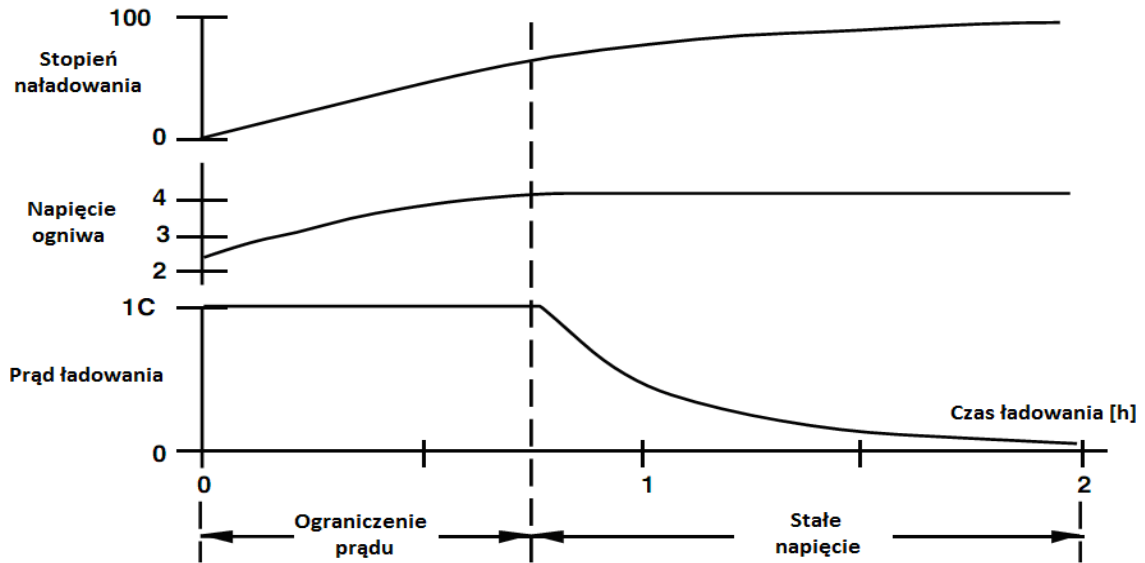
PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 246, 2010

Najważniejszą zaletą wymienionych wyżej akumulatorów jest brak efektu pamięciowego, ponadto ich napięcie jest proporcjonalne do zgromadzonego ładunku, dzięki temu łatwo można określić stan naładowania akumulatora [2, 3] (lub wyznaczyć początek i koniec cyklu ładowania).

Dużą niedogodnością mobilnego układu zasilania jest konieczność doładowywania akumulatorów. Proponowane rozwiązania służące do ładowania chemicznych akumulatorów najczęściej zależne są od zasilania z sieci elektroenergetycznej. Przedstawiony układ ładowania pobiera energię z ogniw fotowoltaicznych. Typowo zakres mocy potrzebnej do naładowania akumulatorów małej pojemności, które mogą zasilać urządzenia przenośne codziennego użytku (między innymi telefony komórkowe, odtwarzacze MP3 itp.) znajduje się w przedziale od kilku do kilkunastu watów, w związku z tym istnieje szansa, iż na terenie Polski rozwiązanie solarne mogłoby znaleźć praktyczne zastosowanie. Badania wykonane na stanowisku testowym ładowarki, dotyczą uzyskiwanej wartości sprawności, otrzymywanych mocy w funkcji natężenia napromienienia panelu oraz wpływu doboru wartości elementów przetwornicy na warunki ładowania i zdolność poszukiwania maksimum mocy.

Chemiczne ogniwa typu Li-Ion wymagają ściśle określonych warunków ładowania, jednakże algorytm ładowania akumulatorów nie jest zbyt skomplikowany. Najważniejsze jest to aby nie przekraczać charakterystycznego dla tej grupy akumulatorów (Li-Ion) krytycznego napięcia ogniwa, którego wartość w przypadku ogniw litowo-jonowych wynosi 4,2 V oraz maksymalnego natężenia prądu o wartości 1 C [1]. Wyrażenie w „C” ułatwia analizę prądów ładowania i rozładowywania, wiążąc je z pojemnością baterii. Prąd 1 C oznacza, że akumulator jest ładowany bądź rozładowywany nominalnym prądem. Dla akumulatora o pojemności $C = 1600 \text{ mAh}$ prąd 1 C wynosi 1600 mA, a prąd 0,1 C wynosi 160 mA [2].

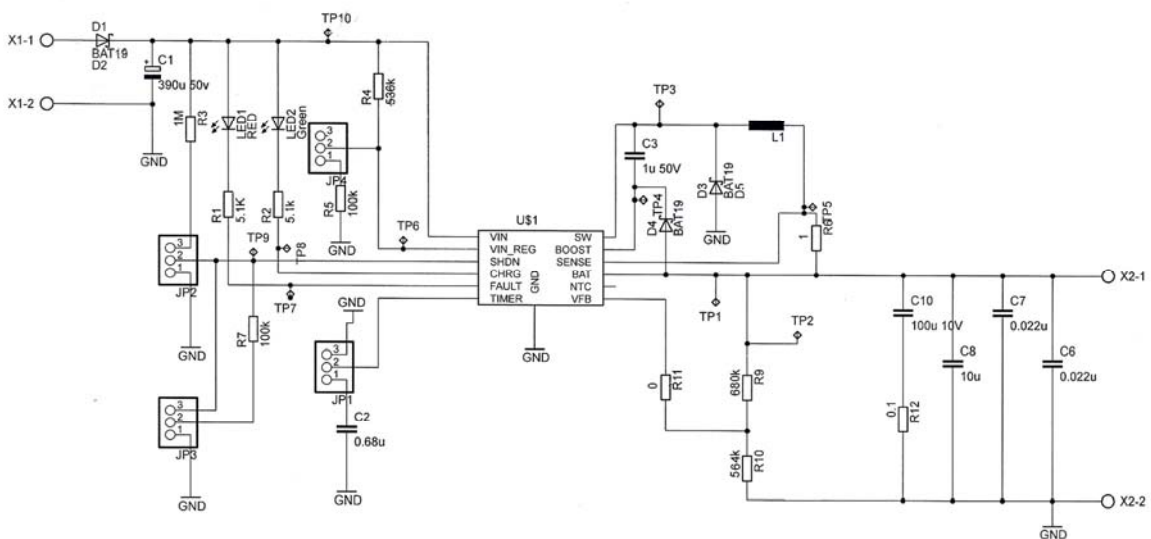
Czas ładowania można podzielić na dwa okresy: pierwszy to czas, kiedy akumulator ładowany jest stałym prądem nieprzekraczającym 1 C. Proces ten realizowany jest do osiągnięcia napięcia 4,2 V w odniesieniu do jednego ogniwa. Po tym czasie poziom naładowania akumulatora można oszacować na około 65%. Dalsze ładowanie baterii polega na utrzymywaniu stałej wartości napięcia (na poziomie 4,2 V) w odniesieniu do jednego ogniwa akumulatora i wraz ze wzrostem poziomu naładowania powolnym obniżaniu wartości natężenia prądu. Zmiany poszczególnych parametrów elektrycznych oraz stopień naładowania ogniwa w funkcji czasu zaprezentowane są na rysunku 1.



Rys. 1. Przebieg czasowy ładowania akumulatora Li-Ion [1]

2. ŁADOWARKA – BUDOWA, WŁAŚCIWOŚCI, FUNKCJE

LT3652 jest scalona ładowarka akumulatorów Li-Ion (rysunek 2 przedstawia schemat ideowy modelu testowego), o maksymalnym (zewnętrznie programowalnym) prądzie ładowania 2 A, i wymaganym napięciu zasilającym się w przedziale 4,95 V do 32 V. Dzięki programowalnemu sprzężeniu zwrotnemu możliwe jest ładowanie baterii o napięciach do 14,4 V.



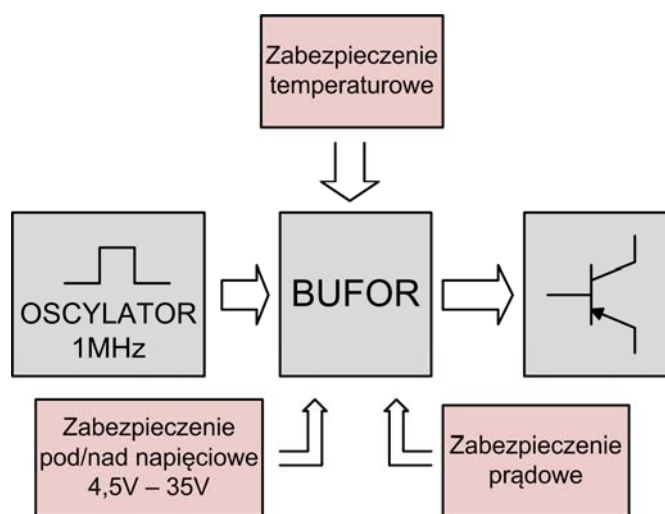
Rys. 2. Schemat ideowy modelu prototypowego

Urządzenie posiada dwa zewnętrznie nastawialne tryby ładowania, ponadto ładowarka przy pomocy prostego algorytmu jest w stanie wyznaczyć maksymalny punkt mocy (MPP – maximum power point) ogniwa fotowoltaicznego.

2.1. Zabezpieczenie sygnału sterującego

Głównym zadaniem ładowarki jest wypracowywanie odpowiedniej do stanu naładowania i temperatury akumulatora wartości natężenia prądu ładującego. Częścią wykonawczą ładowarki jest wewnętrzny tranzystor przygotowany do pracy w układzie obniżającym napięcie (buck). Sygnał sterujący wypracowywany jest przez wewnętrzny generator, który oscyluje z częstotliwością 1 MHz [6].

Ładowarka posiada szereg zabezpieczeń, które bezpośrednio wpływają na sygnał sterujący tranzystorem.



Rys. 3. Sygnał sterujący wraz z wpływającymi na niego zabezpieczeniami

W ładowarce przewidziane są trzy główne zabezpieczenia [6]: pod/nad napięciowe, prądowe oraz termiczne. Zabezpieczenie termiczne pozwala na pracę ładowarki przy temperaturze baterii zawierającej się w przedziale 0°C - 40°C . Zabezpieczenie prądowe ogranicza maksymalny prąd ładowania, zadziałanie tego zabezpieczenia ma również miejsce w przypadku pracy w trybie 0,1 C, czyli w sytuacji naładowania (podtrzymania) baterii. Zabezpieczenie pod/nad napięciowe pilnuje aby badane urządzenie pracowało w przypadku gdy napięcie zasilania zawiera się w przedziale 4,5-30 V.

2.2. Wybór trybów ładowania

Ładowarka posiada dwa zewnętrznie nastawialne tryby pracy. Pierwszym z nich jest tryb, w którym ładowanie odbywa się w stałym okresie czasu. Ustawienie tego trybu realizowane jest przy użyciu zewnętrznego kondensatora, którego wartość dobierana jest, przy pomocy wzoru zawartego w nocie katalogowej [6]. Użycie kondensatora o wartości podanej przez producenta, zapewnia czas ładowania wynoszący około trzech godzin. Proces ładowania może być zatrzymany w dwóch przypadkach: po zaplanowanym czasie, kiedy akumulator zostanie naładowany. W drugim przypadku, kiedy po upływie $1/8$ zadanego czasu na baterii nie zostanie przekroczone napięcie progowe.

Drugi z trybów ustawiany jest przez zwarcie wyprowadzenia Timer do masy, producent nazywa go C/10. Nazwa tego trybu wynika z faktu, iż proces ładowania wyłączany jest w przypadku, gdy prąd ładowania spadnie poniżej $1/10$ prądu nominalnego. Podczas normalnej pracy układ ładuje akumulatory nominalnym prądem (1 C), w momencie kiedy napięcie baterii na jednym ogniwie osiągnie napięcie 4,2 V ładowarka przechodzi w stan podtrzymywania tego napięcia, zmniejszając prąd ładowania (rys. 1). Zatrzymanie pracy ładowarki (procesu ładowania) następuje przy wyżej wymienionej wartości prądu progowego (0,1 C).

Bezpośrednio z trybami ładowania powiązana jest komunikacja z użytkownikiem. Ładowarka wyposażona jest w dwa cyfrowe wyprowadzenia komunikacyjne. W badanej aplikacji komunikacja odbywa się przy użyciu dwóch diod LED, ładowanie sygnalizowane jest przez zieloną diodę podłączoną do wyprowadzenia „CHARGE”, błąd sygnalizowany jest czerwoną diodą podłączoną do wyprowadzenia „FAULT”. Poprawne zakończenie procesu ładowania sygnalizowane jest zgaszeniem diod.

2.3. Dobór elementów ładowarki

W warunkach laboratoryjnych wykonany został prototypowy model ładowarki. Do realizacji praktycznej użyto schematu ideowego zaczerpniętego z noty aplikacyjnej [7], który zamieszczony jest na rysunku 2. W trakcie projektowania konieczne było wykonanie obliczeń wartości poszczególnych elementów przetwornicy. Sam dobór topologii przetwornicy podyktowany jest koniecznością dostosowania napięcia ładowania do zasilania ładowarki, które jest na poziomie 12 V, a więc konieczne jest skonfigurowanie układu obniżającego napięcie. Posługując się notą katalogową [6], użytkownik powinien wyznaczyć wartości elementów wchodzących w skład przetwornicy: rezystora pomiarowego, diody zwrotnej oraz dławika wyjściowego.

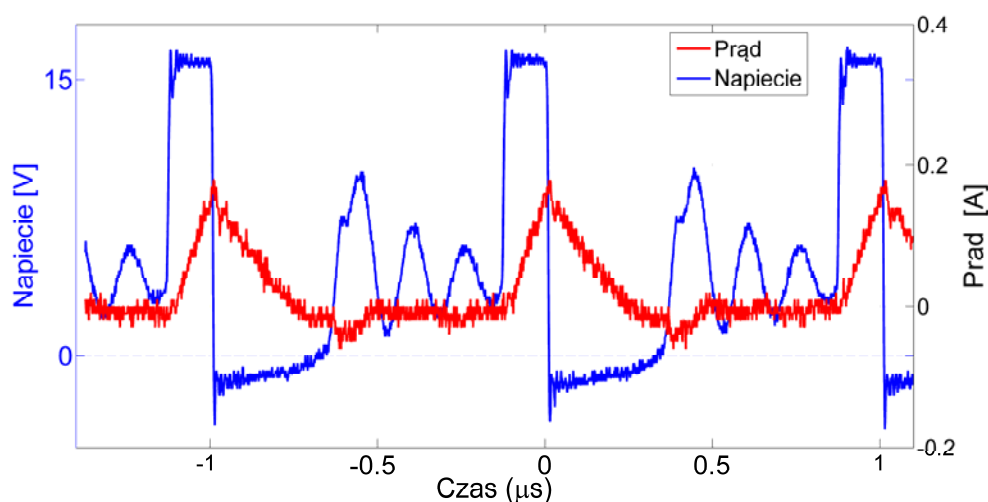
Jednym z ważniejszych zagadnień dotyczących doboru elementów jest dobór wartości indukcyjności dławika, która dobierana jest przy użyciu wzoru (1) zamieszczonego w nocie katalogowej [6].

$$L = \frac{10 \cdot R_{sense}}{I_{max_pul}} \cdot V_{bat} \cdot \left[1 - \frac{V_{bat}}{V_{in_max}} \right] \quad (1)$$

gdzie:

- I_{max_pul} – maksymalny prąd pulsacji,
- V_{bat} – napięcie baterii,
- V_{in_max} – maksymalne napięcie wejściowe,
- R_{sense} – rezystancja pomiarowa (pomiar natężenia prądu).

Podczas realizacji praktycznej indukcyjność została dobrana w taki sposób, aby wartość pulsacji prądu ładującego nie przekroczyła 30 procent wartości średniej. Producent podaje dopuszczalny przedział wartości pulsacji [5], która powinna zawierać się w pomiędzy 25-35 procent I_{max_pul} . Do obliczeń przyjęto: napięcie baterii V_{bat} wynoszące 8,3 V, maksymalne napięcie zasilania V_{in_max} na poziomie 20 V. Wyznaczona wartość indukcyjności L wynosi około 160 μH .



Rys. 4. Przebiegi prądu (mierzone na wejściu dławika $L1$) oraz napięcia (pomiędzy punktem TP3 a GND) dla indukcyjności 8 μH

Niepoprawnie dobrana wartość indukcyjności dławika skutkuje pracą przetwornicy w trybie nieciągłego prądu (DCM – discontinuous conduction mode) oraz obniżeniem sprawności. Uzyskane przebiegi w trybie DCM dla indukcyjności 8 μH przedstawione są na rysunku 4. Przedstawiony okres można podzielić na trzy etapy:

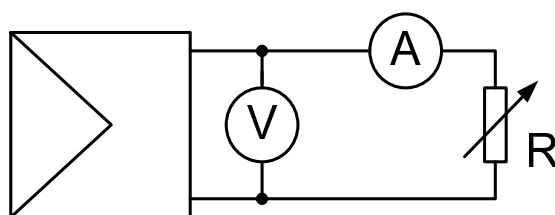
- stan przewodzenia tranzystora,
- stan zaporowy, w którym tranzystor nie przewodzi, prąd zmagazynowany w dławiku L1 rozładowywany jest przez diodę D3,
- stan etap rozpoczyna się w momencie, kiedy cała energia dławika zostaje oddana – pojawiają się charakterystyczne tętnienia napięcia związane z rezonansem pomiędzy indukcyjnością L1 i pojemnościami pasorzytniczymi.

3. WYNIKI BADAŃ NA STANOWISKU TESTOWYM

Przed przeprowadzeniem badań na modelu ładowarki, wykonano badania mające na celu wyznaczenie charakterystyk fotoogniwa. A następnie porównano otrzymane wyniki z wynikami uzyskanymi podczas badania ładowarki.

3.1. Badanie fotoogniwa SOLTEC

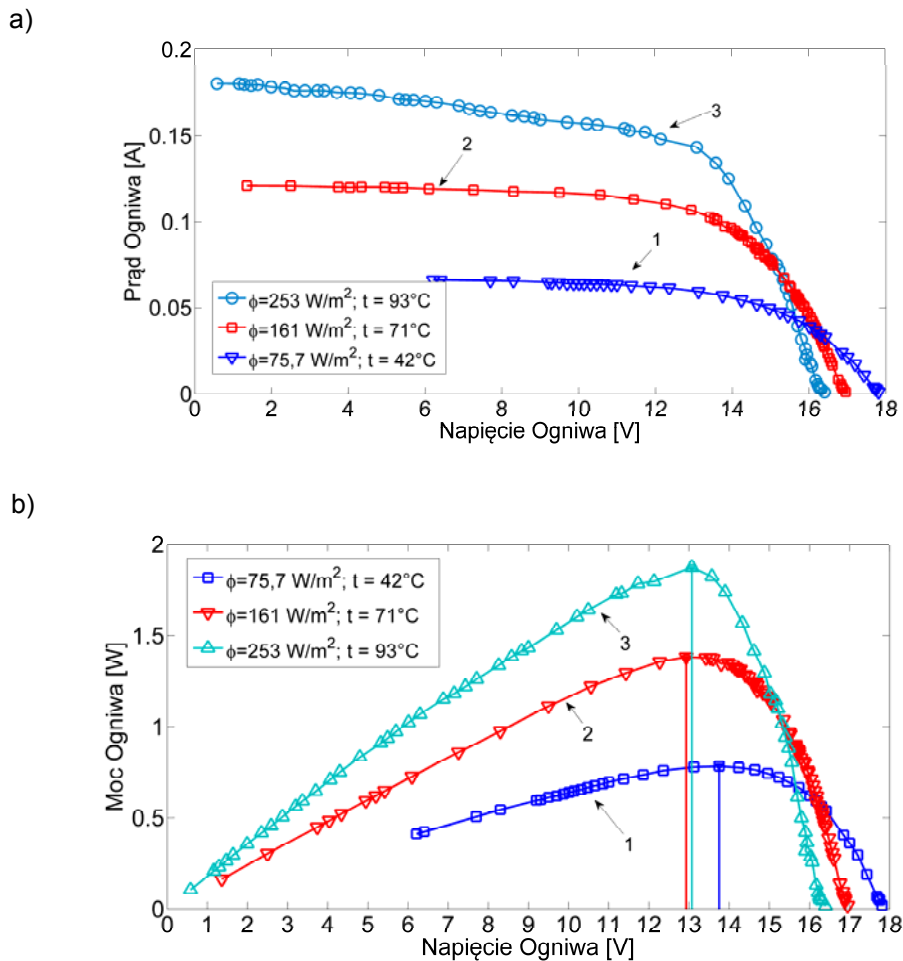
W celu wyznaczenia charakterystyk ogniwa SLE S5 przygotowano układ jak na schemacie poniżej:



Rys. 5. Schemat ideowy układu do wyznaczenia charakterystyk ogniwa fotowoltaicznego

Do zmiany obciążenia R wykorzystany był dekadowy rezystor o maksymalnej wartości rezystancji $16\text{ k}\Omega$.

Badania wykonano dla trzech wartości współczynnika napromienienia. Zmianę współczynnika napromienienia, symulowano poprzez zmianę wysokości, na której zamocowano lampę, w wyniku, czego otrzymywano również zmianę temperatury fotoogniwa. Na rysunkach 6a i 6b znajdują się wyniki badań.



Rys.6. Wyniki otrzymanych badań:

a) charakterystyka napięciowo – prądowa, b) napięciowo – mocowa

Na charakterystyce znajdującej się na rysunku 6b zaznaczono punkty MPP ogniwa oraz napięcia, przy których te punkty występują.

TABELA 1

Napięcia, przy których uzyskano maksimum mocy fotoogniwa

Krzywa nr:	1	2	3
V_{MPP} [V]	13,75	12,93	13,07

3.2. Wyznaczanie maksimum mocy LT3652

Dysponując wcześniej wyznaczonymi charakterystykami panelu, przystąpiono do zbadania jednej z funkcji ładowarki, jaką jest wyznaczenie punktu maksymalnej mocy.

TABELA 2

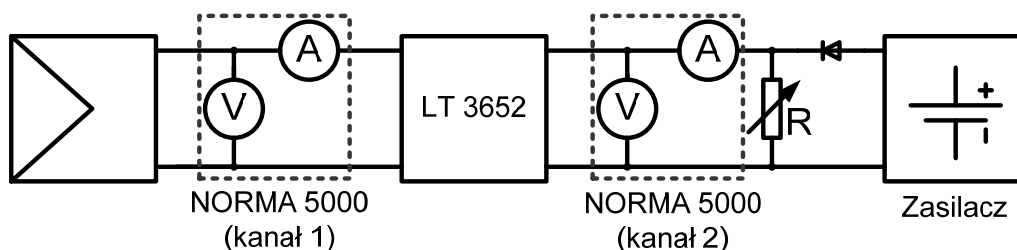
Wyznaczone przez ładowarkę wartości MPP

Lp.	Współczynnik napromienienia [W/m ²]	V_{bat} [V]	Ustawione MPP [V]	V_{MPP} [V]
1	75,7	7,3	13,75	13,8
2	161			16,1
3	253			16,64

Pomiary zostały wykonane przy użyciu analizatora mocy NORMA 5000. Wykonano je dla trzech wartości współczynnika napromienienia (w układzie jak na rys. 7). Dla pierwszej krzywej, MPP znajduje się przy napięciu 13,8 V i jest bliskie maksymalnej wartości odczytanej z testowej charakterystyki panelu. Natomiast dla drugiej i trzeciej wartości współczynnika napromienienia, otrzymane wyniki są znacznie oddalone od wyznaczonych wartości MPP (tab. 2). Zjawisko to jest konsekwencją uproszczenia algorytmu wyszukiwania punktu maksimum mocy. Przy zmieniającym się współczynniku napromienienia układ nie potrafi optymalnie wyznaczyć nowego MPP. W zmieniających się warunkach, chcąc zapewnić pracę w punkcie maksimum mocy, konieczna jest zewnętrzna korekcja układu.

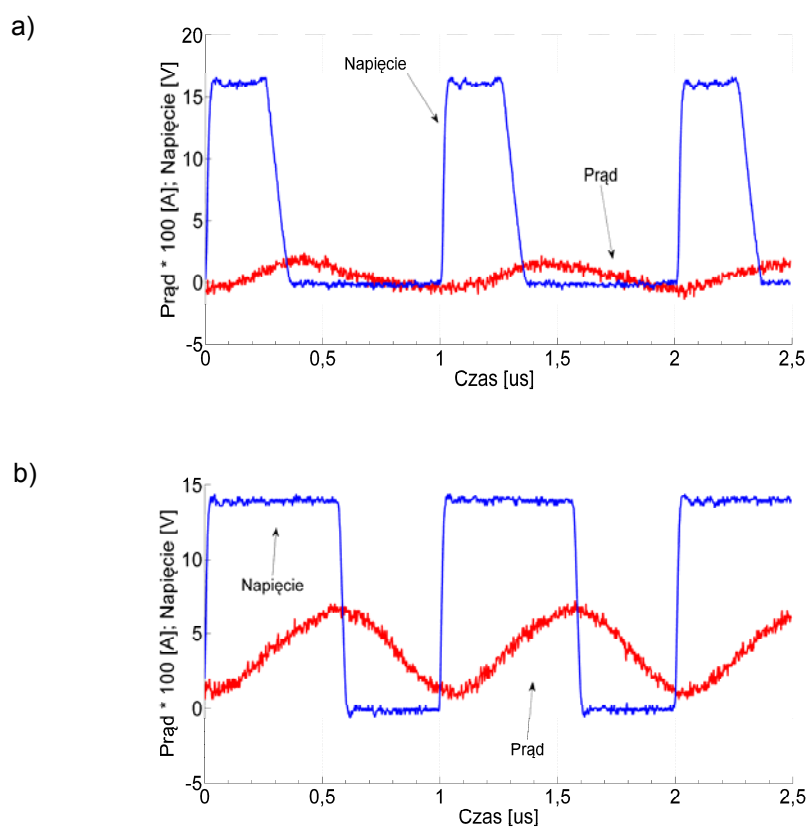
3.3. Sprawność układu

Sprawność układu jest jednym z najważniejszych parametrów, przekształtników energii. Fotoogniwa obecnie cechują się sprawnością na poziomie około 12-14% [5], dlatego ważne jest, aby energia przekształcana była z możliwie jak najmniejszymi stratami. Układ, w jakim badano omawiany parametr przedstawiony jest na rysunku poniżej.

**Rys. 7. Przebieg czasowy ładowania akumulatora Li-Ion [1]**

Stanowisko pomiarowe zbudowane zostało z omawianego fotoogniwa, ładowarki oraz układu obciążenia. Jako obciążenie wykorzystano zasilacz la-

boratoryjny, rezystor i diodę. Zmieniając napięcie na zasilaczu zmieniano teoretyczny punkt pracy baterii (ładowarka ustawiona była do ładowania 2 ogniw). Testowano dla trzech poziomów naładowania baterii (głęboko rozładowanej, będącej w początkowej fazie ładowania oraz znajdującej się blisko stanu ładowania - 0,1 C) i dla trzech wartości współczynnika napromienienia. Przebiegi prądu i napięcia dla stanu głęboko rozładowanej baterii i stanu ładowania 0,1 C przedstawione są na poniższych rysunkach.



Rys. 8. Napięcie i prąd ładowania:

a) naładowanie baterii na poziomie 5,2 V, b) poziom naładowania baterii 7,8 V

Posługując się powyższymi rysunkami zauważyć można różnice w poziomach napięć oraz różne czasy załączenia tranzystora. Zmienne wypełnienie powiązane jest z impulsowym charakterem pracy, im dłuższy impuls tym napięcie na kondensatorach wyjściowych jest większe. Zmienność wypełnienia powiązana jest z poziomem naładowania baterii w taki sposób, że im wyższe napięcie baterii tym większe wypełnienie (rys. 8b).

Różną wielkość poziomów napięć widoczną na rysunkach 8a i 8b można spróbować wytłumaczyć posługując się charakterystyką z rysunku 6a. Rysu-

nek 8a przedstawia pracę w trybie ograniczenia prądu (0,1 C), rysunek 8b pracę podczas ładowania nominalnym prądem. Odczytując wyniki można zauważyć że przy mniejszym obciążeniu prądowym (rys. 8a), poziom napięcia na zaciskach wyjściowych fotoogniwa jest wyższy, a w przypadku, kiedy z ogniwa pobierany jest większy prąd (rys. 8b) napięcie na wyjściu znajduje się na niższym poziomie, zjawisko to związane jest z właściwościami fotoogniwa.

TABELA 3

Wyniki badań na stanowisku testowym

I_{wy} [mA]	U_{wy} [V]	P_{wy} [W]	I_{we} [mA]	U_{we} [V]	P_{we} [W]	n	Współczynnik napromienienia [W/m ²]
7,4	4,5	0,03	16,7	16,42	0,27	0,12	74,7
68,26	5,6	0,38	50,14	14,11	0,70	0,54	
42,31	7,8	0,33	49,77	14,17	0,70	0,47	
7,2	5,1	0,036	17,51	17,68	0,30	0,12	162
87,83	5,6	0,49	53,4	16,82	0,89	0,55	
78,95	7,8	0,61	65,28	16,37	1,06	0,58	
7,45	5,1	0,037	17,43	18,23	0,31	0,12	251
88,03	5,6	0,49	52,99	17,45	0,92	0,53	
79,1	7,8	0,61	62,11	17,36	1,07	0,57	

W tabeli 3 zestawiono wyniki przeprowadzonych badań, dane zostały odczytane przy użyciu analizatora mocy NORMA 5000. Do zapisu przebiegów prądów i napięć użyto cyfrowego oscyloskopu Tektronix TPS 2024. Wyznaczenie sprawności układu, otrzymywano poprzez porównanie mocy wyjściowej i wejściowej.

4. WNIOSKI

Analizując dane z tabeli 3 stwierdzić można, że sprawność układu nie zależy od tego czy ładowarka poprawnie wyznaczyła MPP, czy znajduje się poza maksymalnym punktem. Stwierdzono, że ładowarka nie wyznacza punktu maksymalnej mocy w sposób aktywny – praca w optymalnym punkcie wymaga zewnętrznej korekty wartości dzielnika Ponadto zaobserwować można niską wartość sprawności wynoszącą około 12 procent dla głęboko rozładowanej baterii. Spowodowane jest to tym, iż ładowarka włącza zabezpieczenie ograniczające prąd ładowania, ograniczając go do wartości 0,1 C, fakt ten zaobserwować można również na rysunku 8a.

Podstawowe funkcje takie jak tryby ładowania, komunikacja z użytkownikiem, działanie zabezpieczeń realizowane są w sposób podany przez producenta.

LITERATURA

1. Chesteer S.: National Semiconductor, „*Battery charging*” - www.national.com/appinfo/power/files/f7.pdf
2. Częstochoowski J.: „Akumulatory w praktyce elektronika NiCd, NiMH, Li- Jon”, Elektronika dla Wszystkich 2002
3. Esram T.; Chapman P. L.: „*Comparison of Photovoltaic Array Maximum power Point Tracking Techniques*”, IEEE Trans. on energy conversion, pp. vol.22, no 2, June, pp.439-449, (2007)
4. Hołub M., Balcerak M., Jakubowski T.: „*Topologie i sprawność przekształtników energoelektronicznych dla fotowoltaiki.*”, Wiadomości Elektrotechniczne, str. 24-30, 02/2010,
5. Jastrzębska G.: „*Odnawialne źródła energii i pojazdy proekologiczne*”, Wydawnictwa Naukowo Techniczne, Warszawa 2007
6. Nota katalogowa LT3652, <http://www.datasheet4u.com/download.php?id=667119> – data pobrania 13/07/2010
7. Nota aplikacyjna, cds.linear.com/docs/Reference%20Design/dc1568A.pdf – data pobrania 13/07/2010

Rękopis dostarczono dnia 11.05.2010 r.

Opiniował: dr hab. inż. Wojciech Jarzyna

TESTING OF PULSED SOLAR BATTERY CHARGER:
STRUCTURE AND PROPERTIES

Marcin MARCINEK

ABSTRACT *In this paper was given a solution of a solar lithium-ion battery charger. Described an available charging modes, way of the maximum power point detection and way of generate a control signal. In addition charger inductor value selection was investigated and the influence on charging process is depicted. Presented a basic a characteristic of the charger*



Mgr inż. Marcin MARCINEK w 2004 roku ukończył XIV Liceum Ogólnokształcące w Szczecinie. W 2009 roku ukończył studia na Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym w Szczecinie (dawniej Politechnika Szczecińska) oraz rozpoczął studia doktoranckie w dyscyplinie Elektrotechnika.