

Lech GRODZKI

UKŁADY ZASILACZY DIOD LED UMOŻLIWIAJĄCE REGULACJĘ STRUMIENIA ŚWIETLNEGO

STRESZCZENIE *Możliwość regulacji jasności źródła światła jest mile widzianą cechą użytkową. Ponieważ wydajność diod LED zależy od szeregu czynników, uzyskanie precyzyjnej regulacji ich strumienia świetlnego wymaga złożonych układów ze sprzężeniem zwrotnym. Jest to jednak rozwiązanie wyraźnie podnoszące koszt stosowania opraw z diodami LED. Dlatego w wielu zastosowaniach, nie wymagających wysokiej precyzji w utrzymaniu zadanej wartości strumienia świetlnego, odchodzi się od stosowania kosztownych układów ze sprzężeniem zwrotnym na rzecz tańszych obwodów sterowania w tzw. układzie otwartym. Artykuł przedstawia kilka wybranych koncepcji układów sterowania jasnością diod LED bez sprzężenia zwrotnego. Zwrócono przy tym uwagę głównie na technologie cyfrowe, bazujące na strukturach programowalnych i mikrokontrolerach. Podejście takie wynika z dużych możliwości funkcjonalnych oferowanych przez tego typu układy.*

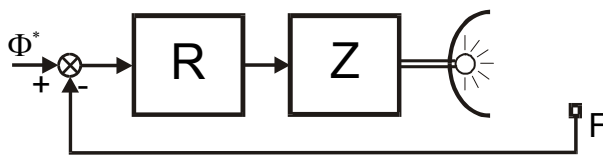
Słowa kluczowe: *układy zasilania diod LED, sterowanie PWM, sterowanie stałoprądowe, mikrokontrolery*

1. STEROWANIE JASNOŚCIĄ DIOD LED

Możliwość sterowania jasnością źródeł światła zbudowanych z diod LED jest właściwością wychodzącą naprzeciw wielu oczekiwaniom użytkowników

dr inż. Lech GRODZKI
e-mail: lgrodzki@we.pb.edu.pl

Wydział Elektryczny
Politechnika Białostocka



Rys. 1. Klasyczny układ regulacji jasności źródła światła ze sprzężeniem zwrotnym:

Φ^* – sygnał wartości zadanej strumienia świetlnego, F – czujnik pomiarowy, R – regulator, Z – zasilacz sterowany

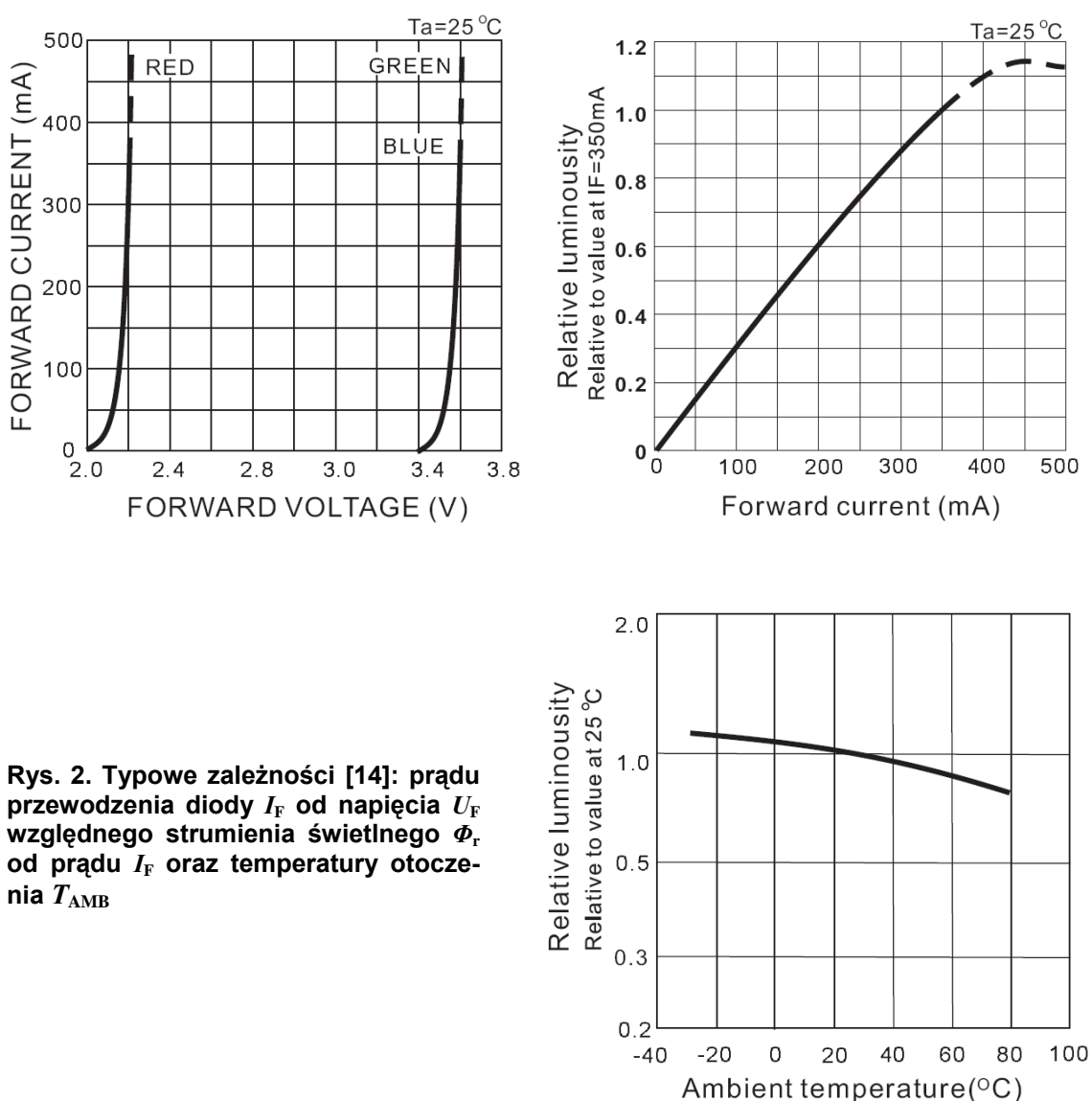
W przypadku źródeł światła sprzężenie zwrotne polegałoby na pomiarze natężenia oświetlenia w wybranym punkcie oświetlanej powierzchni. Zmierzona przez czujnik F wielkość, po przetworzeniu na sygnał elektryczny i porównaniu przez regulator R z wartością zadaną Φ^* służyłaby korekcji pracy układu zasilającego Z. Układ taki pozwala zrealizować nie tylko regulację nadążną, ale również kompensację zmian punktu pracy źródła światła w funkcji czasu, wynikającą ze starzenia się elementów składowych czy też zmiany warunków otoczenia [2, 4].

W takich urządzeniach. Oczekiwania te mogą być związane nie tylko z dążeniem do zapewnienia maksymalnej energooszczędności użytkownika źródła światła ale także możliwością kreowania różnych efektów świetlnych. Najdokładniejszą metodą zapewnienia pożądanej jasności źródła światła jest zastosowanie odpowiedniego sprzę-

2. DIODA LED JAKO OBIEKT STEROWANIA

Jeżeli źródło światła jest zbudowane z diod LED, to projektując układ regulacji jego jasności należy pamiętać o zależności emitowanego przez te diody strumienia świetlnego Φ od ich punktu pracy. Na ten punkt pracy składają się nie tylko wartości napięcia U_F i prądu pracy I_F , ale także jej temperatura T_D , a pośrednio także temperatura otoczenia T_{AMB} . Analizując dane katalogowe zastosowanej diody LED, można określić zależności jej strumienia świetlnego Φ od wymienionych parametrów punktu pracy. Precyzyjne układy stabilizacji punktu pracy diody LED uwzględniają nie tylko wartości napięcia czy prądu zasilającego, ale również temperaturę jej obudowy. Jest to szczególnie istotne przy sterowaniu pracą kolorowych (jedno- lub wielobarwnych) diod LED [1, 4]. Jednakże praktyczna realizacja takiego dokładnego obwodu stabilizacji strumienia świetlnego diody LED jest rozwiązaniem kosztownym i trudno mówić o jego powszechnej stosowalności. Dlatego konstruktorzy uciekają się do pewnych uproszczeń, wymuszonych względami ekonomicznymi. Często stosowanym wtedy podejściem jest zaniechanie pomiaru temperatury na rzecz stale chłodzonych radiatorów. Kolejnym krokiem jest rezygnacja ze sprzężenia zwrotnego i sterowanie jasnością diody LED w tzw. układzie otwartym. Aby jednak zrealizować tak uproszczony układ regulacji, konieczna jest dobra znajomość charakterystyk obiektu sterowania jakim jest półprzewodnikowa

dioda świecąca. Zakładając, że wielkością wyjściową w układzie otwartym ma być emitowany przez diodę strumień świetlny, należy wykorzystać znajomość jego zależności od wielkości charakteryzujących punkt pracy diody. Typowe zależności strumienia świetlnego diody POWER RGB LED od tych wielkości przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Typowe zależności [14]: prądu przewodzenia diody I_F od napięcia U_F względnego strumienia świetlnego Φ_r od prądu I_F oraz temperatury otoczenia T_{AMB}

Podstawową charakterystyką jest zależność $\Phi = f(I_F)$. Wykorzystując dodatkowo zależność $I_F = f_U(U_F)$ można również wyznaczyć charakterystykę $\Phi = f(U_F)$. Jeśli zaś chodzi o wpływ temperatury otoczenia T_{AMB} na jasność diody, to z przytoczonej charakterystyki można wnioskować, że przy odpowiednim chłodzeniu obudowy diody można go pominąć.

3. PRZYKŁADOWE UKŁADY STERUJĄCE

3.1. Wykorzystanie przetwornic napięcia

Zależność prądu I_F diody LED od jej napięcia U_F oraz jej strumienia świetlnego Φ od tegoż prądu wskazują na możliwe sposoby wpływania na jasność świecenia diody LED. Jednym z nich byłaby kontrola napięcia zasilającego diody świecące. Dlatego do kontroli jasności świecenia diodowych źródeł światła chętnie używa się regulowanych zasilaczy, czy sterowanych przetwornic napięcia [8, 11]. Konstrukcja tych urządzeń umożliwia też sterowanie ich sygnałami cyfrowymi lub analogowymi jako urządzeń wykonawczych w układach automatyki. Takie realizacje układów zasilających diody LED charakteryzują się:

- koniecznością użycia oprócz specjalizowanych układów scalonych dodatkowych elementów dyskretnych, niezbędnych do poprawnej pracy obwodów przetwarzania napięć;
- koniecznością zastosowania w charakterze układu nadrzędnego mikrokontrolera, którego zadaniem jest między innymi uwzględnienie silnie nieliniowych zależności pomiędzy strumieniem świetlnym, prądem świecenia diody a napięciem jej zasilania;
- niższym od omawianych dalej stopniem integracji układów sterujących.

3.2. Wykorzystanie modulacji PWM

Specyfika diod LED jako odbiorników energii elektrycznej ogranicza możliwe sposoby ich zasilania do układów o spolaryzowanym napięciu zasilającym. Popularną techniką regulacji mocy tak zasilanych urządzeń elektrycznych jest modulacja PWM. Przy stałych parametrach źródła zasilania ($U_{ZAS} = \text{const}$) ilość energii przekazywanej z tego źródła do odbiornika jest proporcjonalna do wartości współczynnika wypełnienia D :

$$P = D \cdot P_{MAX} \quad (1)$$

$$D = t_W / (t_W + t_B), \quad t_W + t_B = \text{const} \quad (2)$$

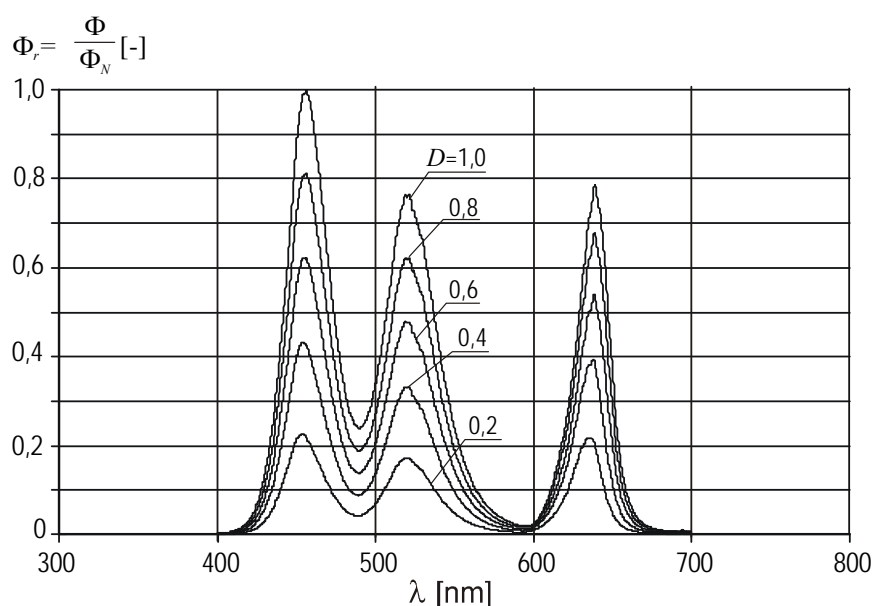
gdzie:

t_W – czas pracy zasilacza;

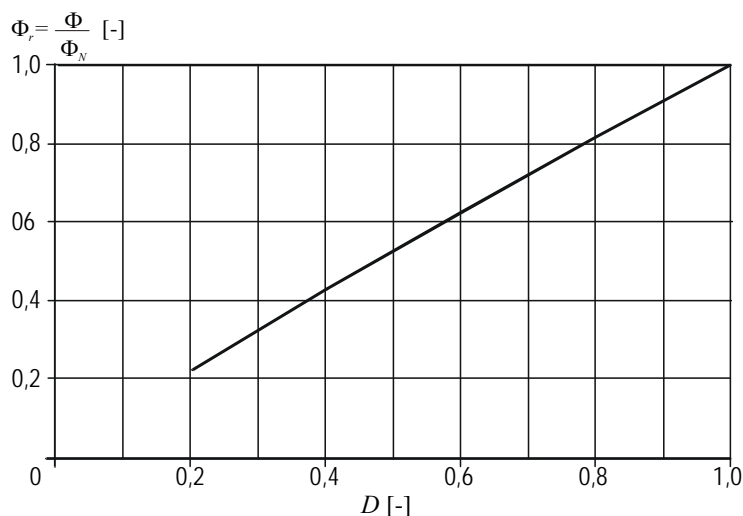
t_B – czas przerwy w zasilaniu.

Zastosowanie modulacji PWM w zasilaniu diody LED powoduje emisję ciągu impulsów świetlnych o czasach trwania t_W i przerwach równych t_B .

Przy dostatecznie dużej częstotliwości kluczowania zasilania oko ludzkie nie dostrzeże pojedynczych impulsów, czy nawet drgania światła, a jedynie stan z pozoru ciągłego świecenia. Przeprowadzone badania wpływu wartości współczynnika PWM na obserwowaną jasność diody LED pozwalają stwierdzić, że zależność ta jest praktycznie liniowa. Stosowne badania przeprowadzono dla diod monochromatycznych, białych i RGB. W każdym przypadku rejestrowano przy pomocy spektrometru o odpowiednio dobranym czasie pomiaru widmo energetyczne światła przy różnych wartościach współczynnika wypełnienia D . Przykładowe wyniki podaje tabela 1 oraz rysunki 3 i 4.



Rys. 3. Charakterystyki widmowe badanej diody RGB LED przy różnych wartościach współczynnika wypełnienia D

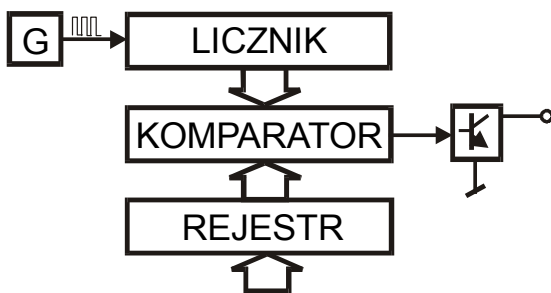


Rys. 4. Zależność względnego strumienia świetlnego diody RGB LED od wartości współczynnika wypełnienia D

TABELA 1

Względna wartość emitowanego strumienia świetlnego diody RGB LED w funkcji współczynnika wypełnienia D

D [-]	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Φ_r [-]	0,22	0,43	0,62	0,82	1



Rys. 5. Struktura logiczna pojedynczego kanału PWM do sterowania jasnością diody LED

Uzyskane podczas badań wyniki dowodzą skuteczności stosowania modulacji PWM do regulacji jasności diody LED bez konieczności stosowania sprzężenia zwrotnego. Pozostaje do rozwiązania jedynie konkretna realizacja układu regulacji. Ponieważ poprawna regulacja PWM bazuje na odmierzaniu zmiennych czasów pracy i wyłączenia zasilania z określoną dokładnością, typowym środkiem realizacji tej techniki jest technologia cyfrowa. Podstawowym modułem regulatora PWM jest wtedy, przedstawiony na rysunku 5, układ złożony z licznika, rejestru wartości progowej oraz komparatora słów binarnych sterującego kluczem tranzystorowym. Częstotliwość generatora impulsów zliczanych przez licznik wraz z jego pojemnością decydują o okresie sygnału PWM, a ilość bitów licznika i rejestru – o dokładności regulacji.

Przedstawiona na rysunku 5 koncepcja regulatora PWM, może mieć różne realizacje techniczne.

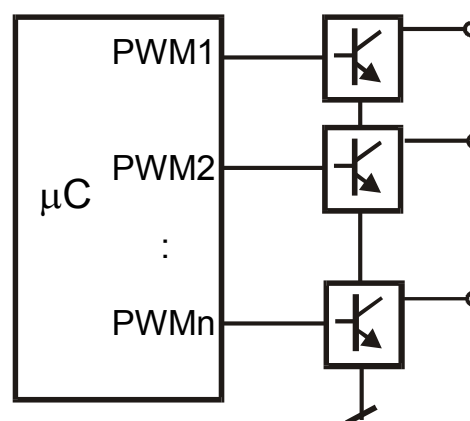
Bardzo popularnym rozwiązaniem jest wykorzystanie specjalistycznych układów czasowo-licznikowych wbudowanych w typowe mikrokontrolery. Jeżeli są one wyposażone w rejestry wzorca i komparatory, to możliwe staje się uzyskanie przy ich użyciu przebiegów PWM [10]. Ilość tak tworzonych kanałów PWM zależy od wersji mikrokontrolera i waha się od 1 do kilkunastu w jednym układzie. Kanały te zapewniają przynajmniej 8-bitową rozdzielczość, co jest równoważne dokładności regulacji rzędu 0,4%. Jest to precyzja wystarczająca do wielu typowych zastosowań diod LED jako regulowanych źródeł światła. Oczywiście pełna realizacja jedno- bądź wielokanałowej regulacji, w której przebiegi sterujące PWM są generowane przez mikrokontroler wymaga odpowiednich kluczy półprzewodnikowych (rys. 6) i stosownego oprogramowania.

Wykorzystanie mikrokontrolerów do bezpośredniej regulacji PWM jasnością diod LED cechuje się:

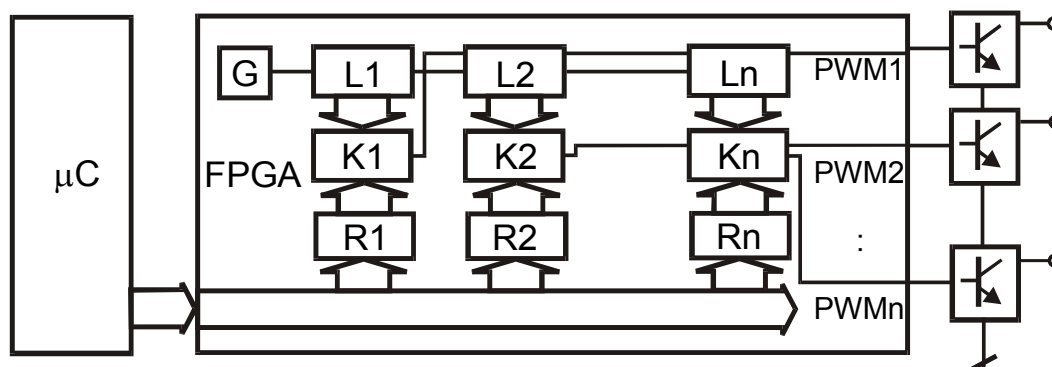
- prostotą konstrukcji;

- możliwością połączenia w jednym mikrokontrolerze regulacji jasności oraz innych funkcji użytkowych oprawy świetlnej;
- wykorzystaniem przy projektowaniu i uruchamianiu układu podstawowych, nieraz bezpłatnych narzędzi projektowych;
- ograniczoną liczbą dostępnych jednocześnie kanałów PWM;
- zwiększonym czasem obciążeniem mocy obliczeniowej mikrokontrolera, utrudniającym zaimplementowanie dodatkowych algorytmów obliczeniowych, wymaganych przez aplikację.

Rys. 6. N-kanałowy regulator PWM bazujący na mikrokontrolerze



Struktura regulatora PWM z rysunku 5, jako typowy układ logiczny może być też zaimplementowana we wnętrzu układu FPGA [9]. Jedynymi ograniczeniami co do ilości jednocześnie pracujących kanałów PWM są wtedy wewnętrzne zasoby zastosowanego układu programowalnego i liczba dostępnych jego linii zewnętrznych. Realizacja takiego wielokanałowego regulatora PWM także wymaga zastosowania mikrokontrolera nadzorującego jego pracę – rysunek 7.



Rys. 7. Wielokanałowy regulator PWM zrealizowany w strukturze FPGA

Użycie struktur programowalnych do wielokanałowej regulacji PWM jasności diod LED wyróżnia się:

- możliwością do uzyskania dużą liczbą jednocześnie pracujących kanałów;
- możliwością zastosowania dowolnego, nawet pozbawionego własnych torów PWM mikrokontrolera nadrzędnego;
- zwolnieniem części mocy obliczeniowej mikrokontrolera, co pozwala powierzyć mu także inne zadania;
- bardziej rozbudowanym układem, który przy dużych strukturach FPGA może okazać się droższym rozwiązaniem w przeliczeniu na jeden tor sterowania;
- koniecznością użycia przy projektowaniu i uruchamianiu specjalizowanych narzędzi programistycznych.

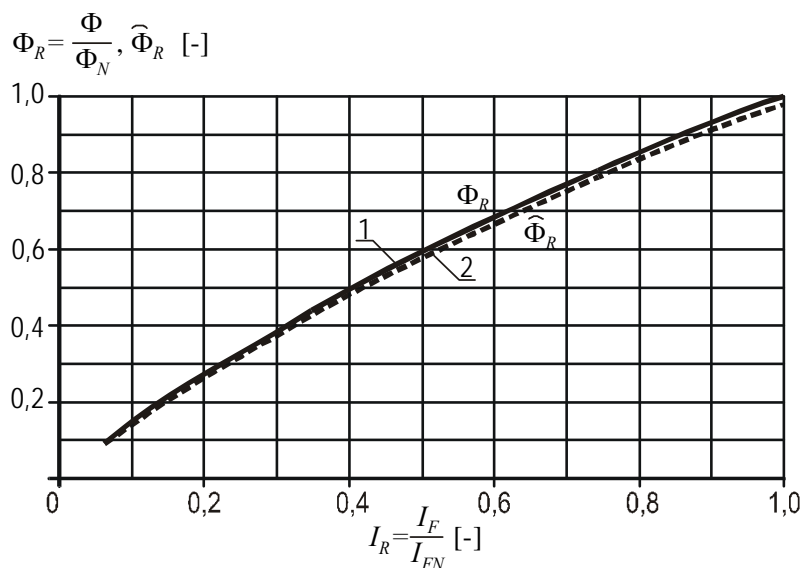
Innym możliwym sposobem realizacji regulacji PWM jasności diody LED jest wykorzystanie gotowych układów scalonych, oferowanych przez szereg firm [12, 15, 16]. Układy te posiadają w swoich stopniach wyjściowych tranzystor mocy do kluczowania obwodów z diodami LED. Sterowanie jasnością polega zwykle na przesłaniu interfejsem szeregowym wartości współczynnika PWM. W obu przypadkach nieodzowny staje się mikrokontroler, jako układ nadrzędny. Wykorzystanie specjalizowanych układów bazujących na technice PWM cechuje się:

- uproszczeniem procesu projektowego – układ docelowy jest „składany” z gotowych modułów PWM;
- możliwością zastosowania dowolnego, nawet pozbawionego własnych torów PWM mikrokontrolera;
- dostępnością niejednokrotnie takich funkcji dodatkowych specjalizowanych sterowników PWM, jak: wykrywanie zwarć i przerw, zabezpieczenia termiczne, itp.;
- występowaniem silnych impulsów świetlnych niezależnie od ustawionej jasności źródła światła.

Ostatnia z wymienionych cech jest charakterystyczna dla wszystkich obwodów zasilania diod LED opartych na sygnałach PWM.

3.3. Regulacja stałoprądowa

Zastosowanie modulacji PWM do kontroli jasności diody LED w układzie otwartym nie jest jedynym możliwym współcześnie rozwiązaniem. Alternatywą jest regulacja wartości ciągłego prądu świecenia diody I_F [3, 5, 6]. Wykorzystując dane katalogowe lub łatwe do przeprowadzenia pomiary, można wyznaczyć zależność strumienia świetlnego Φ emitowanego przez diodę od jej prądu I_F .



Rys. 8. Zmierzona (1) i aproksymowana (2) zależność względnego strumienia świetlnego Φ_R emitowanego przez diodę LED od wartości względnej jej prądu I_R przewodzenia

Wykres z rysunku 8 ilustruje wyznaczony eksperymentalnie kształt takiej zależności dla przykładowej diody POWER LED. Jest to co prawda funkcja nieliniowa, ale jak się okazuje stosunkowo łatwa do stabilizacji lub aproksymacji. Dla przykładowej charakterystyki równanie aproksymujące jest następujące:

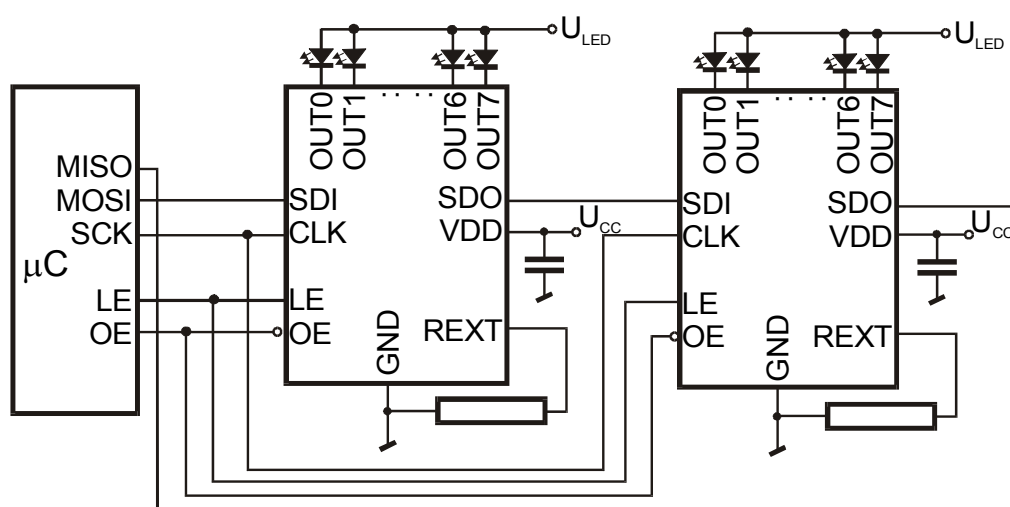
$$\hat{\Phi}_R = \sqrt{2} \ln(1 + I_R) \quad (3)$$

A równanie doń odwrotne:

$$\hat{I}_R = e^{\frac{\Phi_R}{\sqrt{2}}} - 1 \quad (4)$$

Wykorzystując tabelę wartości funkcji odwrotnej $I_F = f(\Phi)$, bądź też odpowiednią zależność algebraiczną (4), można z zadowalającą dokładnością kontrolować jasność diody LED poprzez regulację jej prądu świecenia. Nie jest przy tym konieczne konstruowanie regulowanego źródła prądowego – szereg firm oferuje gotowe układy scalone [12, 13, 15, 16], umożliwiające sterowanie pracą od jednego do kilkunastu tzw. kanałów wyjściowych, z których każdy posiada własne sterowane źródło prądowe. W zależności od wersji układu scalonego, użytkownik ma możliwość jednoczesnej lub niezależnej w każdym z kanałów regulacji prądu świecenia diod LED. Regulacja ta odbywa się za pośrednictwem interfejsu szeregowego (zwykle SPI lub I2C) i nadzorującego

układ mikrokontrolera (rys. 9). Interfejs ten służy do przesłania minimum 7-bitowych słów sterujących wydajnością prądową poszczególnych kanałów wyjściowych. Daje to dokładność regulacji rzędu 0,8%. Dostarczane układy scalone udostępniają także dodatkowe funkcje, np. sygnalizację zwarć lub przerw w poszczególnych kanałach, sygnalizację przegrzania struktury układu, itp. Obecność mikrokontrolera jako układu nadrzędnego umożliwia zrealizowanie pożądanej zależności $I_F = f(\Phi)$ czy to na drodze przeliczeń algebraicznych, czy też odcinkami linearyzowanej i stabilizowanej charakterystyki.



Rys. 9. Przykład układu regulacji stałoprądowej zestawu 16 diod LED

Oparcie regulacji jasności diod POWER LED na specjalizowanych układach do stałoprądowego zasilania charakteryzuje się:

- możliwością do uzyskania dużą liczbą jednocześnie pracujących kanałów, także poprzez kaskadowe łączenie układów sterujących;
- znikomą liczbą dodatkowych elementów zewnętrznych;
- możliwością zastosowania dowolnego mikrokontrolera;
- ograniczeniem zapotrzebowania na moc obliczeniową mikrokontrolera, co pozwala powierzyć mu także inne zadania;
- wykorzystaniem przy projektowaniu i uruchamianiu układu podstawowych, nieraz bezpłatnych narzędzi programistycznych;
- brakiem w emitowanym świetle impulsów świetlnych.

4. PODSUMOWANIE

Cechą wspólną przedstawionych w artykule przykładowych rozwiązań układów sterujących jasnością diod LED jest zastosowanie mikrokontrolerów

jako elementów nadzorujących pracę układu regulator-dioda LED. Ich użycie nie jest żadnym utrudnieniem konstrukcyjnym, a wręcz przeciwnie – umożliwia łączenie tak sterowanych półprzewodnikowych źródeł światła w większe systemy oświetlenia, koordynowanie ich pracy, realizację złożonych algorytmów programowego (zmiennego w czasie) sterowania grupami diod LED. Zastosowane mikrokontrolery sterujące, po wyposażeniu ich w dodatkowe interfejsy komunikacyjne (np. DMX512 lub podobne) mogą stać się elementami złożonego systemu oświetlenia efektowego czy też scenicznego.

W pracy wskazano na dostępność specjalizowanych układów do sterowania impulsowego lub stałoprądowego diod LED, pozwalających zrealizować regulację ich jasności w układzie otwartym z satysfakcjonującą w wielu zastosowaniach dokładnością. O wyborze konkretnego rozwiązania mogą decydować różne kryteria:

- dostępność poszczególnych elementów składowych i ich cena;
- prostota konstrukcji i dostępność narzędzi projektowych;
- liczba diod LED wymagających sterowania;
- względy energooszczędności [7];
- zaakceptowanie lub nie obecności ciągu impulsów świetlnych, nawet gdy nie są one widoczne gołym okiem.

Przeprowadzenie analizy postawionego zadania pozwala wybrać rozwiązanie optymalne, ze względu na wybrane kryteria.

Zrealizowano w ramach pracy S/WE/1/11

LITERATURA

1. Fryc I.: Analiza właściwości spektralnych LEDów w zależności od temperatury i natężenia ich prądu pracy. *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 10, str. 187-189, 2010.
2. Gilewski M.: Programowalny sterownik diod laserowych oraz LED-ów. *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 3a, str. 78-81, 2012.
3. Gilewski M.: Wielokanałowy, stałoprądowy układ zasilania zespołów LED dużej mocy. *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 10, str. 193-196, 2010.
4. Gilewski M., Karpiuk A.: Elektroniczna stabilizacja parametrów świetlnych LED RGB. *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 8, str. 194-198, 2008.
5. Grodzki L.: Constant-current Driving of the LED's Group. *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 10, str. 203-205, 2010.
6. Grodzki L.: Constant-current Driving of the RGB LED. *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 10, str. 200-202, 2010.
7. Grodzki L.: Wybrane aspekty impulsowego i stałoprądowego sterowania diodami LED. *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 3a, str. 74-77, 2012.
8. Wojtkowski W.: Przekształtnik SEPIC do zastosowań oświetleniowych z użyciem diod LED dużej mocy *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 10, str. 260-263, 2010.

9. Wojtkowski W.: Wielokanałowa regulacja jasności świecenia diod LED z wykorzystaniem układów programowalnych FPGA. Przegląd Elektrotechniczny, nr 11, str. 310-312, 2009.
10. Wojtkowski W.: Wykorzystanie sprzętowych bloków PWM mikrokontrolerów AVR do regulacji jasności świecenia diod LED dużej mocy. Przegląd Elektrotechniczny, nr 11, str. 306-309, 2009.
11. Schulcz G.: Power Supplies for LED lighting. LUMEN V4, Brno 2010, str. 204-206.
12. Allegro MicroSystems: Advances in WLED/RGB LED Drivers, Application Information, www.allegromicro.com, 2010.
13. Allegro MicroSystems: Constant-Current LED Drivers. Application Information, www.allegromicro.com, 2007.
14. Huey Jann Electronics Industry Co. Ltd: Visible Light Products Specification HPB8C-4K3RGBx. Datasheets, www.hueyjann.com.tw, 2008.
15. National Semiconductors: LED Drivers for High-Brightness Lighting, www.national.com/LED, 2011.
16. Texas Instruments: LED Reference Design Cookbook, Jaro Press, 2010.

Rękopis dostarczono dnia 20.03.2012 r.

LED DRIVING CIRCUITS FOR LUMINOUS FLUX CONTROL

Lech GRODZKI

ABSTRACT *Many contemporary LED lamp applications offer the possibility of brightness control. Specialized controllers have to stabilize the luminance flux of LED the lamp at ordered level or change its value according to the selected algorithm. The classical controller uses the feedback to compare current value of controlled quantity with its ordered value. But the properties of LED devices allow to control the luminous flux open loop system. That simplified control technique can be matched to the applied LED driving circuit. The article contains some examples of realizations, using digital technique, especially microcontrollers, FPGA devices and specialized integrated drivers. The features of each realization are pointed, too.*

Keywords: *LED driving circuits, PWM control, constant-current LED driving, microcontrollers*

Dr inż. Lech GRODZKI, absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Białostockiej (1985). W 1996 r. uzyskał tam również stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie elektrotechnika. Obecnie pracuje jako adiunkt w Katedrze Automatyki i Elektroniki Politechniki Białostockiej. Zajmuje się projektowaniem i programowaniem sterowników mikroprocesorowych.

