

STEROWNIK LED Z ZABEZPIECZENIEM TERMICZNYM

Wojciech WOJTKOWSKI

Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, ul. Wiejska 45A
tel.: +48 85 746 94 40, e-mail: w.wojtkowski@pb.edu.pl

Streszczenie: W artykule prezentowany jest sterownik diody LED mocy, zbudowany na bazie przekształtnika podwyższająco – obniżająco DC-DC, wyposażony w kontrolę temperatury sterowanej diody LED. Prezentowany układ jest przystosowany do zasilania napięciem z zakresu typowego dla ogniw Li-ion i może być zastosowany w urządzeniach przenośnych. Dzięki zastosowaniu dodatkowego mikrokontrolera posiada niestandardowe funkcje, takie jak możliwość sterowania jasnością świecenia zewnętrznym sygnałem analogowym, zabezpieczenie termiczne sterowanej diody, programowanie cyklu pracy. W artykule przedstawiono procedurę doboru kluczowych elementów układu przekształtnika oraz zaprezentowano wybrane wyniki badań laboratoryjnych.

Słowa kluczowe: cyfrowy czujnik temperatury, przekształtnik DC-DC, sterownik LED, dioda LED mocy.

1. WSTĘP

W ostatnich latach widać gwałtowny wzrost liczby aplikacji wykorzystujących diody LED dużej mocy. Powszechne staje się np. stosowanie diod LED we wszelkich pojazdach, nie tylko do podświetlania przyrządów sterowniczych ale także jako główne oświetlenie drogowe. Dzięki rozwojowi lamp LED o coraz większej mocy i jasności świecenia, możliwe jest zastąpienie tradycyjnych rodzajów lamp w budynkach mieszkalnych, na ulicach, a nawet w zakładach przemysłowych. W nowych zastosowaniach istotne jest zapewnienie wysokiej sprawności oraz wysokiej kompatybilności elektromagnetycznej. Dotyczy to szczególnie układów zasilających, w roli których pracują przekształtniki impulsowe. W wielu zastosowaniach, w których źródłem energii są akumulatory, istotna jest też możliwość podniesienia bądź obniżenia napięcia za pomocą przekształtników podwyższająco – obniżających. Przekształtnik jest niezbędny, aby w całym zakresie zmian napięcia akumulatora zasilającego, prąd diody pozostawał stały. Jednym z takich układów może być prezentowany przekształtnik podwyższająco – obniżający. Jeśli lampa LED jest zasilana z pojedynczego ogniwa Li-ion, to typowe napięcie pracy (na wejściu przekształtnika) wyniesie w przybliżeniu od 3 do 4 V. Jeśli zasilana dioda LED wymaga napięcia zasilania równego 3,5 V to przy zasilaniu akumulatorowym potrzebny jest właśnie przekształtnik obniżająco – podwyższający. Wówczas istotne jest, aby zastosowany przekształtnik miał jak największą sprawność przetwarzania energii, szczególnie gdy jest zasilany z akumulatora lub baterii. Obecnie często pożądanym jest, aby

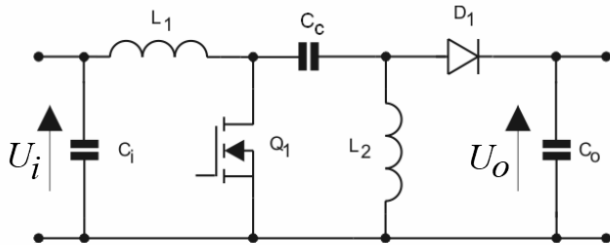
przekształtnik zasilający umożliwił zmianę jasności świecenia zasilanej diody LED. Najczęściej używa się w tym celu impulsowego zasilania źródła światła (w tym przypadku diody LED) i sygnału PWM o odpowiedniej częstotliwości (wyższej, niż możliwości ludzkiego oka w tym zakresie). Zmieniając współczynnik wypełnienia impulsów zasilających źródło światła uzyskuje się wówczas efekt obniżania jasności świecenia. Niektóre lampy fluorescencyjne mają zmniejszoną niezawodność lub czas życia w przypadku gdy są często ściemniane lub regulowane za pomocą sygnału PWM. W przypadku diod LED jest inaczej. Żywotność diod LED jest uzależniona w dużym stopniu od temperatury złącza [1, 2]. Im wyższa jest temperatura złącza tym generalnie krótsza jest żywotność diody LED. Ściemnianie diod LED może być zrealizowane zarówno poprzez ograniczenie prądu, lub przez zasilanie impulsami PWM. W obu przypadkach średnia temperatura złącza się zmniejsza (przy ściemnianiu diody), co wpływa na zwiększenie niezawodności diody LED. Bardziej pożądaną metodą może być regulacja jasności poprzez PWM, ponieważ regulacja prądu diody może prowadzić do przesunięć widmowych emitowanego światła. Z kolei nie do końca można jeszcze stwierdzić, czy regulowanie za pomocą PWM wpływa w sposób istotny na zdrowie człowieka. Temperatura może także wpływać na przesunięcie widma emitowanego światła diod LED. Jest to szczególnie istotne przy emisji światła białego lub gdy wiele diod o teoretycznie tym samym kolorze świecenia jest umieszczonych na jednej matrycy. Wówczas łatwo zauważyć niejednorodność koloru w obrębie matrycy spowodowaną nierównomiernym rozkładem temperatury. Wzrost temperatury złącza diody LED wpływa także na zmniejszenie sprawności energetycznej i co za tym idzie - na zmniejszenie możliwości do uzyskania jasności świecenia [3]. W związku z faktem, że temperatura wywiera niekorzystny wpływ na diody LED, użytecznym rozwiązaniem może być wyposażenie sterownika diody w funkcję pomiaru temperatury. Wówczas możliwa staje się regulacja prądu diody uzależniona od zmierzonej temperatury. Temperaturę złącza można pośrednio szacować na podstawie zmierzonej temperatury radiatora diody LED. Zastosowany czujnik temperatury powinien mieć niewielkie rozmiary i być zamocowany do radiatora jak najbliższej kontrolowanej diody.

W artykule prezentowany jest przekształtnik podwyższająco – obniżający DC-DC wyposażony w kontrolę temperatury sterowanej diody LED. Prezentowany układ jest przystosowany do zasilania napięciem z zakresu

typowego dla ogniw Li-ion, a dzięki zastosowaniu dodatkowego mikrokontrolera posiada dodatkowe niestandardowe funkcje.

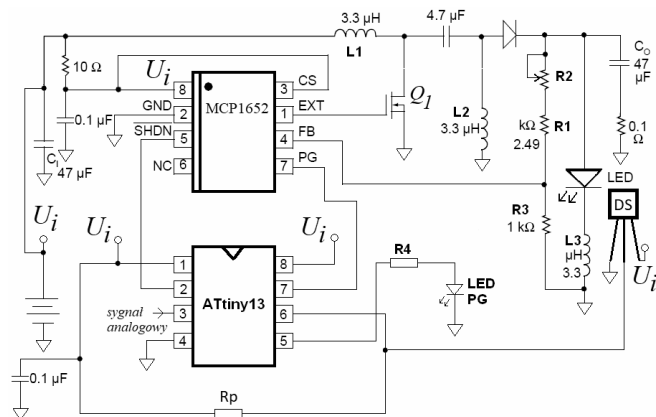
2. PRZEKSZTAŁNIK PODWYŻSZAJĄCO - OBNIŻAJĄCY

Schemat przekształtnika DC-DC podwyższająco – obniżająco, wykorzystanego do budowy sterownika LED, jest przedstawiony na rysunku 1.



Rys. 1. Przekształtnik podwyższająco – obniżająco

Na rysunku 1 widać jedynie uproszczony schemat funkcjonalny przekształtnika. Składa się on z kondensatora wejściowego C_i , kondensatora wyjściowego C_o , kondensatora sprzęgającego C_c , dwóch cewek L_1 i L_2 oraz przełącznika tranzystorowego MOSFET Q_1 . W stanie ustalonym gdy przekształtnik znajduje się w trybie pracy ciągłej (gdy prąd L_1 nie spada do zera), kondensator sprzęgający C_c jest ładowany do napięcia wejściowego U_i . Gdy tranzystor Q_1 jest wyłączony, napięcie na cewce L_2 jest równe napięciu wyjściowemu U_o . Ponieważ kondensator C_i jest ładowany do napięcia U_i , napięcie na wyłączonym tranzystorze Q_1 (u_{DS-Q1}) jest równe $U_i + U_o$ (napięcie na L_1 jest równe U_o). Gdy tranzystor Q_1 jest włączony, kondensator C_c (naładowany do napięcia U_i) jest połączony równolegle z L_2 i w związku z tym napięcie na L_2 jest równe U_i . Podczas gdy Q_1 jest włączony, energia ze źródła wejściowego jest gromadzona w polu magnetycznym cewki L_1 , natomiast w L_2 jest gromadzona energia przepływająca z kondensatora C_c . Gdy Q_1 się wyłączy, prąd cewki L_1 zaczyna płynąć przez C_c i D_1 , ładując C_o oraz do obciążenia. W tym czasie C_o oraz C_c powinny być doładowane w stopniu umożliwiającym dostarczenie prądu obciążenia (z C_o) i ładowanie cewki L_2 (z C_c) podczas załączenia tranzystora Q_1 .



Rys. 2. Sterownik LED z zabezpieczeniem termicznym

Aby przekształtnik podwyższająco – obniżająco przedstawiony na rysunku 1, mógł być wykorzystany do

zasilania diody LED, w praktyce potrzebna jest jeszcze zamknięta pętla regulacji. Regulator ma na celu kontrolę i regulację prądu LED. Może być też pożądana dodatkowa filtracja tego prądu. Zmodyfikowany układ zasilacza LED wyposażonego w regulację prądu diody jest przedstawiony na rysunku 2.

Do budowy proponowanego sterownika wykorzystano specjalizowany kontroler przekształtnika podwyższająco – obniżająco MCP1652 (rys. 2). Dodatkowo zastosowano ośmiobitowy mikrokontroler z rodziny AVR: ATtiny13, który zapewnia dodatkową funkcjonalność. Za pośrednictwem szeregowej magistrali 1-Wire komunikuje się on z cyfrowym czujnikiem temperatury DS18B20 umieszczonym na radiatorze zasilanej diody LED dużej mocy. Zmierzona temperatura jest porównywana z ustaloną temperaturą progową i w razie jej przekroczenia mikrokontroler wyłącza sterownik MCP1652, co powoduje obniżenie temperatury diody. Pomiary temperatury są wykonywane 10 razy na sekundę z rozdzielczością 9 bitową. Deklarowana przez producenta czujnika dokładność to $\pm 0,5$ °C w zakresie od $- 10$ °C do $+ 85$ °C. Komunikacja z czujnikiem za pośrednictwem magistrali 1-Wire jest w prezentowanym przypadku realizowana na drodze programowej. Napisane w tym celu funkcje obsługi 1-Wire zajmują po kompilacji ok. 350 bajtów. Do typowej aplikacji układu MCP dodana została indukcyjność L_3 , która wygładza prąd diody LED. Mikrokontroler ATtiny13 steruje załączeniem oraz wyłączeniem układu MCP oraz sygnalizuje niski poziom naładowania akumulatora zasilającego. Może także okresowo załączać i wyłączać LED zgodnie z zadaniem harmonogramem.

3. DOBÓR ELEMENTÓW PRZEKSZTAŁNIKA

Dobór elementów został przeprowadzony na podstawie zaleceń zawartych w publikacji [4]. Przyjęte założenia: napięcie wejściowe U_i od 2,8 do 4,2 V, napięcie wyjściowe $U_o = 3,2$ V, maksymalny prąd diody LED $I_o = 1,1$ A, częstotliwość kluczkowania $f_s = 750$ kHz, napięcie progowe diody $U_D = 0,5$ V. Zakładając pracę przekształtnika w trybie ciągłym (gdy prąd cewki L_1 nie spada do zera w stanie ustalonym), maksymalny i minimalny współczynnik wypełnienia impulsów sterujących może być wyznaczony w następujący sposób:

$$D_{(\max)} = \frac{U_o + U_D}{U_{i(\min)} + U_o + U_D} = 0,57 \quad (1)$$

$$D_{(\min)} = \frac{U_o + U_D}{U_{i(\max)} + U_o + U_D} = 0,47 \quad (2)$$

Dobór cewek wymaga założenia maksymalnego tętnienia prądu:

$$\Delta I_L = I_i \cdot 35\% = 0,39 A \quad (3)$$

Wartość indukcyjności cewek wyliczono wg równania:

$$L_1 = L_2 = \frac{U_{i(\min)}}{\Delta I_L \cdot f_s} \cdot D_{(\max)} = 4,5 \mu H \quad (4)$$

Gdzie f_s jest częstotliwością sygnału sterującego Q_1 .
Należy sprawdzić, czy cewki nie będą się nasycać:

$$I_{L1(peak)} = I_O \cdot \frac{U_O + U_D}{U_{i(min)}} \cdot \left(1 + \frac{0.35}{2}\right) = 1,7A \quad (5)$$

$$I_{L2(peak)} = I_O \cdot \left(1 + \frac{0.35}{2}\right) = 1,3A \quad (6)$$

W celu doboru odpowiedniego tranzystora kluczującego, trzeba wyznaczyć maksymalne napięcie U_{DS} oraz maksymalny prąd drenu:

$$U_{DS(peak)} = U_{i(max)} + U_O = 7,4V \quad (7)$$

$$I_{Q1(peak)} = I_{L1(peak)} + I_{L2(peak)} = 3A \quad (8)$$

Napięcie w kierunku zaporowym na diodzie:

$$U_{DR} = U_{i(max)} + U_O = 7,4V \quad (9)$$

Bardzo ważne jest aby dobrać właściwy kondensator C_c . Musi on być w stanie przenosić relatywnie duży prąd, gdyż przez niego płynnie chwilami prąd obciążenia. Zakładając kondensator ceramiczny o niskim ESR, zakres zmian napięcia na nim można wyliczyć z równania:

$$\Delta U_{C_c} = \frac{I_O \cdot D_{(max)}}{C_c \cdot f_s} = 0,17V \quad (10)$$

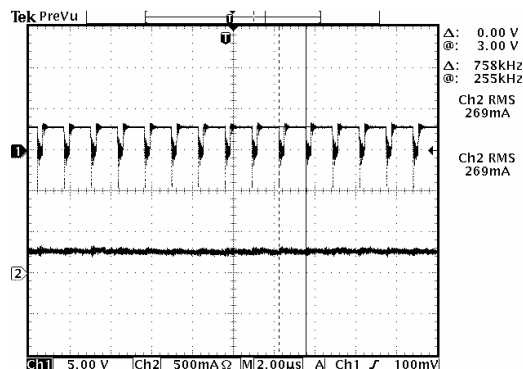
Wartość skuteczną prądu przepływającego przez C_c :

$$I_{C_c(RMS)} = I_O \cdot \sqrt{\frac{U_O + U_D}{U_{i(min)}}} = 1,26A \quad (11)$$

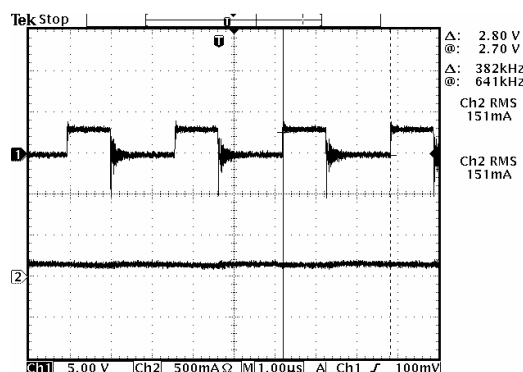
Na podstawie przedstawionych wyliczeń, do budowy przekształtnika wykorzystano: kondensator ceramiczny o pojemności $4 \mu F$, tranzystor Q_1 IRL014NPBF oraz diodę BYS10-45.

4. BADANIA EKSPERYMENTALNE

Opisany przekształtnik podwyższająco – obniżający został zbudowany w celu przeprowadzenia badań laboratoryjnych i sprawdzenia układu monitorowania temperatury LED. Napięcie wejściowe zmieniano w zakresie odpowiadającym zmianom napięcia ogniwa Li-ion (2,8 V do 4,2 V). Maksymalny prąd wyjściowy przyjęto 1,1 A. Napięcie wyjściowe 3,2 V. Wybrane wyniki badań działającego przekształtnika są prezentowane na rysunkach 3, 4, 5, 6, 7. Obsługa magistrali 1-Wire została zrealizowana na drodze programowej, przy wykorzystaniu noty aplikacyjnej [5]. Przebieg komunikacji na magistrali 1-Wire jest przedstawiony na rysunku 8. Przebiegi programowo zrealizowanej komunikacji 1-Wire (rys. 8) są zgodne zasadami komunikacji przedstawionymi w dokumentacji [6].



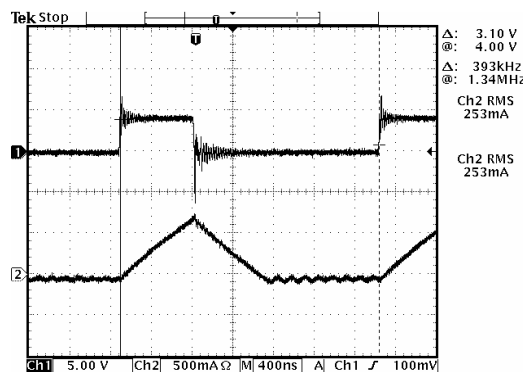
Rys. 3. Sygnał sterujący Q_1 -1, prąd wyjściowy -2, częstotliwość przełączeń $f_s=758$ kHz, napięcie wejściowe $U_i = 3$ V, prąd wyjściowy $I_i=1,3$ A, stan ustalony.



Rys. 4. Sygnał sterujący Q_1 -1, prąd wyjściowy -2, częstotliwość przełączeń $f_s=382$ kHz, napięcie wejściowe $U_i = 3$ V, prąd wyjściowy $I_i=0,36$ A, stan ustalony.

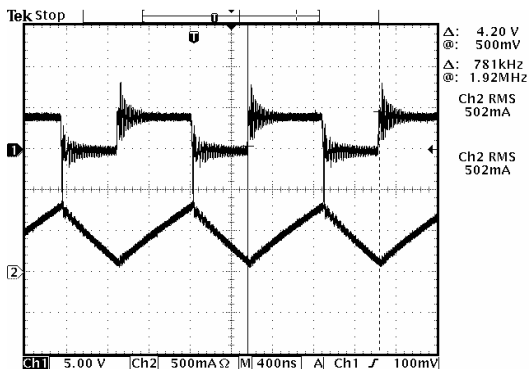


Rys. 5. Sygnał sterujący Q_1 -1, prąd wyjściowy -2, częstotliwość przełączeń $f_s=781$ kHz, napięcie wejściowe $U_i = 4,1$ V, prąd wyjściowy $I_i=0,76$ A, stan ustalony.

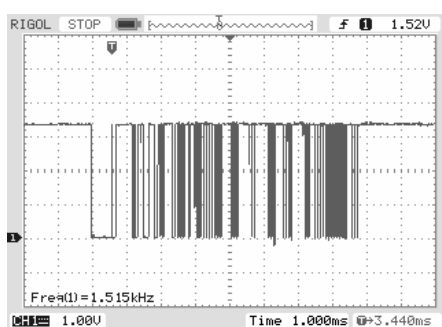


Rys. 6. Sygnał sterujący Q_1 -1, prąd cewki L_2 -2, tryb nieciągłej pracy, częstotliwość przełączeń $f_s=394$ kHz, napięcie wejściowe $U_i = 4,1$ V, prąd wyjściowy $I_i=0,19$ A, stan ustalony.

Zarówno część wysoko-prądowa przekształtnika jak i układ monitorujący temperaturę pracują prawidłowo.



Rys. 7. Sygnał sterujący Q_1 -1, prąd cewki L_2 -2, tryb pracy ciągłej, częstotliwość przełączeń $f_s=781$ kHz, napięcie wejściowe $U_i=4,1$ V, prąd wejściowy $I_i=0,76$ A, stan ustalony.



Rys. 8. Pełna ramka komunikacji na magistrali 1-Wire.

Po przekroczeniu zadanej temperatury radiatora, mikrokontroler ATtiny13 wyłącza prąd diody LED za pośrednictwem sygnału SHDN sterownika MCP. Wejście analogowe (wejście ADC2 wewnętrznego przetwornika A/C, zakres zmian od 0 do 5 V) mikrokontrolera ATtiny13 umożliwia sterowanie jasnością świecenia LED.

5. WNIOSKI KOŃCOWE

W artykule zaprezentowano przekształtnik podwyższająco – obniżający DC-DC wyposażony w kontrolę temperatury sterowanej diody LED. Układ jest

przystosowany do zasilania napięciami z zakresu typowego dla ogniw Li-ion, a dzięki zastosowaniu dodatkowego mikrokontrolera posiada dodatkowe niestandardowe funkcje (kontrola temperatury LED, zabezpieczenie termiczne, regulacja analogowa jasności świecenia). Przeprowadzono badania laboratoryjne potwierdzające prawidłowe funkcjonowanie poszczególnych elementów. Żywotność diod LED jest uzależniona w dużym stopniu od temperatury. W przedstawionym rozwiązaniu do pomiaru temperatury radiatora diody LED zastosowano cyfrowy czujnik współpracujący z mikrokontrolerem. Dzięki zastosowaniu mikrokontrolera możliwe jest wyłączenie prądu LED gdy temperatura przekroczy zadany próg, możliwe jest też cykliczne włączanie lub wyłączenie diody. Dzięki założonemu zakresowi napięć wejściowych układ może być zastosowany w urządzeniach przenośnych.

Artykuł był finansowany ze środków pracy S/WE/1/2016.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Kobayashi T, Sakate Y, Hashimoto R, Takashina T, Kanematsu H, Mizuta K and Utsumi Y: Research on optimization of cooling structure of LED element The-Asia-Pacific Interdisciplinary Research Conference Irago, Japan, Nov.15-16th, 2012.
2. Qin Y. X. and Ron Hui S. Y.: Comparative Study on the Structural Designs of LED Devices and Systems Based on the General Photo-Electro-Thermal Theory, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 25, no. 2, pp. 507-513, Feb. 2010.
3. Kobayashi T., Ishikawa S., Hashimoto R., Kanematsu H. and Utsumi Y.: Effect of Heat Sink Structure on Cooling Performance of LED Bulb, The 3rd International Conference on Design Engineering and Science, ICDES 2014, Pilsen, Czech Republic, August 31 – September 3, 2014.
4. Application Note 1051: <http://www.maxim-ic.com/an1051>.
5. Maxim Integrated, Application Note 126: 1-Wire Communication Through Software, 2002.
6. Maxim Integrated Data Sheet: DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer, 2015.

LED DRIVER WITH THERMAL PROTECTION

The DC-DC power converter for high brightness LED lighting applications supplied by a lithium-ion batteries and equipped with a digital temperature sensor is presented in the paper. The converter is built using specialized integrated chip MCP1652 and an additional microcontroller from the AVR family – ATtiny13, for additional functionality. Typical application of the MCP1651 was extended with a couple of elements. The converter was tested experimentally and some results are presented. The converter works well, especially at higher input voltages, when the efficiency is higher. Lower input voltages like 2.7 or even less are also possible, but the efficiency would be worse. For very low input voltages proposed configuration can be simply modified for bootstrap operation. The bootstrap applications will work with output voltage not higher than 6 V. Additional potentiometer R2 allows for easy regulation of the output current what can be used for dimming light intensity. The LED driver has an additional temperature measurement circuit based on the digital DS18B20 temperature sensor. Monitoring of LED temperature may be important in many applications. The microcontroller can turn-off the LED when the temperature crosses the preset threshold value.

Keywords: LED, LED driver, DC-DC converter, Digital temperature sensor.