Paweł WIATR
Arkadiusz KRYŃSKI

UKŁAD ŁADOWANIA AKUMULATORÓW LITOWO-JONOWYCH ZASILANY Z PANELI FOTOWOLTAICZNYCH PRZEZNACZONY DLA POJAZDÓW ELEKTRYCZNYCH

STRESZCZENIE *W artykule przedstawiono opis układu regulatora ładowania akumulatorów litowo-jonowych zasilanego z paneli fotowoltaicznych dla pojazdów elektrycznych. Przedstawiono sposób działania układu, algorytm sterowania oraz wyniki badań eksperymentalnych.*

Słowa kluczowe: *regulator ładowania, fotowoltaika, samochody elektryczne*
DOI: 10.5604/00326216.1210801

1. WSTĘP

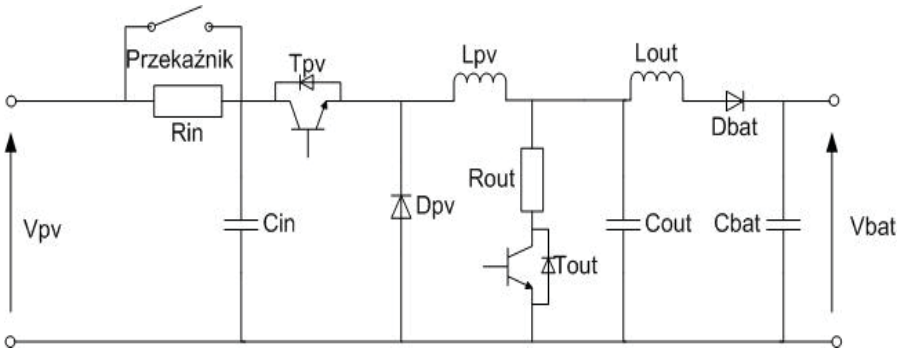
Wzrost zainteresowania problemami zanieczyszczenia środowiska, globalnego ocieplenia oraz możliwości wyczerpania paliw kopalnych, doprowadził do gwałtownego rozwoju odnawialnych źródeł energii.

Oczekiwany wzrost liczby samochodów elektrycznych, pociągnie za sobą konieczność zwiększenia liczby dostępnych stacji ładowania. Każda stacja stanowi dodatkowe obciążenie dla systemu energetycznego. W celu odciążenia sieci energetycznej, można zastosować rozwiązanie, w którym stacja ładowania wyposażona jest w układ ładowania zasilany bezpośrednio ze źródła energii odnawialnej na przykład z turbiny wiatrowej lub paneli fotowoltaicznych. W artykule przedstawiono koncepcję układu ładowania akumulatorów zasilanego z paneli fotowoltaicznych.

mgr inż. Paweł WIATR, inż. Arkadiusz KRYŃSKI
e-mail: [p.wiatr; a.krynski]@iel.waw.pl

Instytut Elektrotechniki, Zakład Napędów Elektrycznych,
ul. M. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa

2. ZASADA DZIAŁANIA REGULATORA

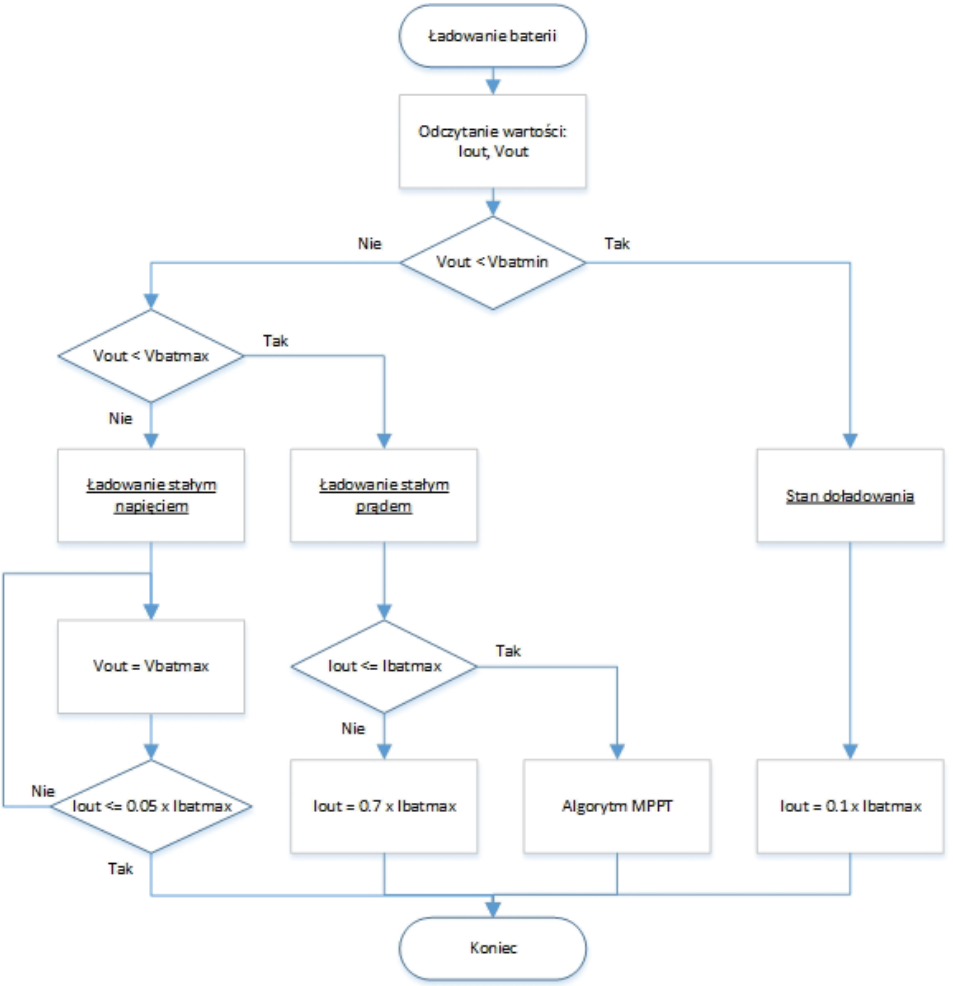


Rys. 1. Schemat obwodu silnoprądowego regulatora

Układ jest typową przetwornicą obniżającą napięcie (ang. *buck converter*) składającą się z elementów: tranzystor T_{pv}, dioda D_{pv}, dławik L_{pv}. Ze względu na impulsowy charakter prądu pobieranego przez przetwornicę obniżającą napięcie, na wejściu układu, na którego zaciskach występuje napięcie V_{pv}, zastosowano filtr pojemnościowy w postaci kondensatora C_{in}. Kondensator redukuje tętnienia napięcia wejściowego V_{pv} i zapewnia ciągłość prądu pobieranego z paneli fotowoltaicznych. Układ przekaźnika z rezystorem R_{in} jest wykorzystywany do łagodnego startu przetwornicy (*ang. soft-start*). W trakcie rozruchu przetwornicy przekaźnik jest rozłączony i układ zasilany jest z paneli przez szeregowy rezystor R_{in}, który zapewnia łagodne doładowywanie kondensatorów C_{in} i C_{out}. Zabezpieczenie przed prądem zwrotnym płynącym z akumulatora w stronę paneli stanowi dioda D_{bat}. Jest ona wykorzystywana również w trakcie łagodnego startu i zabezpiecza przed gwałtownym doładowaniem kondensatora C_{out} prądem z akumulatora. Szeregowe połączenie rezystora R_{out} z tranzystorem T_{out} tworzy układ rozładowania kondensatorów C_{in} i C_{out} po wyłączeniu regulatora ze względów bezpieczeństwa. Na wyjściu przetwornicy zastosowano filtr LCL, tworzony przez elementy L_{pv}, C_{out}, L_{out} oraz połączony równolegle z akumulatorem kondensator C_{bat}. Zastosowanie filtru LCL oraz kondensatora C_{bat} zapewnia obniżenie wartości tętnień prądu ładowania akumulatorów. Tętnienia prądu nie mają wpływu na parametry baterii jednak mają wpływ na parametry ładowania [1] i im większa wartość tętnień tym mniejszy procent pojemności akumulatora jest wykorzystywany [2].

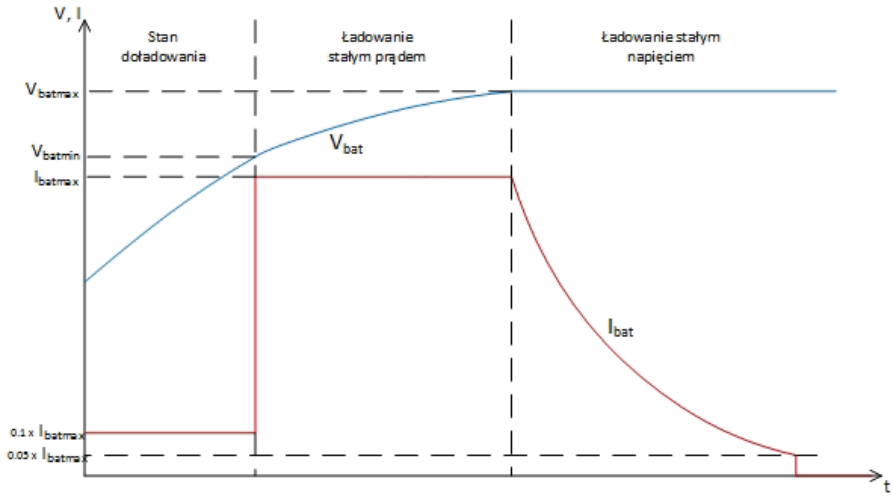
3. ALGORYTM STEROWANIA

Najczęściej stosowanym algorytmem ładowania jest ładowanie stałym prądem-napięciem (ang. *constant current – constant voltage, CC-CV*) [3]. Na rysunku 2 przedstawiono diagram algorytmu ładowania CC-CV przystosowany do pracy z zasilaniem z energii pochodzącej z paneli fotowoltaicznych.

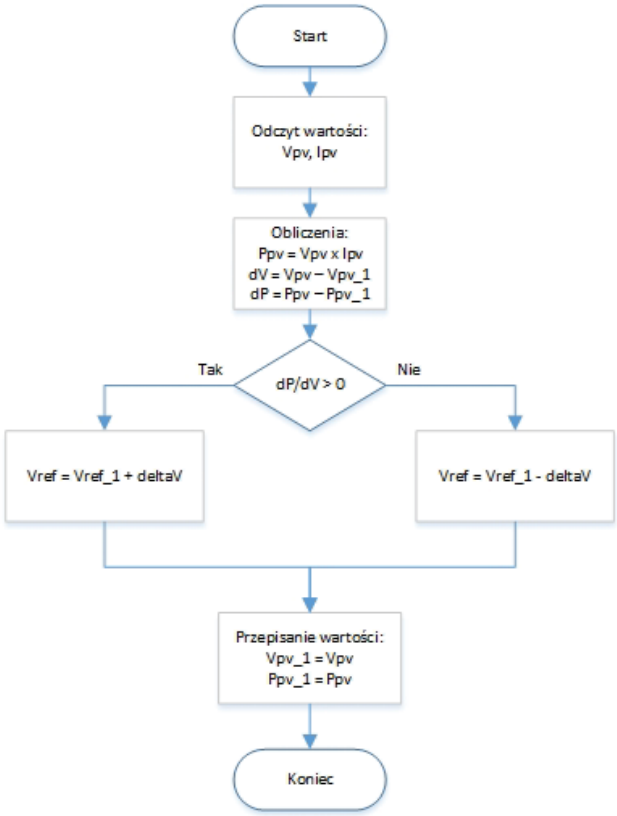


Rys. 2. Algorytm ładowania CC-CV

W przypadku, kiedy napięcie na akumulatorze V_{out} jest mniejsze od minimalnej dozwolonej wartości V_{batmin}, regulator przystępuje do ładowania prądem o wartości 10% maksymalnej wartości prądu ładowania I_{batmax} w celu przywrócenia normalnych parametrów akumulatora. Kiedy napięcie jest większe od napięcia V_{batmin} następuje stan ładowania stałym prądem. Wartość prądu zależy od aktualnie dostępnej mocy panelu foto-woltaicznego. Regulator zapewnia ograniczenie maksymalnego prądu ładowania I_{out} do 70% maksymalnego prądu ładowania baterii podanego przez producenta. Po osiągnięciu maksymalnego napięcia akumulatora, napięcie na baterii jest na tym maksymalnym poziomie do momentu, kiedy prąd ładowania spadnie poniżej 5% znamionowego prądu rozładowania akumulatorów (0,05 C), po czym następuje wyłączenie ładowania. Na rysunku 3 przedstawiono proces ładowania akumulatora według powyższego algorytmu.



Rys. 3. Proces ładowania akumulatora

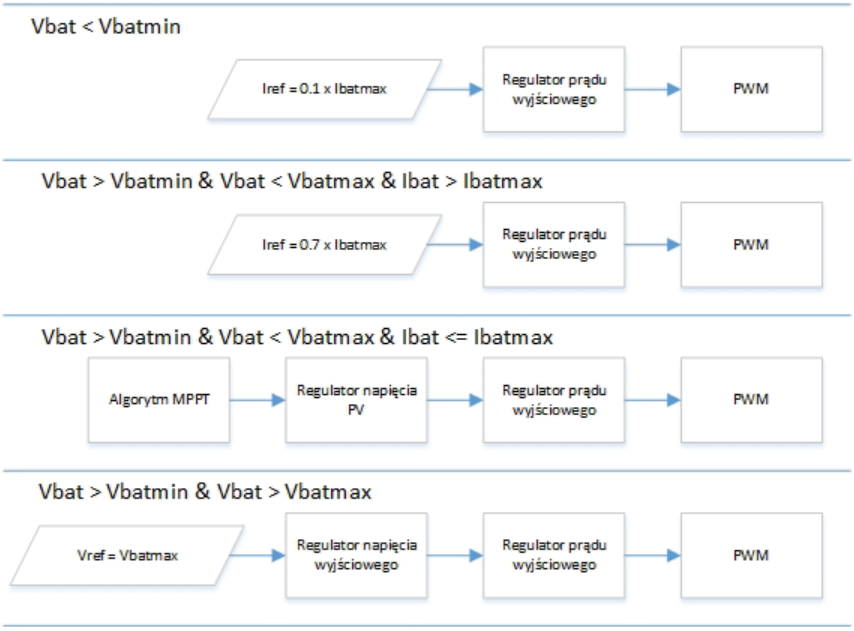


Rys. 4. Algorytm wyszukiwania punktu mocy maksymalnej P&O

Kolejnym algorytmem zaimplementowanym w regulatorze jest algorytm wyszukiwania punktu mocy maksymalnej (ang. *Maximum Power Point Tracking, MPPT*) panelu fotowoltaicznego. Jest to związane z nieliniową charakterystyką prądowo-napięciową panelu, która posiada punkt, w którym moc panelu jest maksymalna. Wyszukiwanie punktu mocy maksymalnej wykonuje się programując w sterowniku odpowiedni algorytm. Jego zadaniem jest ciągłe sprawdzanie mocy wyjściowej panelu i porównywanie go z poprzednio wykonanymi obliczeniami. W zależności od różnicy wartości w obecnej i poprzedniej iteracji algorytmu, układ ustala nowe warunki pracy tak, aby odnaleźć poszukiwany punkt na charakterystyce. Znanych jest obecnie wiele algorytmów zapewniających pracę w punkcie mocy maksymalnej (PMM) panelu fotowoltaicznego [4]. Jednym z nich jest algorytm „zaburz i obserwuj" (ang. *Perturb&Observe, P&O*) zaimplementowany w symulowanym układzie. Działanie tej metody wyszukiwania punktu mocy maksymalnej przedstawiono w postaci schematu blokowego na rysunku 4.

Po odczytaniu wartości napięcia V_{pv} oraz prądu I_{pv} pobieranego z panelu fotowoltaicznego układ cyfrowy dokonuje obliczeń aktualnej mocy panelu P_{pv}, przyrostów napięcia (*dV)* oraz mocy (*dP*) w stosunku do poprzedniego cyklu obliczeń. Na tej podstawie wyznaczana jest wartość napięcia referencyjnego V_{ref} dla regulatora napięcia panelu.

Stan naładowania akumulatorów determinuje strukturę pętli regulacji układu przekształtnikowego, która składa się z algorytmu MPPT, regulatora napięcia panelu PV, regulatora prądu ładowania oraz modulatora szerokości impulsów (ang. *Pulse Width Modulation, PWM*). Zadania w układzie dla wszystkich stanów ładowania baterii zobrazowano na rysunku 5.



Rys. 5. Metody regulacji dla różnych stanów ładowania akumulatora

4. FILTRACJA

Ze względu na impulsowy charakter pracy układu, mierzone wielkości napięcia i prądu posiadają duże tętnienia. Duże wartości tętnień i zakłóceń na mierzonych wartościach mogą prowadzić do nieprawidłowego działania algorytmów przedstawionych w poprzednim punkcie. Szczególnie wrażliwy jest algorytm wyszukiwania punktu mocy maksymalnej – MPPT. Duże odchyłki aktualnej wartości mierzonej od jej wartości średniej mogą spowodować nieprawidłowe określenie kierunku zmian mocy określanych za pomocą pochodnej *dP/dV*, co z kolei doprowadzi do błędnego działania algorytmu. Rozwiązaniem tego problemu jest filtracja mierzonych sygnałów napięcia i prądu. Praktycznym rozwiązaniem filtru, który ma niską złożoność obliczeniową, jest optymalny pod względem filtracji zakłóceń i czasu odpowiedzi filtr średniej kroczącej [5]. Filtr opisany jest równaniem:

$$y[i] = \frac{1}{M}\sum_{j=0}^{M-1} x[i+j] \tag{4.1}$$

gdzie:

y – sygnał wyjściowy filtru,
x – sygnał wejściowy,
M – liczba próbek do uśrednienia.

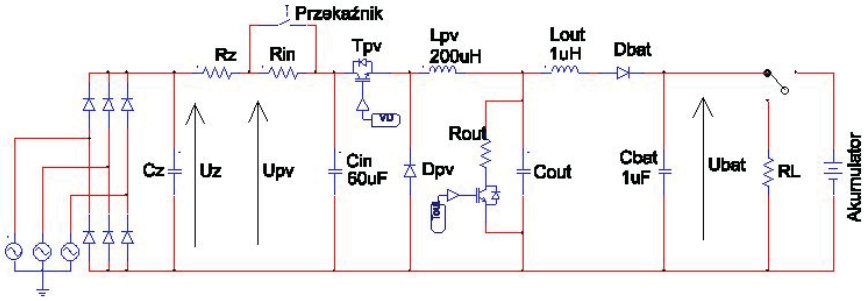
Eksperymenty wykonywane na modelu laboratoryjnym pozwoliły ustalić liczbę próbek do uśrednienia dla prądu wejściowego I_{pv} i wyjściowego mierzonego, jako wartość średnia prądu cewki I_{Lavg} na wartość $M = 9$. Liczba próbek do uśrednienia dla napięcia wejściowego V_{pv} i wyjściowego V_{bat} wynosiła $M = 6$. Zastosowanie filtru o tych parametrach zapewniło skuteczne wyszukiwanie punktu mocy maksymalnej źródła przy zapewnieniu odpowiedniej dynamiki układu w stanach dynamicznych i awaryjnych oraz nie wpłynęło negatywnie na przebiegi prądu i napięcia ładowania baterii.

5. WYNIKI BADAŃ LABORATORYJNYCH

Wyniki badań modelu laboratoryjnego zostały przeprowadzone w układzie przedstawionym na rysunku 6. Układ zasilany jest z napięcia sieciowego zadawanego przez autotransformator i prostowanego przez prostownik sześciopulsowy. Przyjęto częstotliwość łączeń 15 kHz.

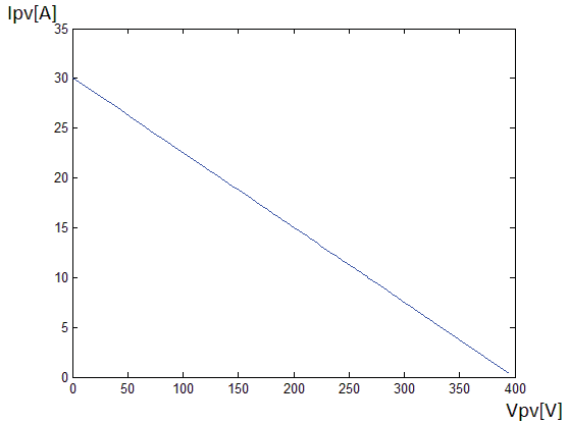
Prostownik z szeregowym rezystorem R_z, modeluje zachowanie źródła fotowoltaicznego. Charakterystyka prądowo – napięciowa oraz wykres mocy maksymalnej dostępnej mocy źródła w funkcji napięcia U_{pv} przedstawia rysunek 7.

Występowanie punktu maksymalnej mocy, umożliwiło przetestowanie działania algorytmu jego poszukiwania. Wyniki obrazujące działanie algorytmu MPPT zostały przedstawione na rysunkach 8 i 9. Widoczne są zmiany napięcia V_{pv} z 400 V na 200 V, czyli stan, przy którym układ zaczyna pracować w punkcie maksymalnej mocy. Rysunki 10 i 11 przedstawiają stan ładowania stałym prądem oraz stałym napięciem.

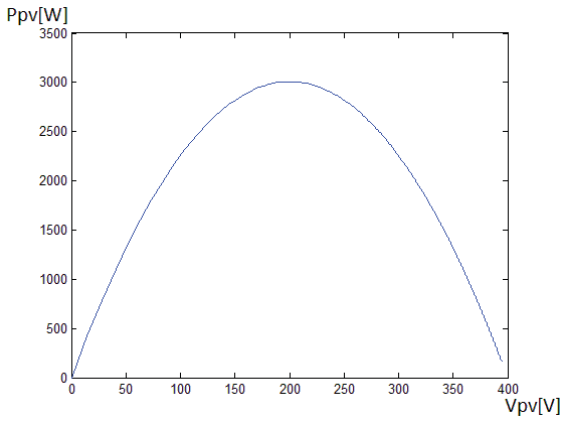


Rys. 6. Schemat modelu laboratoryjnego

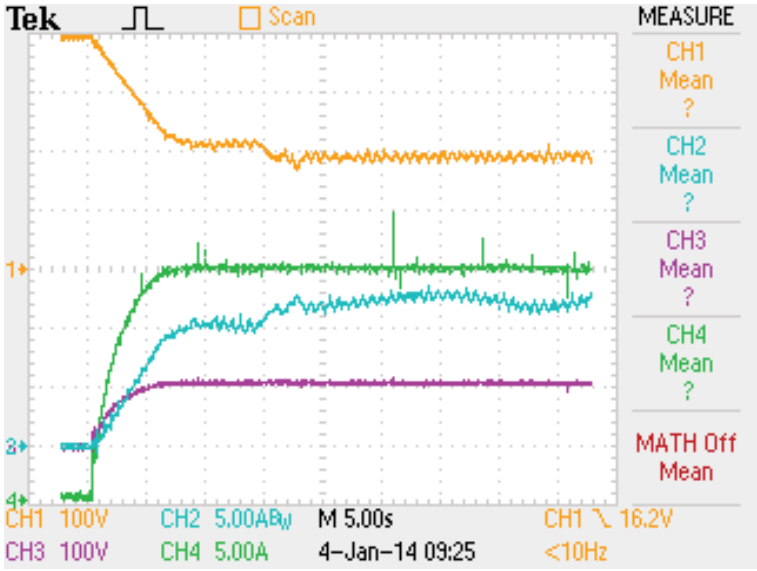
a)



b)

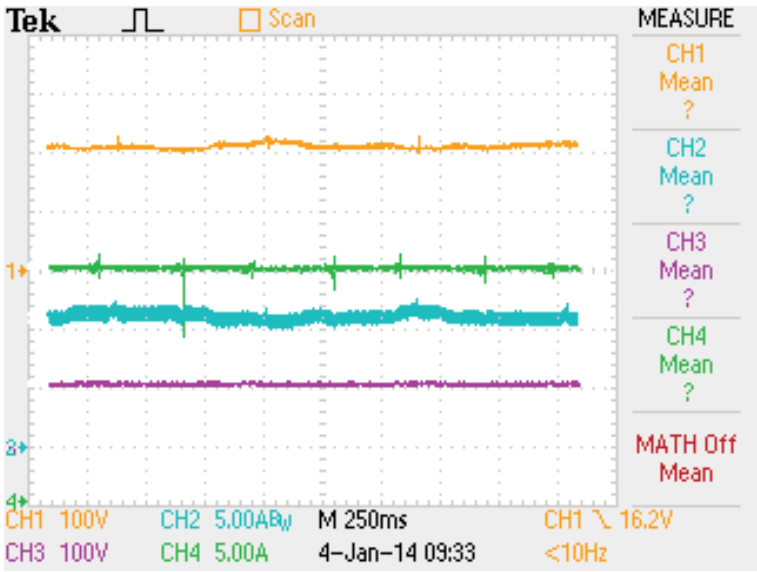


Rys. 7. Charakterystyka:
a) prądowo-napięciowa prostownika z szeregowym rezystorem R_z, b) mocy wyjściowej prostownika z szeregowym rezystorem R_z w funkcji napięcia U_{pv} dla $U_z = 400$ V, $R_z = 13{,}3\ \Omega$



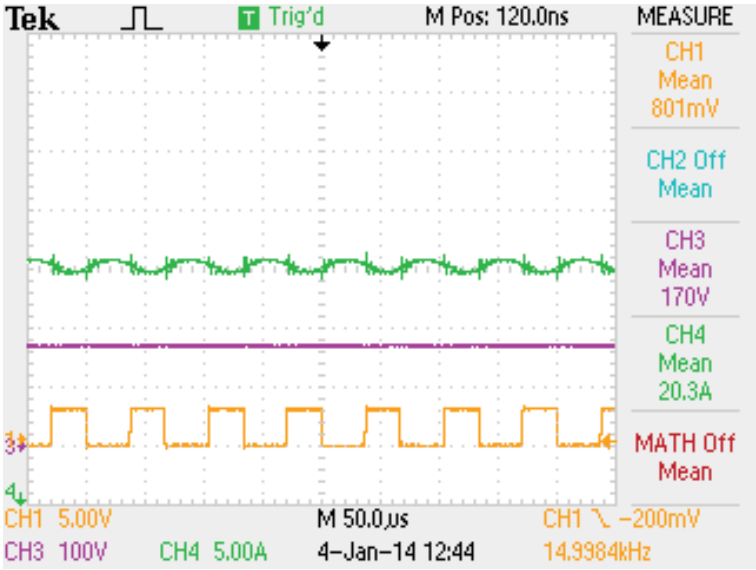
Rys. 8. Wyszukiwanie PMM dla U_z = 400 V, R_z = 15,3 Ω, R_L = 7,8 Ω dla podstawy czasu 5 s

1 – napięcie U_{pv}; 2 – prąd I_{pv}; 3 – napięcie U_{bat}; 4 – prąd I_{bat}.

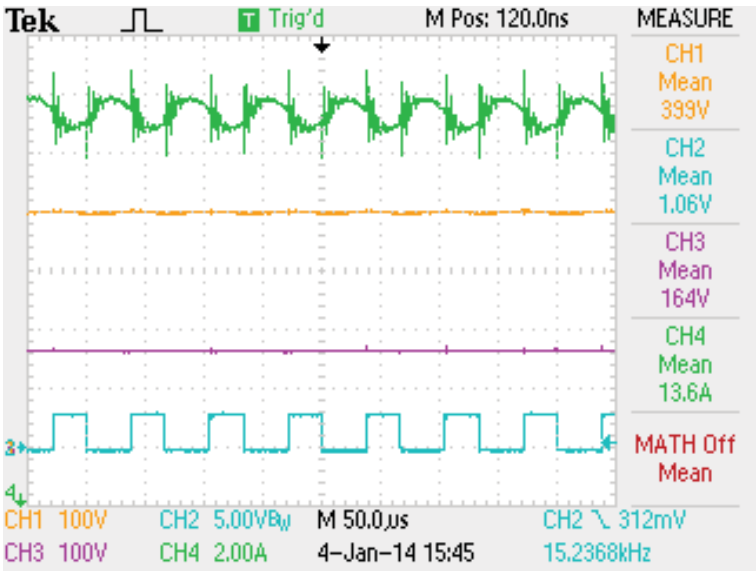


Rys. 9. Stan PMM dla U_z = 400 V, R_z = 15,3 Ω, RL = 7,8 Ω dla podstawy czasu 250 ms

1 – napięcie U_{pv}; 2 – prąd I_{pv}; 3 – napięcie U_{bat}; 4 – prąd I_{bat}



Rys. 10. Ładowanie baterii stałym prądem I_{bat} = 20 A dla U_{pv} = 400 V
1 – PWM; 3 – napięcie baterii U_{bat}; 4 – prąd ładowania I_{bat}



Rys. 11. Ładowanie baterii stałym napięciem U_{bat} = 164 V dla U_{pv} = 400 V
1 – napięcie U_{pv}; 2 – PWM; 3 – napięcie baterii U_{bat}; 4 – prąd ładowania I_{bat}

Jak widać z rysunków 8 i 9 zaimplementowany algorytm sterujący powoduje, iż układ śledzenia PMM, krąży wokół punktu maksymalnej mocy. Jest to spowodowane ciągłą zmianą napięcia referencyjnego o wartość *deltaV*. Duża wartość parametru *deltaV* zapewnia szybkie odnajdywanie PMM za cenę dużych oscylacji wokół tego punktu natomiast mała wartość zapewnia niewielkie oscylacje, ale długi czas dochodzenia do punktu mocy maksymalnej oraz słabszą dynamikę przy zmianach parametrów źródła. Przy zadanej w programie wartości parametru *deltaV* = 5V można zauważyć, że oscylacje wokół PMM nie dają zauważalnych zmian prądu ładowania baterii, co jest ważnym czynnikiem wpływającym na żywotność akumulatorów. Świadczy to o odpowiedniej filtracji zastosowanego filtru wyjściowego składającego się z elementów L_{pv}, C_{out}, L_{out} oraz kondensatora C_{bat}.

Oscylogram przedstawiony na rysunku 11 prezentuje wykonywanie ostatniej części charakterystyki ładowania baterii – ładowanie stałym napięciem. Ładowarka utrzymuje wartość napięcia na poziomie maksymalnej jego wartości dla wykorzystywanych w eksperymencie akumulatorów – 164 V. Zauważalne na prądzie wyjściowym tętnienia wynikają z działania przetwornicy obniżającej napięcie. Zastosowanie większych wartości elementów filtrujących na wyjściu układu pozwoliłoby na ich wyeliminowanie.

6. WNIOSKI

Pokazane wyniki badań potwierdzają, poprawne działanie proponowanego układu regulatora i pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

- zaimplementowany algorytm MPPT poprawnie wyszukuje punkt mocy maksymalnej nie wpływając negatywnie na tętnienia prądu ładowania baterii,
- uzasadnione jest użycie filtru *LCL* na wyjściu przetwornicy oraz kondensatora C_{bat} zapewniających niewielką wartość tętnień prądu ładowania, co pozwala wykorzystać w pełni dostępną pojemność akumulatora,
- zaimplementowany algorytm ładowania CC-CV zapewnia poprawne parametry ładowania, pozwalając skutecznie ładować akumulatory w sposób zapewniający dłuższą ich żywotność.

LITERATURA

1. Breucker S.: Impact of DC-DC Converters on Li-Ion Batteries, Rozprawa Doktorska, Leuven, 2012.
2. Sritharan T.: Impact of current waveform on battery behaviour, Praca magisterska, 2012.
3. W. A. van Schalkwijk, Scrosati B.: Advances in Lithium-Ion Batteries, USA, 2002.
4. Beriber D. and Talha A.: MPPT techniques for PV systems, Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 2013 Fourth International Conference on, Istanbul, 2013, s. 1437-1442.
5. Smith S.W.: The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing, California, 1999.

Przyjęto do druku dnia 15.04.2016 r.

LI-ION BATTERY CHARGER POWERED FROM PV MODULES FOR ELECTRICAL VEHICLES

Paweł WIATR, Arkadiusz KRYŃSKI

ABSTRACT *This paper presents a description of the lithium-ion battery charger powered by photovoltaic modules for electric vehicles. Working principles of the charger, its control algorithm and experimental results are presented.*

Keywords: *battery charger, photovoltaic, electrical vehicle*

Mgr inż. Paweł WIATR – w 2009 roku ukończył studia inżynierskie na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej, w 2011 ukończył studia magisterskie na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej. Od 2011 roku jest pracownikiem Zakładu Napędów Elektrycznych Instytutu Elektrotechniki. Obecnie jego głównym obszarem zainteresowania są przekształtniki wielopoziomowe, energetyka odnawialna, algorytmy sterowania układami napędowymi.

Inż. Arkadiusz KRYŃSKI – w roku 2015 ukończył studia pierwszego stopnia na wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej, uzyskując dyplom inż. elektryka ze specjalnością Elektronika Przemysłowa. Od 2014 roku pracownik Instytutu Elektrotechniki w Zakładzie Napędów Elektrycznych. Obecny zakres zainteresowań to energoelektronika dla odnawialnych źródeł energii oraz napędy w pojazdach elektrycznych.