

Mikroprocesorowy regulator prądu diod LED dużej mocy

Streszczenie. W artykule przedstawiono mikroprocesorowy regulator prądu diod LED dużej mocy. Układ może być wykorzystany zarówno w aplikacjach oświetleniowych jak i sygnalizacyjnych, szczególnie zasilanych akumulatorowo. Główną zaletą proponowanego rozwiązania jest energooszczędność uzyskana dzięki wykorzystaniu wyjściowego stopnia mocy pracującego dwustanowo. Cyfrowa regulacja zapewnia nastawę wartości prądu oraz jego stabilizację. Dzięki możliwości regulacji jasności świecenia sterowanych diod LED, układ może być wykorzystany w pojazdach samochodowych do realizacji dwóch funkcji w jednej lampie z pojedynczym zestawem diod np.: świateł tylnych i świateł stop.

Abstract. This paper describes the microprocessor power LED current regulator. It can be used in lighting and signaling applications as well. The main advantage of the proposed circuit is improved efficiency, achieved thanks to the switching mode output power stage. Digital control allows setting of the output current and its stabilization (it leads to stabilization of the light intensity). The possibility of regulation of the light intensity is attractive when implementation of such circuit in modern automotive lights are considered. The regulator is capable of realization of two or more functions using just one set of power LED diodes. **(Microprocessor implementation of high power LED current control).**

Słowa kluczowe: mikroprocesorowy regulator prądu, LED, PWM, AVR.

Keywords: microprocessor current controller, LED, PWM, AVR.

doi:10.12915/pe.2014.04.47

Wstęp

W ostatnich latach widoczne jest rosnące zainteresowanie wykorzystaniem diod LED w aplikacjach oświetleniowych, takich jak oświetlenie wnętrz, iluminacja gmachów, podświetlanie eksponatów, oświetlenie drogowe i sygnalizacyjne, oświetlenie przenośne. Decydują o tym zarówno względy ekonomiczne (energooszczędność, niezawodność) jak i wizualne i artystyczne.

Niezwykle istotną częścią systemu oświetleniowego są układy zasilania i sterowania. Dzięki tym układom możliwe jest zasilanie zarówno pojedynczych diod LED jak i zestawów złożonych z wielu elementów, możliwa jest regulacja jasności świecenia, stabilizacja jasności, regulacja barwy wypadkowej zestawów diod LED RGB. Na rynku dostępna jest duża ilość specjalizowanych scalonych sterowników diod LED, opisywanych w różnych publikacjach [6, 7, 8, 9], w przeważającej mierze są to jednak układy stosunkowo niewielkiej mocy.

W artykule przedstawiono koncepcję mikroprocesorowego regulatora prądu diod LED dużej mocy, przeznaczonego do zastosowań oświetleniowych i sygnalizacyjnych. Zaletą proponowanego rozwiązania jest energooszczędność, uzyskana dzięki wykorzystaniu wyjściowego stopnia mocy pracującego dwustanowo. Zastosowanie procesora pozwala na programową modyfikację algorytmu sterowania. Dzięki temu można np. sterować źródłem światła w sposób zapewniający stałą charakterystykę źródła światła niezależnie od procesu starzenia lub wypalania diody LED. W takim przypadku potrzebny jest dodatkowo układ pomiarowy, przekazujący informacje o parametrach promieniowania do procesora, co pozwala na korektę prądu zasilającego zestaw oświetleniowy.

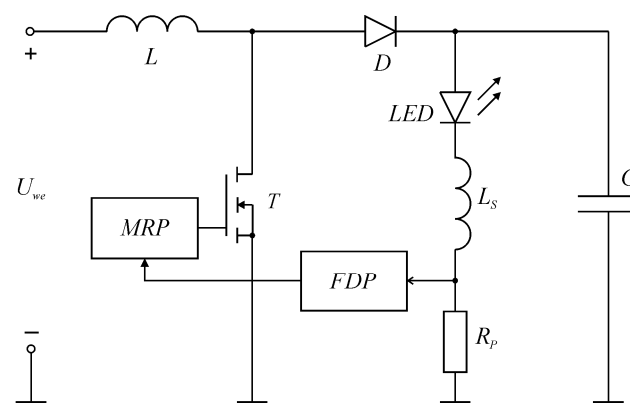
W prezentowanym układzie zastosowano konfigurację podwyższającą DC/DC, co umożliwia zastosowanie regulatora w wielu aplikacjach przenośnych, gdzie występuje konieczność stosowania źródeł niskiego napięcia takich jak akumulatory litowo – jonowe lub baterie jednorazowego użytku. Często dostępne napięcie przenośnego źródła energii może być niewystarczające do zasilania zestawu diod LED połączonych szeregowo – równoległe, wówczas niezbędne jest podniesienie napięcia za pomocą np. proponowanego rozwiązania.

Opisywany układ nadaje się do zasilania diod LED z wykorzystaniem ogniw fotowoltaicznych w systemach alarmowych i sygnalizacyjnych. W układach zasilanych z ogniw fotowoltaicznych, w zależności od konfiguracji

połączeń ogniw (szeregowo, równoległe, szeregowo-równoległe) oraz od konfiguracji połączeń i ilości zasilanych diod LED, także może wystąpić konieczność podwyższenia napięcia wyjściowego. Dzięki możliwości programowania cyfrowego układu sterowania, stosując proponowane rozwiązanie stosunkowo łatwo można uzyskać odpowiednie parametry regulatora prądu LED.

Opis mikroprocesorowego regulatora prądu diod LED

Uproszczony schemat mikroprocesorowego regulatora prądu diod LED przedstawiono na rysunku 1. Układ stanowi rozwinięcie koncepcji opisanej w [1]. Składa się on z trzech bloków: przekształtnika podwyższającego napięcie, sterownika mikroprocesorowego (MRP) oraz pętli sprzężenia zwrotnego. Przekształtnik podwyższający składa się z indukcyjności L , tranzystora MOSFET T , diody D oraz kondensatora filtrującego C . Dodatkowo zastosowano indukcyjność L_s w celu jak najlepszej filtracji prądu zasilającego zestaw lub diodę LED [Rys. 1].



Rys.1. Uproszczony schemat mikroprocesorowego regulatora prądu diody LED

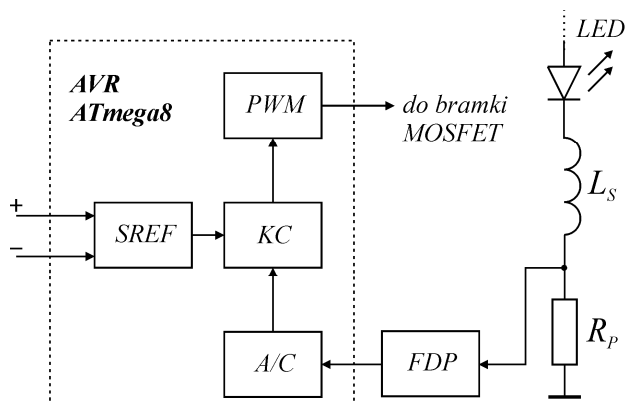
Aby umożliwićysterowanie tranzystora bezpośrednio z portu mikrokontrolera, zastosowano tranzystor specjalnie przystosowany do poziomów napięć układów TTL (tranzystor IRF serii IRLZ). Sygnał sprzężenia zwrotnego, proporcjonalny do prądu diody LED, jest pobierany z rezystora pomiarowego R_p . W torze sprzężenia zwrotnego zastosowano filtr dolnoprzepustowy FDP aby wyeliminować wysokoczęstotliwościowe zakłócenia sygnału, mające wpływ na dokładność przetwarzania A/C. Dodatkowa

indukcyjność szeregową L_s filtruje prąd diody LED, dzięki czemu pomimo pracy impulsowej udało się uzyskać stały prąd wyjściowy.

Zasilanie diody LED prądem stałym w zastosowaniach oświetleniowych (brak migotania) jest istotne w wielu aplikacjach, między innymi, ze względów zdrowotnych [2].

Schemat blokowy sterownika mikroprocesorowego (MRP) jest przedstawiony na rysunku 2.

Sterownik mikroprocesorowy (MRP) składa się z czterech podstawowych bloków: przetwornika analogowo - cyfrowego A/C, komparatora cyfrowego KC, zadajnika słowa referencyjnego SREF oraz generatora przebiegów prostokątnych o regulowanym wypełnieniu PWM. Poszczególne bloki zostały zrealizowane w sposób programowo – sprzętowy z wykorzystaniem mikrokontrolera z rodziny AVR typu ATmega8 [3].



Rys. 2. Schemat blokowy sterownika mikroprocesorowego (obszar objęty linią przerywaną) i jego umiejscowienie w układzie regulatora.

Jako generator PWM wykorzystano wewnętrzny blok sprzętowy ośmiobitowego licznika TCNT2 mikrokontrolera ATmega8 [3]. Przetwornik analogowo – cyfrowy, wbudowany w mikrokontroler, działający metodą sukcesywnej aproksymacji, został skonfigurowany do pracy 8 - bitowej. Taka rozdzielczość okazała się w zupełności wystarczająca i zapewnia 255 poziomów wartości prądu zasilającego diodę LED. Komparator cyfrowy oraz zadajnik słowa referencyjnego zrealizowano w sposób programowy.

Zasada działania mikroprocesorowego regulatora prądu diody LED jest następująca. Spadek napięcia na rezystorze pomiarowym, proporcjonalny do prądu diody LED, jest poddawany filtracji (eliminacja zakłóceń – poprawa dokładności przetwarzania) i przetwarzany na postać cyfrową. Za pomocą zadajnika słowa referencyjnego, sterowanego przez użytkownika sygnałami + oraz -, ustawia się wartość słowa ośmiobitowego, odpowiadającą wymaganej wartości prądu diody LED. W najprostszym przypadku jako sygnały zadające wartość prądu można wykorzystać impulsy z przycisków monostabilnych. Programowy komparator cyfrowy porównuje oba słowa ośmiobitowe i steruje generatorem PWM w taki sposób, aby wartość prądu wyjściowego pozostawała na stałym poziomie (zadany przez użytkownika) niezależnie od zmian napięcia zasilającego. Po stwierdzeniu odchyłki (błędu) prądu zasilającego LED od wartości zadanej, mikrokontroler automatycznie zwiększa lub zmniejsza współczynnik wypełnienia impulsów sterujących tranzystorem kluczującym zasilanie, co wywołuje pożądaną korektę wartości prądu diody.

Wyniki badań eksperymentalnych

W celu weryfikacji eksperymentalnej proponowanego układu zbudowano stanowisko laboratoryjne, składające się z regulowanego zasilacza NDN DF1730SL20A, czterokanałowego oscyloskopu firmy Tektronix typu TDS3014, dwóch sond prądowych typu TCP202 firmy Tektronix oraz standardowych sond napięciowych. Jako obciążenie zastosowano białą diodę LED o mocy znamionowej 10 W. Charakterystyka prądowo – napięciowa zastosowanej diody jest przedstawiona w tabeli 1 oraz na rysunku 3.

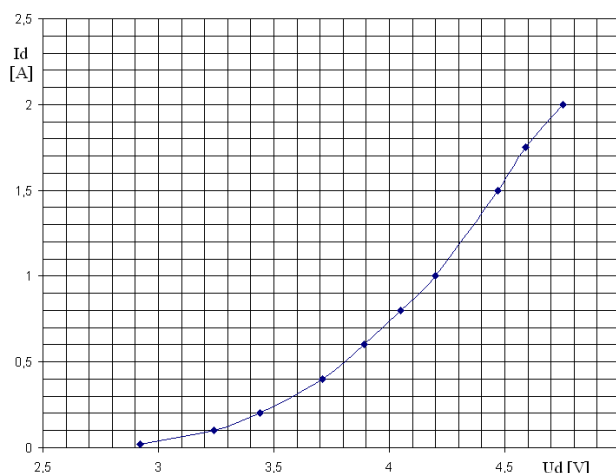
Po zbadaniu charakterystyki diody LED, przeprowadzono test całego układu. Zamieszczone w referacie oscylogramy zostały otrzymane przy następujących parametrach:

- częstotliwość sygnału PWM: 16 kHz,
- indukcyjności $L = L_s = 170 \mu\text{H}$,
- rezystancja rezystora pomiarowego $R_p = 0,45 \Omega$,
- pojemność filtrująca $C = 220 \mu\text{F}$.

Rysunki 4, 5 oraz 6 przedstawiają przebiegi napięć sterujących tranzystorem T oraz prądów diody LED i indukcyjności L przy zadanym prądzie wyjściowym (równym 1 [A]) i trzech różnych napięciach wyjściowych.

Tablica 1. Charakterystyka prądowo – napięciowa badanej diody LED

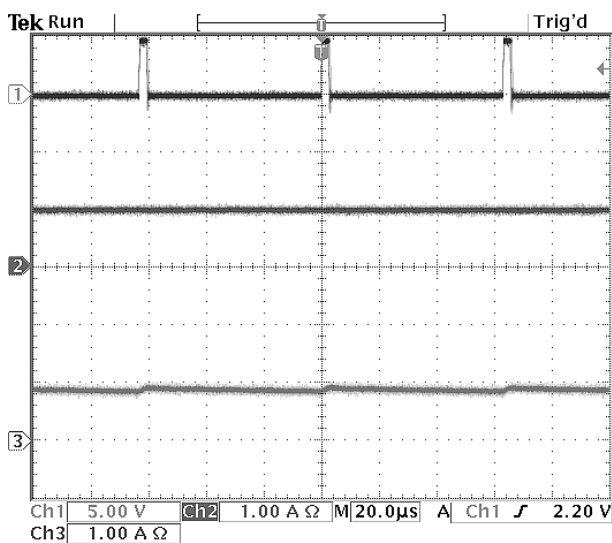
Lp.	U [V]	I [A]
1	2,92	0,02
2	3,24	0,10
3	3,44	0,20
4	3,71	0,40
5	3,89	0,60
6	4,05	0,80
7	4,20	1,00
8	4,47	1,50
9	4,59	1,75
10	4,75	2,00



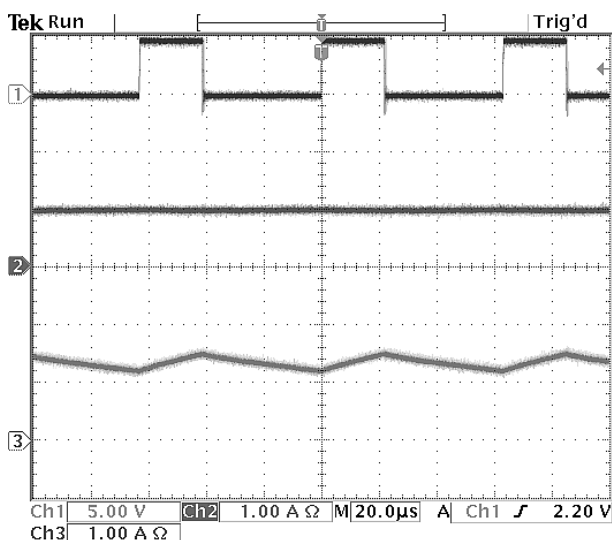
Rys. 3. Charakterystyka prądowo – napięciowa wykorzystanej diody LED

Warto podkreślić, iż zmiana napięcia wejściowego powoduje automatyczną zmianę współczynnika wypełnienia impulsów sterujących i utrzymanie wartości prądu diody LED na ustalonym poziomie. Zmiana napięcia wejściowego

w praktyce wynika np. ze zmian oświetlenia zasilających paneli fotowoltaicznych lub z powodu rozładowywania się akumulatorów zasilających. Zasilanie stałym prądem niezależnie od zmieniającego się napięcia wejściowego jest pożądane praktycznie w każdym układzie. W każdym z analizowanych podczas badań laboratoryjnych przypadków, poziom tętnień prądu diody LED, z praktycznego punktu widzenia, jest pomijalnie mały. W prezentowanym zakresie zmian napięcia wejściowego (od 4,3 V do 6,1 V) współczynnik wypełnienia przebiegu sterującego zmienia się automatycznie w zakresie od 5 % do 60 %. Dowolna zmiana napięcia wejściowego w omawianym zakresie spowoduje regulację współczynnika wypełnienia prowadzącą do utrzymania prądu diody na stałym poziomie. Zakres zmian współczynnika wypełnienia impulsów oraz dozwolonych zmian napięcia wejściowego zależy od doboru parametrów układu przekształtnika oraz od oczekiwanej wartości prądu obciążenia (prądu zasilania diod LED).



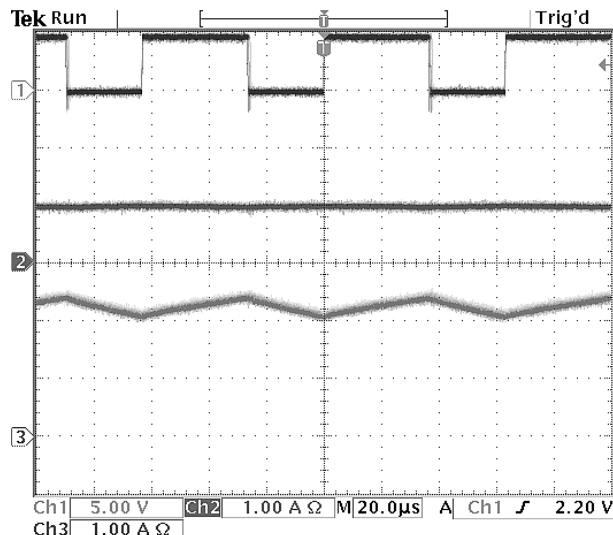
Rys. 4. Przebieg sterujący tranzystorem (kanał 1), prąd diody LED (kanał 2), prąd indukcyjności L (kanał 3), przy napięciu wejściowym $U_{we} = 6,1$ V



Rys. 5. Przebieg sterujący tranzystorem (kanał 1), prąd diody LED (kanał 2), prąd indukcyjności L (kanał 3), przy napięciu wejściowym $U_{we} = 4,8$ V

Dynamika badanego układu jest wystarczająca aby obserwator nie był w stanie zauważyć zmian jasności świecenia przy zmianach napięcia zasilającego, natomiast

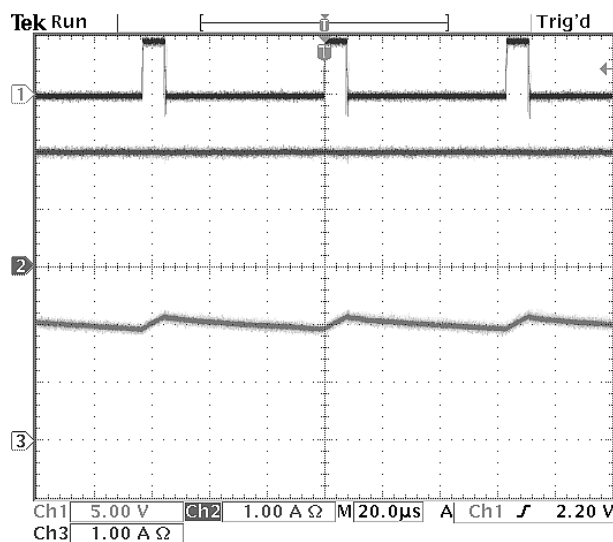
dokładny pomiar czasu reakcji nie został na tym etapie badań przeprowadzony.



Rys. 6. Przebieg sterujący tranzystorem (kanał 1), prąd diody LED (kanał 2), prąd indukcyjności L (kanał 3), przy napięciu wejściowym $U_{we} = 4,3$ V

Dzięki konfiguracji podwyższającej przekształtnika, układ zasilania diody LED pracuje prawidłowo przy napięciach zasilających zbliżonych do spadku napięcia na diodzie (tablica 1, rysunek 6).

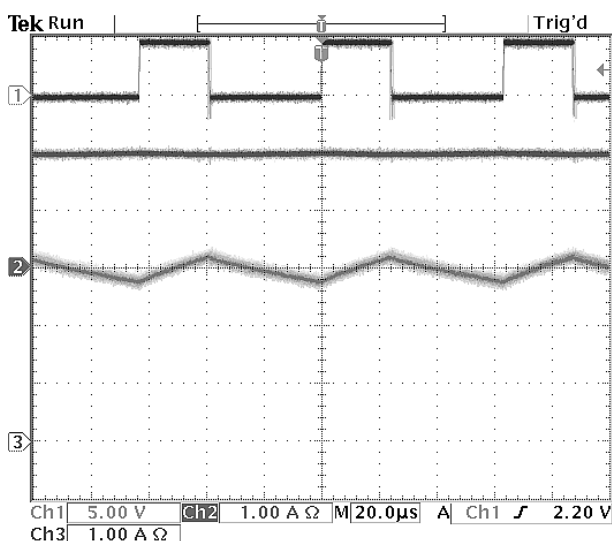
Analogiczne przebiegi napięć i prądów dla ustawionego prądu diody 2 A, pokazane zostały na rysunkach 7 i 8. W przypadku pracy układu z większymi prądami obciążenia, możliwe jest znaczne zmniejszenie wartości rezystora pomiarowego R_p bez obniżenia dokładności regulacji. Tak więc najlepiej jest dobrać rezystor R_p do konkretnego obciążenia.



Rys. 7. Przebieg sterujący tranzystorem (kanał 1), prąd diody LED (kanał 2), prąd indukcyjności L (kanał 3), przy napięciu wejściowym $U_{we} = 9$ V

Na dynamikę układu wpływają oprócz parametrów przekształtnika, czas przetwarzania przetwornika analogowo – cyfrowego, czas przetwarzania programowego (operacje arytmetyczne, pętle programowe, warunki itp.) oraz częstotliwość wyjściowa generatora PWM. Wpływ powyższych parametrów na dynamikę zamkniętego układu regulacji prądu diody LED będzie przedmiotem dalszych badań.

Dopuszczalny zakres napięć wejściowych, gwarantujący prawidłową pracę układu, zależy od parametrów przekształtnika, szczególnie L , C , częstotliwości kluczowania oraz rezystancji pomiarowej R_p . Parametry te mogą być optymalizowane w pod kątem uzyskania pożądanego prądu diody przy zakładanym zakresie zmian napięcia zasilającego.



Rys. 8. Przebieg sterujący tranzystorem (kanał 1), prąd diody LED (kanał 2), prąd indukcyjności L (kanał 3), przy napięciu wejściowym $U_{we} = 7,9 \text{ V}$

Potencjalne obszary zastosowań

Dzięki wykorzystaniu mikroprocesora, proponowany układ jest znacznie bardziej uniwersalny niż specjalizowane scalone sterowniki diod LED. Prezentowany regulator może być wykorzystywany między innymi:

- w domowych instalacjach oświetleniowych,
- do iluminacji obiektów,
- do podświetlania ekspozycji muzealno - wystawowych,
- w wielofunkcyjnych lampach samochodowych.

Programowalność układu pozwala na dowolne ustawianie czasu włączania i wyłączenia oświetlenia (nawet w zależności od dnia tygodnia lub pory roku), automatyczne dopasowanie do zewnętrznych warunków oświetleniowych (wymaga dodatkowego czujnika), utrzymanie stałego natężenia oświetlenia bez względu na starzenie się źródła światła (wymaga dodatkowego czujnika), tworzenie skomplikowanych efektów bądź scen świetlnych.

W przypadku lamp samochodowych można zrealizować kilka funkcji za pomocą jednego zespołu diod LED. W zależności od jasności świecenia, jeden zespół diod może pełnić funkcję świateł STOP, postojowych oraz pozycyjnych. Przy zastosowaniu diod RGB i wykorzystaniu efektu mieszania barw za pomocąysterowania sygnałami o różnym współczynniku wypełnienia, można uzyskać dodatkowe funkcje, takie jak zmiana barwy świecenia (np. światła kierunkowskazów lub światła cofania).

Zastosowanie regulatora programowalnego może być istotne także z punktu widzenia efektywności energetycznej oświetlenia. Nie w każdej sytuacji cała moc instalacji oświetleniowej powinna być wykorzystywana, a ponadto czas stosowania oświetlenia może być regulowany, co prowadzi do oszczędności zużycia energii elektrycznej na potrzeby oświetlenia [10].

Podsumowanie

Wyniki eksperymentalne potwierdziły działanie układu zgodne z oczekiwanym. Zaproponowane rozwiązanie zawiera wyjątkowo niedrogie elementy elektroniczne z uwagi na wykorzystanie w torze regulacji taniego mikrokontrolera z rodziny AVR8. Mikrokontroler realizuje większość potrzebnych funkcji. Dodatkowo bez modyfikacji układowej można zmienić programowo parametry regulacji lub przystosować do wymaganych parametrów aplikacji. Układ stanowi poważną alternatywę dla szerokiej gamy dedykowanych układów scalonych małej mocy [4-7], umożliwiając znaczne zwiększenie dopuszczalnego prądu wyjściowego poprzez dobór tranzystora kluczującego.

W zastosowaniach oświetleniowych niezwykle istotne może być zasilanie diod LED stałym prądem [2]. Stały prąd zasilania diody LED osiągany w prezentowanym rozwiązaniu m.in. poprzez zastosowanie dodatkowej indukcyjności filtrującej, pozwala na eliminację niepożądanego migotania. Dzięki konfiguracji podwyższającej, proponowany układ zasilania może znaleźć zastosowanie w urządzeniach przenośnych, zasilanych z akumulatorów i ogniw fotowoltaicznych lub w aplikacjach wykorzystujących łańcuchy diod połączonych szeregowo lub szeregowo - równolegle.

Dzięki modułowej budowie regulatora istnieje możliwość rozszerzenia jego funkcjonalności, np. realizacji miękkiego startu, polegającego na płynnym osiągnięciu zadanej wartości prądu w zaprogramowanym przez użytkownika czasie.

Praca została zrealizowana w ramach pracy S/WE/1/11.

REFERENCES

- [1] Karpiuk A., Wojtkowski W., Cyfrowy regulator prądu diody LED do zastosowań oświetleniowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 85 (2009), nr 11, 304-305
- [2] Wilkins A., Veitch J., Lehman B., LED Lighting Flicker and Potential Health Concerns: IEEE Standard PAR1789 Update, Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 IEEE, 171 - 178
- [3] 8-bit Atmel Microcontroller with 4/8/16K Bytes In-System Programmable Flash. Atmel Corporation, www.atmel.com
- [4] Gawryluk A., Zasilanie diod LED dużej mocy, *Elektronika Praktyczna Plus*, nr 3, 2007
- [5] Gołaszewski M., Układy zasilania diod LED dużej mocy, *Elektronika Praktyczna*, nr 5, 2009, s. 73 - 80.
- [6] Grodzki L.: Constant-current Driving of the RGB LED, *Przegląd Elektrotechniczny*, Vol. 86, 2010, Nr 10, p.200-202.
- [7] Grodzki L.: Constant-current Driving of the LEDs' group, *Przegląd Elektrotechniczny*, Vol. 86, 2010, Nr 10, p.203-205.
- [8] Wojtkowski W., Karpiuk A.: Sześciokanałowy sterownik diod LED z interfejsem 12C, *Pr. Inst. Elektrotech. - R.57, z.245* (2010), s.49-56.
- [9] Grodzki L.: Wybrane aspekty impulsowego i stałoprądowego sterowania diodami LED. *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 88, 2012, Nr 3a, s.74-77.
- [10] Pracki P.: Efektywność energetyczna oświetlenia obiektów użyteczności publicznej, *Przegląd Elektrotechniczny*, R85, Nr 9/2009, p. 328-331.

Autorzy:

dr inż. Wojciech Wojtkowski, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, Katedra Automatyki i Elektroniki, ul. Wiejska 45D, 15-351 Białystok, E-mail: w.wojtkowski@pb.edu.pl;

dr inż. Andrzej Karpiuk, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, Katedra Automatyki i Elektroniki, ul. Wiejska 45D, 15-351 Białystok, E-mail: andrzej.karpiuk@pb.edu.pl