

Sterowanie zasilaniem barwnych LED-ów oprawy oświetleniowej, umożliwiające emisję stałego, niezależnego od warunków pracy, strumienia świetlnego

Streszczenie. W pracy zaprezentowano model LED-owej oprawy oświetleniowej. Charakteryzuje się ona, niezależną od warunków środowiskowych, stałą wartością emitowanego strumienia świetlnego. Ta właściwość oprawy jest uzyskana dzięki użyciu odpowiedniej metody sterowania zasilaniem poszczególnych barwnych LED-ów wchodzących w skład tej oprawy oświetleniowej.

Summary. The paper presents a model of those LEDs based luminaries. It emitted constant luminous flux is independent of environmental conditions. This is done by using an appropriate method for power control of individual LEDs which are used in those luminaries. **(Power control method of color LEDs based luminaries, emitting constant light output, independent from the conditions of its operating environment)**

Słowa kluczowe: oprawa oświetleniowa, dioda LED, strumień świetlny

Keywords: luminaries, LED, luminous flux

doi:10.12915/pe.2014.01.70

Wstęp

Zbudowane z wykorzystaniem LED-ów, oprawy oświetleniowe są coraz powszechniej stosowane, ze względu na ich dużą trwałość oraz energooszczędność.

Dodatkowym atutem opraw, w których wykorzystuje się barwne LED-y, jest możliwość łatwego kształtowania charakterystyki widmowej ich promieniowania [1,2]. Niestety, strumień świetlny emitowany przez diody LED bardzo mocno zmienia się wraz z temperaturą ich pracy [3], zależną również od zmian temperatury otoczenia oprawy oświetleniowej. Na skutek tego, strumień świetlny emitowany przez oprawę oświetleniową, zmienia się w czasie.

Wartość strumienia świetlnego, emitowanego przez diodę LED, jest również zależna od wartości natężenia prądu płynącego przez tego LED-a. W związku z tym, sterując w odpowiedni sposób zasilaniem każdej diody [1], z której składa się dana oprawa oświetleniowa powinno być możliwym uzyskanie stabilnej wartości emitowanego przez nią strumienia świetlnego.

Niniejsza praca, ma na celu zaprezentowanie metody sterowania, zasilaniem barwnych LED-ów oprawy oświetleniowej, które zapewni, że emitowany przez tę oprawę strumień świetlny, będzie niezależny od warunków jej środowiska pracy.

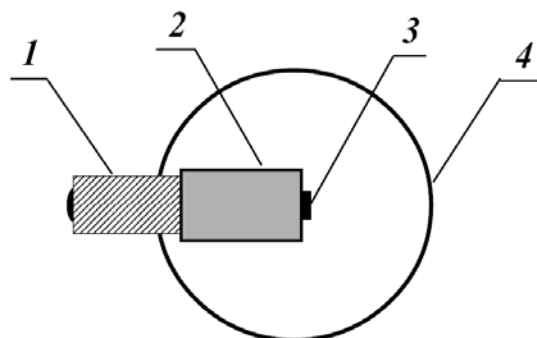
Analiza problemu

Strumień świetlny, emitowany przez oprawę oświetleniową, zbudowaną z barwnych diod LED, jest zależny od wartości strumieni świetlnych emitowanych przez poszczególne diody, wchodzące w skład tej oprawy. Wartość strumienia świetlnego, emitowanego przez każdą z nich, w skutek zmian ich temperatury może zmieniać się w czasie. Zakładając najbardziej skomplikowany przypadek, gdy każda z diod emituje inną długość fali, w czasie normalnej pracy oprawy oświetleniowej należy ciągle kontrolować wartość strumienia świetlnego emitowanego przez każdy LED, i w przypadku zmian korygować odpowiednio wartość natężenia płynącego przez tą diodę prądu.

Rozwiązanie tego zagadnienia jest możliwe np. poprzez wykorzystanie wielu detektorów promieniowania świetlnego, i odpowiednich filtrów barwnych. Jest to jednak, zbyt kosztowna metoda, w zastosowaniach np. w sprzęcie powszechnego użytku. Innym sposobem kontrolowania emitowanego strumienia świetlnego, jest wykorzystanie analizy fourierowskiej, gdy mamy do czynienia z impulsowym zasilaniem LED-ów [4,5]. Dzięki, dobrze

rozwinętym metodom cyfrowej analizy sygnału oraz dużej dostępności i niewielkim cenom procesorów DSP, rozwiązanie takie nie jest kosztowne, a dzięki temu także możliwe do wykorzystania w sprzęcie produkowanym na skalę masową.

Ze względu na konieczność kontroli strumienia świetlnego, emitowanego przez każdy z LED-ów oprawy, konieczne jest wbudowanie w nią detektora promieniowania świetlnego w taki sposób, by docierało do niego światło emitowane przez każdą z diod. Przykład odpowiedniego rozwiązania konstrukcyjnego został zaprezentowany schematycznie na rysunku 1.



Rys.1. Budowa oprawy oświetleniowej. 1 – uchwyty, 2 – barwne diody LED, 3 – detektor promieniowania optycznego, 4 –klosz z mlecznego szkła

Założmy, że oprawa oświetleniowa zbudowana jest z N zasilanych impulsowo diod LED. Przy założeniu, że strumień świetlny emitowany przez n -tą diodę ($n = 1, 2, \dots, N$) w chwili czasu t jest równy Φ_n , to strumień świetlny docierający do powierzchni detektora jest równy:

$$(1) \quad \Phi(t) = \sum_{n=1}^N a_n \Phi_n(t),$$

W zależności (1) a_n oznacza współczynnik zależny od położenia n -tej diody względem detektora.

Przy założeniu, że długość fali, przy której rozkład widmowy promieniowania n -tej diody ma maksimum w λ_n , sygnał napięciowy detektora (w chwili czasu t) jest opisany zależnością (2), w której $s(\lambda)$ jest funkcją czułości widmowej detektora.

$$(2) \quad U(t) = \Phi(t) s(\lambda_n) = \sum_{n=1}^N a_n s(\lambda_n) \Phi_n(t)$$

Ponieważ, funkcja $U(t)$ jest zależna od wartości strumienia świetlnych, emitowanych przez wszystkie diody LED w oprawie, to przy założeniu, że znane są częstotliwości impulsów zasilających poszczególne diody, analiza widma częstotliwości występujących w przebiegu $U(t)$ może pozwolić na wyznaczenie wartości strumienia świetlnego, jakie emituje każda dioda. Transformata Fouriera $u(f)$ funkcji $U(t)$ pozwala wyznaczyć widmo częstotliwości występujących w $U(t)$.

$$(3) \quad u(f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} U(t) \exp(-2\pi i f t) dt,$$

gdzie i oznacza jednostkę urojoną.

Nie pozwala ona jednak, na analizę zmian tego widma w czasie. Taką analizę umożliwia funkcja:

$$(4) \quad \bar{u}(f, \tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} U(t) g(t - \tau) \exp(-2\pi i f t) dt,$$

przy czym, na ogół wybiera się taką funkcję g , by

$$\int_{-\infty}^{+\infty} g^2(t) dt = 1.$$

Funkcja $\bar{u}(f, \tau)$ pozwala na analizę widma częstotliwości występujących w $U(t)$ w chwili czasu τ .

W praktyce, nie mamy możliwości wyznaczenia analitycznej postaci funkcji $U(t)$, możemy wyznaczyć jedynie zbiór dyskretnych wartości pomiarów U_k w pewnych chwilach czasu t_k .

Załóżmy, że od chwili czasu τ do $\tau + T$, w równych odstępach czasu, dokonujemy K pomiarów wartości napięcia na detektorze. Dyskretna transformata Fouriera wynosi wtedy:

$$(5) \quad u_{m,\tau} = \frac{1}{\sqrt{K}} \sum_{k=0}^{K-1} U_k \exp\left(-\frac{2\pi i m k}{K}\right),$$

gdzie: $m = 0, 1, \dots, K - 1$.

Pozwala ona wyznaczyć amplitudy sygnałów o częstotliwościach:

$$(6) \quad f_m = \frac{m}{T}$$

w widmie sygnału $U(t)$ w chwili czasu $t = \tau$

Gdyby każda dioda LED w rozpatrywanej oprawie oświetleniowej była zasilana przebiegiem prostokątnym o stałym współczynniku wypełnienia (równym np. 50%) i odpowiednio dobranej częstotliwości, to można by mierząc okresowo napięcie na jednym detektorze wbudowanym w tę oprawę wyznaczyć wielkość proporcjonalną do wartości strumienia świetlnego emitowanego przez każdą z tych diod, a zmieniając odpowiednio amplitudę impulsów (wartości prądów) zasilających poszczególne diody – stabilizować wartość strumienia świetlnego, jaki one emitują.

Należy też zająć się zagadnieniem optymalnego doboru częstotliwości przebiegów zasilających diody. W tym celu ponumerujemy N diod LED, tej oprawy oświetleniowej, odpowiednio numerami od 1 do N . Niech f_n oznacza częstotliwość przebiegu zasilającego n -tą diodę ($n = 1, 2, \dots, N$).

Częstotliwości f_n powinny spełniać łącznie następujące warunki:

1. Wszystkie częstotliwości f_n powinny być niezmiennie w czasie oraz być na tyle duże, by użytkownik oprawy nie obserwował nieprzyjemnego i męczącego wzrok zjawiska migotania światła; oznacza to, że $f_n > 300$ Hz.
2. $f_n < \frac{f_0}{2}$ (f_0 oznacza częstotliwość próbkowania napięcia na detektorze).
3. Dla każdej pary liczb n, l powinien być spełniony warunek, że jeżeli $n \neq l$, to $f_n \neq f_l$, tzn. każda dioda jest zasilana przebiegiem o innej częstotliwości.
4. Żadna z częstotliwości f_n nie jest wielokrotnością jakiegokolwiek częstotliwości f_l , ($l = 1, 2, \dots, n-1, n+1, \dots, N$). impulsów zasilających pozostałe diody w oprawie.
5. Każda z częstotliwości f_n powinna być całkowitą wielokrotnością ilorazu częstotliwości próbkowania f_0 i ilości próbek K poddawanej analizie w transformacie Fouriera.

Spełnienie warunków 1-4, pozwoli na wyznaczenie, przy wykorzystaniu dyskretnej transformaty Fouriera, amplitud sygnałów o częstotliwościach f_n w widmie częstotliwości sygnału $U(t)$, które są proporcjonalne do wartości strumienia świetlnego emitowanego przez diody LED. Warunek 5 zaś jest bardzo istotny ze względu na dokładność wyznaczania tych amplitud, gdyż jego zaniedbanie spowoduje „rozmycie” prążków widmowych, przejawiające się w niezerowych wartościach prążków widma, w bezpośrednim otoczeniu częstotliwości f_n - jest to tzw. efekt przecieku (*leakage*) widma.

Przy zachowaniu powyższych warunków, dokładność cyfrowego przetwarzania sygnałów jest bardzo duża. W literaturze problemu opisane są metody pozwalające na rozwiązywanie o wiele bardziej złożonych problemów, np. detekcję bardzo słabych sygnałów w sygnale o dużym poziomie szumu [6], czy też wykorzystania systemu oświetlenia pomieszczenia zbudowanego z użyciem białych diod LED do bezprzewodowej komunikacji w tym pomieszczeniu [7].

Wyznaczanie transformat Fouriera za pomocą równania (5) wymaga, wykonania dość dużej ilości obliczeń. Może stanowić to pewien problem w praktycznym zaimplementowaniu zaproponowanej metody sterowania, zasilaniem barwnych LED-ów oprawy oświetleniowej. Jeżeli oprawa zbudowana jest z N diod LED i w celu kontroli wartości emitowanego przez nie strumienia świetlnego, musimy poddać analizie K wartości napięcia z detektora, to wyliczając amplitudy sygnałów o częstotliwościach f_n zgodnie ze wzorem (5), musimy wykonać $L = KN$ operacji mnożenia i dodawania. Ponieważ $K > N$, to przy dużej liczbie diod w oprawie, pojawia się problem: czy przy zastosowaniu procesora sygnałowego DSP będzie to możliwe w dostatecznie krótkim czasie? Problem ten znacznie uprasza się, gdy do wyznaczania transformaty Fouriera, stosujemy jeden z algorytmów szybkiej transformaty Fouriera, opisanych w uznawanych za klasyczne pracach twórców tych metod: Cooleya, Tukeya [8], Gentlemana i Sande [9], Gooda [10,11], Bruuna [12], Murakami [13], Radera [14] oraz Bluesteina [15]. Główna

idea algorytmów szybkiej transformaty Fouriera opisana jest w [8,9]. Algorytmy te wykorzystują znaną powszechnie właściwość funkcji wykładniczych $e^{a+b} = e^a e^b$.

Najłatwiej ideę algorytmów szybkiej transformaty Fouriera można zrozumieć, gdy $K = 2^p$, gdzie p oznacza liczbę naturalną. Wówczas równanie (5) możemy przepisać w postaci:

$$(7) \quad u_{m,\tau} = \frac{1}{\sqrt{K}} \sum_{k=0}^{\frac{K-1}{2}} U_k \exp\left(-\frac{2\pi i m k}{K}\right) + \frac{1}{\sqrt{K}} \sum_{k=\frac{K}{2}}^{K-1} U_k \exp\left(-\frac{2\pi i m k}{K}\right)$$

Ponieważ $e^{a+b} = e^a e^b$, powyższe równanie możemy zapisać jako:

$$(8) \quad u_{m,\tau} = \frac{1}{\sqrt{K}} \sum_{k=0}^{\frac{K-1}{2}} U_k \exp\left(-\frac{2\pi i m k}{K}\right) + \frac{1}{\sqrt{K}} \sum_{k=0}^{\frac{K-1}{2}} U_{k+\frac{K}{2}} \exp(-\pi i m) \exp\left(-\frac{2\pi i m k}{K}\right)$$

Z powyższego równania otrzymujemy:

$$(9) \quad u_{m,\tau} = \frac{1}{\sqrt{K}} \sum_{k=0}^{\frac{K-1}{2}} \left[U_k + (-1)^m U_{k+\frac{K}{2}} \right] \exp\left(-\frac{2\pi i m k}{K}\right)$$

Przeprowadzona wyżej analiza pozwoliła na 2-krotne, w porównaniu do pierwotnej metody, zmniejszenie liczby operacji mnożenia, potrzebnych do wyznaczenia transformaty Fouriera. Kontynuując rozważania według powyższego schematu, z równania (9) można uzyskać:

$$(10) \quad u_{m,\tau} = \frac{1}{\sqrt{K}} \sum_{k=0}^{\frac{K-1}{4}} \left[U_k + (-i)^m U_{k+\frac{K}{4}} + (-1)^m U_{k+\frac{K}{2}} + (i)^m U_{k+\frac{3K}{4}} \right] \exp\left(-\frac{2\pi i m k}{K}\right)$$

Oznacza to 4-krotną redukcję niezbędnych operacji mnożenia w porównaniu z równaniem (5). Kontynuując opisane rozważania można uzyskać dalszą redukcję złożoności numerycznej problemu. Przy wykorzystaniu algorytmu szybkiej transformaty Fouriera, w przypadku, gdy $K = 2^p$, gdzie p oznacza liczbę naturalną, liczba mnożeń potrzebnych do wyznaczenia wartości $u_{m,\tau}$ jest równa $\log_2 K$. W przypadku rozważanej oprawy oświetleniowej oznacza to, że wyznaczenia amplitud sygnałów o częstotliwościach f_n , potrzebnych do sterowania zasilaniem LED-ów w tej oprawie wymaga nie $L = KN$, a jedynie $L = N \log_2 K$ operacji mnożenia. Dzięki temu możliwe jest znaczne skrócenie czasu obliczeń, co jest bardzo istotne w przypadku opraw zbudowanych z dużej liczby diod LED.

Podsumowanie

Należy spodziewać się, że popularność opraw oświetleniowych, wykorzystujące diody LED będzie stale rosła. Oprawy oświetleniowe, wykorzystujące barwne diody, z możliwością łatwego kształtowania ich charakterystyki

widmowej, powinny zainteresować bardziej wymagających użytkowników.

Zaprezentowana metoda, sterowania zasilaniem barwnych LED-ów oprawy oświetleniowej, pozwala na utrzymanie stałej wartości strumienia świetlnego, emitowanego przez tą oprawę. Dzięki wykorzystaniu cyfrowego przetwarzania sygnałów poprzez procesory sygnałowe DSP, zaprezentowane rozwiązanie jest proste i tanie. Może znaleźć ono zastosowanie do produkcji wysokiej klasy opraw oświetleniowych, w których źródłem światła byłyby barwne LED-y.

LITERATURA

- [1] Fryc I.: Źródło światła o kształtowanej charakterystyce widmowej, *Wydawnictwa Politechniki Białostockiej*, Białystok 2006
- [2] Fryc I.: Źródło światła z możliwością kształtowania rozkładu widmowego emitowanego promieniowania, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2007), z.temat. nr 5, 17-19
- [3] Mozyrska D., Wyrwas M., Fryc I.: Wyznaczanie parametrów kolorymetrycznych LEDa w pełnym zakresie temperatur pracy, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2012), nr 4a, 232-234
- [4] Yang H., Bermans J. W. M., Schenk T. C. W.: Illumination Sensing in LED Lighting Systems Based on Frequency-Division Multiplexing, *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 57, (2009), No. 11, 4269 - 4281
- [5] Yang H., Schenk T. C. W., Bermans J. W. M.: Pandharipande A., Enhanced Illumination Sensing Using Multiple Harmonics for LED Lighting Systems, *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 58, (2010), No. 11, 5508 - 5522
- [6] Bresler Y., Makovski A.: Exact Maximum Likelihood Parameter Estimation of Superimposed Exponential Signals in Noise, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. ASSP-34, No. 5, (1986), 1081 - 1089
- [7] Komine T., Nakagawa M.: Fundamenta Analysis for Visible-Light Communication System using LED Lights, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol. 50, No. 1, (2004), 100 - 107
- [8] Cooley J. W.; Tukey J. W.: An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series, *Math. Comput.* 19 (90), (1965), 297-301
- [9] Gentleman W. M., Sande G.: Fast Fourier transforms—for fun and profit, *Proc. AFIPS* 29, (1966), 563-578
- [10] Good, I. J.: The interaction algorithm and practical Fourier analysis. *J. R. Statist. Soc. B* 20 (2), (1958), 361-372
- [11] Good, I. J.: The interaction algorithm and practical Fourier analysis: As Addendum", *J. R. Statist. Soc.* 22 (2), (1960), 373-375
- [12] Bruun G.; z-Transform DFT filters and FFTs", *IEEE Trans. on Acoustics, Speech and Signal Processing* (ASSP) 26 (1), (1978), 56-63
- [13] Murakami H., "Real-valued fast discrete Fourier transform and cyclic convolution algorithms of highly composite even length," *Proc. ICASSP* 3, (1996), 1311-1314
- [14] Rader C. M., Discrete Fourier transforms when the number of data samples is prime, *Proc. IEEE* 56, (1968), 1107-1108
- [15] Bluestein L. I., A linear filtering approach to the computation of the discrete Fourier transform, *Northeast Electronics Research and Engineering Meeting Record* 10, (1968), 218-219

Autorzy:

dr inż. Eugeniusz Czech, Politechnika Białostocka, Studium Fizyki, ul. Wiejska 45a, 15-351 Białystok, e-mail: eczech@plusnet.pl
dr hab. inż. Irena Fryc, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, Katedra Optoelektroniki i Techniki Światłowej ul. Wiejska 45d, 15-351 Białystok, e-mail: i.fryc@pb.edu.pl