

Lampa LED o regulowanej temperaturze barwowej

Streszczenie. Zastosowanie lamp o regulowanej temperaturze barwowej jest bardzo szerokie. Coraz częściej stosuje się je w instalacjach oświetlenia ogólnego (np. hotele, biura, centra handlowe), ale także wykorzystywane są do badań naukowych i w defektoskopii. Istotnym obszarem zastosowań jest medycyna. Odpowiednio dobrana temperatura barwowa lampy umożliwi łatwe zobrazowanie uszkodzonych lub patologicznych tkanek, tym samym ułatwiając pracę lekarzy (np. chirurgów podczas operacji, gdzie światło o odpowiedniej temperaturze barwowej lepiej kontrastuje pole operacyjne). W komunikacie opisano nowoczesne sposoby budowy takich lamp wykorzystujące technologię SSL. Przedstawiono i omówiono wyniki badań trzech konfiguracji lampy z regulacją temperatury barwowej, ze szczególnym uwzględnieniem zgodności otrzymanych parametrów chromatycznych z tzw. krzywą Plancka zobrazowaną na płaszczyźnie barw CIE1931.

Abstract. Lamps with color temperature control have a wide area of application. They are used more and more often not only in general purpose lighting installations (e.g. hotels, offices, shopping centres), but also in research facilities and for fault detection. Medical applications are very important as well. A properly chosen color temperature of the lamp ensures easy imaging of damaged or pathological tissues, facilitating decisions made by doctors (e.g. light with a suitable color temperature ensures better contrast in the operational field for surgeons). This report shortly describes modern methods of designing such lamps with the use of the SSL technology (Solid State Lighting). Then experimental results for three configurations of a lamp with color temperature control are presented, with a particular attention paid to the conformity of the obtained chromatic parameters with the Planckian locus on the CIE1931 chromaticity diagram. (**LED lamp with color temperature control**).

Słowa kluczowe: LED, SSL, wskaźnik CRI, wskaźnik Ra, wskaźnik CQS, temperatura barwowa, CCT, modulacja PWM.

Keywords: LED, SSL, CRI, index Ra, CQS, color temperature, CCT, PWM.

Wprowadzenie

Tradycyjne konstrukcje lamp o regulowanej temperaturze barwowej budowane są w oparciu o żarowe lub fluorescencyjne źródło światła białego i kolorowe przesłony tłumiące określony zakres widma. Najnowsze technologie (technologia SSL – ang. Solid State Lighting) umożliwiają wytworzenie źródeł światła białego o z góry zadanej temperaturze barwowej, tj. konkretnej wartości kategorii CCT (ang. Correlated Color Temperature). Półprzewodnikowe źródła światła charakteryzują się bardzo dużą skutecznością świetlną oraz znaczną trwałością. Czołowi producenci „białych” diod LED deklarują, że w określonych warunkach pracy ich wydajność świetlna przekracza 150 lm/W przy trwałości powyżej 50 tys. godzin. Warto zaznaczyć, że w przypadku diod LED kryterium trwałości definiowane jest znacznie ostrzej niż wobec pozostałych źródeł światła. Czas życia (ang. lifetime), to czas w którym strumień światła obniży się do 70% swojej początkowej wartości. W przypadku klasycznych technologii (np. lampy halogenowe czy fluorescencyjne) stosuje się pojęcie średniego czasu życia, tj. czasu, w którym wartość strumienia światła obniży się o połowę. Jedną z przyczyn takiego podejścia jest fakt, że moduły LED (np. płyty PCB z zalutowanymi diodami i stabilizatorami prądu) uznaje się raczej za niewymienne, wobec czego powinny zapewnić prawidłowe funkcjonowanie lampy przez cały okres jej użytkowania.

Istotną zaletą źródeł wykonanych w technologii SSL jest łatwa regulacja strumienia światła w bardzo szerokich granicach. Możliwe są dwa rozwiązania. Pierwsze bazuje na układach z modulacją PWM (ang. Pulse Width Modulation). Drugie, to regulacja wartości prądu stałego przepływającego przez diodę LED. Oba sposoby mają swoje zalety i wady. Metoda bazująca na modulacji PWM w mniejszym stopniu wpływa na parametry chromatyczne diody LED [1, 2], jednak w wyniku jej zastosowania otrzymamy lampę, której strumień światła jest komutowany, i która w określonych warunkach może spowodować efekty stroboskopowe. Zwykle częstotliwość komutacji nośnej PWM ustawia się na możliwie wysokim poziomie (250 Hz – 4 kHz). Górnym ograniczeniem jest wymagana sprawność elektronicznego układu bloku mocy sterującego diodami oraz poziom emitowanych zaburzeń radioelektrycznych,

natomiast dolna granica to wspomniane zjawiska stroboskopowe [3].

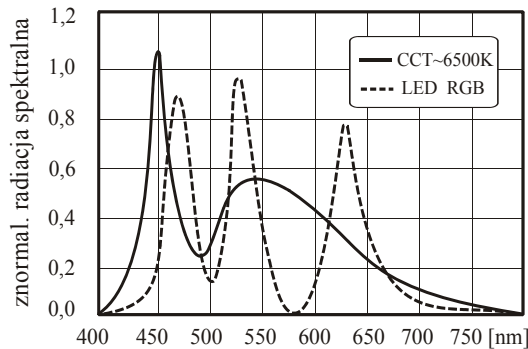
W lampach z regulowaną temperaturą barwową wykorzystanie modulacji PWM wydaje się bardziej celowe. Przede wszystkim pozwala uzyskać możliwie najszerszy zakres regulacji strumienia światła oraz minimalizuje wpływ wartości prądu przewodzenia diody na zmianę jej parametrów chromatycznych (komutowana jest stała wartość prądu). Istotnym okazuje się także niski stopień złożoności układu elektronicznego sterującego diodami LED, a przede wszystkim łatwy sposób połączenia go z systemem mikroprocesorowym.

Najczęściej lampę LED o regulowanej temperaturze barwowej wykonuje się na jeden z czterech sposobów [4, 5, 6]:

- poprzez zastosowanie diod LED emitujących światło monochromatyczne RGB (czerwone, zielone i niebieskie);
- poprzez zastosowanie diod LED emitujących światło białe neutralne (np. CCT≈4000K) oraz diod monochromatycznych RGB;
- poprzez zastosowanie diod LED emitujących światło białe zimne (np. CCT≈6500K) oraz diod monochromatycznych R i G (tj. emitujących światło czerwone i zielone);
- poprzez zastosowanie diod LED emitujących światło białe o różnej temperaturze barwowej (np. z CCT: 2700K i 6500K).

Pierwsza z wymienionych metod obecnie nie powinna być zalecana. Jej główną zaletą był niski koszt wykonania – do niedawna ceny „białych” diod LED o dobrych parametrach były wysokie, a ich trwałość znacznie niższa od trwałości diod monochromatycznych. Uzyskane jednak w ten sposób światło białe będzie postrzegane jako bardzo nienaturalne. Duże pofalowanie czy też nieciągłość charakterystyki widmowej diody RGB spowodują, że wzmocnieniu ulegają głównie barwy podstawowe, pozostałe natomiast zostaną stłumione lub przekłamane. Wskaźnik oddawania barw, oznaczony jako R_a lub CRI (ang. Color Rendering Index) w tym przypadku będzie miał najniższą wartość [6]. Prosta modyfikacja opisanego rozwiązania, polegająca na zastosowaniu dodatkowego źródła emisji światła białego znacznie poprawia wartość parametru CRI. W takim ulepszonym rozwiązaniu należy zastosować dodatkową diodę emitującą światło białe, np. neutralne, i za

pomocą niewielkich tylko „domieszek” światła diody RGB uzyskać wymaganą temperaturę barwową. Widmo diody białej (charakterystyka zamieszczona na rysunku 1) jest widmem ciągłym, co istotnie wpływa na prawidłowe odwzorowanie barw. Podobny efekt można uzyskać poprzez zastosowanie diody emitującej światło białe zimne i tylko dwóch diod monochromatycznych emitujących światło czerwone i zielone [6]. Ze względu na swoją konstrukcję dioda LED z wartością parametru CCT $\approx 6500\text{K}$ lub wyższą, zawiera już w swojej charakterystyce widmowej znaczące składniki barwy niebieskiej (wierzchołek tego pasma to ok. 450 nm).

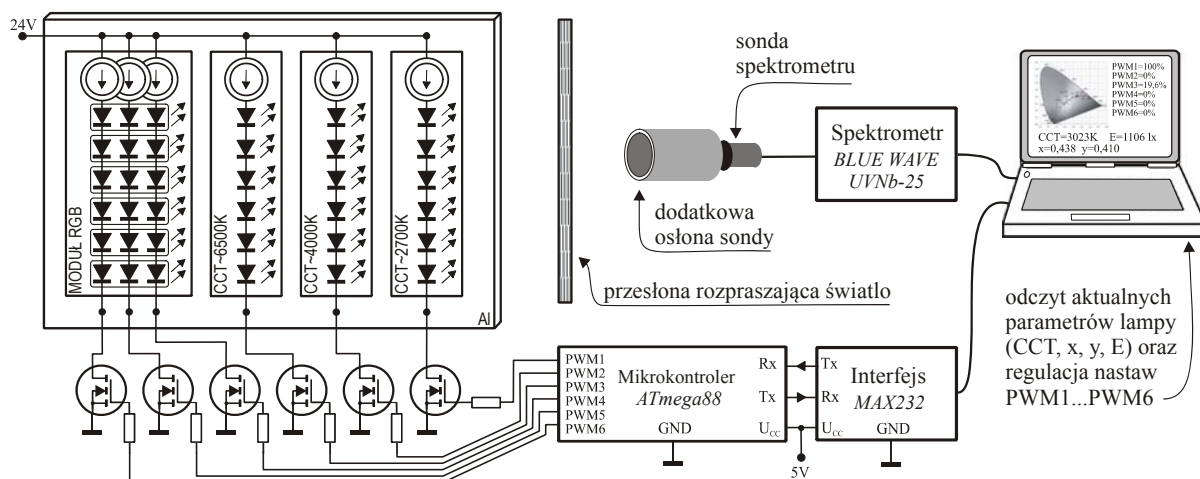


Rys. 1. Zmierzone charakterystyki widmowe diod LED: „białej” oraz diody RGB

Czwarty z wymienionych sposobów wymaga użycia tylko dwóch rodzajów diod LED emitujących światło z granicznymi wartościami parametru CCT wymaganego zakresu regulacji. Zwykle będą to diody z CCT $\approx 2700\text{K}$ i diody z CCT $\approx 6500\text{K}$. Zsumowanie obu strumieni z odpowiednio korygowanymi współczynnikami wagowymi umożliwi uzyskanie oczekiwanej wartości temperatury barwowej [5].

Pomiar wartości CCT różnych wariantów lampy LED

Na rysunku 2 przedstawiono model lampy LED, który posłużył do przetestowania różnych metod regulacji



Rys. 2. Stanowisko pomiarowe do testowania różnych konfiguracji lampy LED o regulowanej temperaturze barwowej

W tabeli 1 zamieszczono rezultaty pomiarów trzech przebadanych konfiguracji lampy LED o regulowanej temperaturze barwowej. Dane zamieszczone w dwóch pierwszych wierszach wyników pozwalają na określenie udziału emisji poszczególnych modułów LED w całkowitym strumieniu światła. Wyznaczone na ich podstawie

temperatury barwowej. Wykorzystano napięciowe moduły LED światła białego z kategorii CCT: 2700K, 4000K, 6500K oraz moduł RGB ze zmierzoną dominującą długością fali λ_{DOM} : 624 nm (czerwona), 528 nm (zielona) i 467 nm (niebieska). Wstępne ustawienie wartości strumienia światła poszczególnych źródeł wykonano poprzez niewielką korekcję prądu zasilania każdego modułu (dla PWM = 100%). Starano się maksymalnie ograniczyć wpływ temperatury na zmianę parametrów chromatycznych diod LED. Moduły zostały zamocowane na płycie aluminiowej pełniącej rolę radiatora o dużej pojemności cieplnej, natomiast pomiary wykonywano w możliwie krótkim czasie. Jako sterownik mikroprocesorowy zastosowano mikrokontroler ATmega88 firmy Atmel. Posiada on konfigurowalne liczniki mogące pracować w trybie sześciu niezależnych kanałów PWM z ośmiobitową rozdzielczością. Poszczególne wyjścia PWM, za pośrednictwem tranzystorów HEXFET pełniących rolę kluczy elektronicznych, sterowały strumieniem światła każdego modułu LED. Ośmiobitowa rozdzielczość umożliwia regulację strumienia w zakresie 0-100% z krokiem 0,4%. Częstotliwość generowanego przebiegu PWM we wszystkich kanałach ustawiono na 250 Hz. Do pomiaru parametrów fotometrycznych wykorzystano nowoczesny spektrometr BLUE WAVE UVNb-2. Sygnał z czujnika spektrometru poddany był korekcji zgodnej z ustandaryzowaną krzywą czułości ludzkiego oka dla widzenia fotonowego.

Na tak wykonanym stanowisku laboratoryjnym możliwy był ciągły pomiar temperatury barwowej każdej testowanej konfiguracji lampy oraz zobrazowanie zmierzonej wartości parametru CCT w przestrzeni barw CIE1931. Za pomocą zmiany współczynnika wypełnienia sygnału PWM_i (każdego kanału z osobna) sterowano wielkością strumienia światła poszczególnych modułów LED. Starano się uzyskać zakres regulacji temperatury barwowej od 2700K do 6500K przy zachowaniu maksymalnej luminancji. Równie istotna była też informacja, czy uzyskana wartość parametru CCT pokrywała się z punktami stanowiącymi tzw. krzywą Plancka.

współczynniki kalibracyjne (k_i) umożliwią przeliczenie wyników i opracowanie algorytmów sterujących także dla źródeł różniących się jasnością od zastosowanych na stanowisku laboratoryjnym. Całkowity strumień światła lampy będzie zgodny ze wzorem:

$$(1) \quad \Phi_{cal.} = \sum_{i=1}^n PWM_i \cdot k_i \cdot \Phi_i$$

gdzie: n jest liczbą modułów LED, k_i współczynnikiem kalibracyjnym (uzależnionym od geometrii i układu optycznego lampy), natomiast Φ_i to strumień światła kolejnego modułu LED (dla $PWM_i = 100\%$). Strumień i natężenie światła w tym samym układzie optycznym są wielkościami liniowo zależnymi. W takim przypadku, do

wyznaczenia względnych zmian strumienia światła wystarczy tylko pomiar natężenia oświetlenia.

Badania przeprowadzono w trzech seriach. Każdą rozpoczynano od regulacji właściwych współczynników PWM_i , tak aby otrzymać temperaturę barwową 4000K dla jak największej jasności modułu LED światła białego. Dzięki temu możliwe jest uzyskanie światła o dużej wartości parametru CRI przy zachowaniu wysokiej rozdzielczości regulacji.

Tabela 1. Wyniki pomiarów trzech wariantów lampy LED o regulowanej temperaturze barwowej

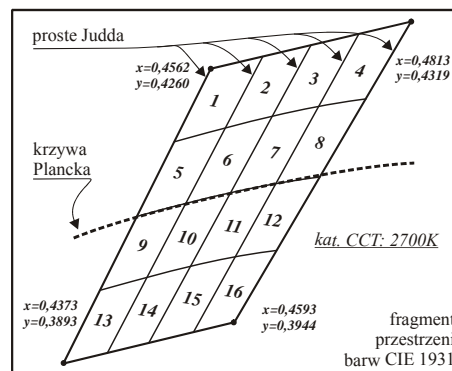
Oczekiwana temp. barwowa	LED 4000K oraz LED RGB						LED 6500K oraz LED RG					LED 2700K i 6500K			
	PWM ₂ LED 4000K	PWM ₆ LED RED	PWM ₅ LED GREEN	PWM ₄ LED BLUE [%]	Natężenie światła	Zgodność z k. Plancka	PWM ₃ LED 6500K	PWM ₆ LED RED	PWM ₅ LED GREEN	Natężenie światła	Zgodność z k. Plancka	PWM ₁ LED 2700K	PWM ₃ LED 6500K	Natężenie światła	Zgodność z k. Plancka
	[K]	[%]	[%]	[%]	[lx]	t/n	[%]	[%]	[%]	[lx]	t/n	[%]	[%]	[lx]	t/n
kal.	100	0	0	0	960	-	0	100	0	145	-	100	0	910	-
kal.	0	0	0	100	56	-	0	0	100	284	-	0	100	950	-
2700	27	100	56	0	570	t	14	100	56	440	t	100	2	930	t
2800	32	100	57	0	620	t	17	100	57	470	t	100	7	980	t
2900	38	100	57	0	680	t	20	100	58	500	t	100	14	1050	t
3000	48	100	58	0	780	t	22	100	58	520	t	100	20	1100	n
3100	55	100	61	0	850	t	24	100	60	550	t	100	27	1170	n
3200	64	100	63	0	950	t	27	100	61	580	t	100	34	1230	n
3300	82	100	63	0	1120	t	29	100	62	600	t	100	42	1310	n
3400	100	98	63	0	1290	t	31	100	64	630	t	100	51	1400	n
3500	100	74	48	0	1210	t	35	100	64	660	t	100	59	1490	n
3750	100	31	22	0	1070	t	45	100	64	760	t	100	85	1720	n
4000	100	2	3	0	970	t	55	100	67	860	t	84	100	1720	n
4250	100	0	7	8	980	t	71	100	67	1020	t	65	100	1540	n
4500	100	0	14	15	1010	t	92	100	67	1220	t	50	100	1400	n
4750	100	0	21	20	1030	t	100	82	54	1230	t	38	100	1300	t
5000	100	0	26	27	1050	t	100	60	38	1150	t	29	100	1220	t
5250	100	0	29	36	1070	t	100	43	25	1090	t	22	100	1150	t
5500	100	0	36	41	1090	t	100	29	16	1040	t	15	100	1090	n
5750	100	0	40	47	1110	t	100	16	4	980	t	10	100	1040	n
6000	100	0	43	55	1120	t	100	8	0	960	t	6	100	1000	n
6250	100	0	45	62	1130	t	100	3	0	950	n	2	100	970	n
6500	100	0	47	69	1140	t	100	0	0	950	n	0	100	950	n

Podsumowanie

W pomiarach wykorzystano moduły LED zawierające nowoczesne diody świecące jednego z największych europejskich producentów. W przypadku diod LED światła białego, zmierzone temperatury barwowe poszczególnych modułów wyniosły: 2672K ($x = 0,462$; $y = 0,411$), 4013K ($x = 0,380$; $y = 0,377$), oraz 6411K ($x = 0,314$; $y = 0,332$) przy $CRI \approx 85$. Należy wyjaśnić, że producenci półprzewodnikowych źródeł światła zazwyczaj nie oferują konkretnej temperatury barwowej, a jedynie kategorię tej temperatury z dokładniejszą już selekcją opisaną w karcie katalogowej wyrobu. Przykładowo: kategoria 2700K składała się z szesnastu dodatkowych podziałów, tzw. selekcji (rys. 3).

Wierzchołki obszarów poszczególnych selekcji będą zwykle opisane współrzędnymi chromatycznymi przestrzeni barw CIE1931. Należy zaznaczyć, że jednoznaczne pojęcie temperatury barwowej powinno być używane tylko w odniesieniu do tych źródeł, których odwzorowanie w przestrzeni barw pokrywa się z krzywą Plancka. W przypadku pozostałych – zazwyczaj gorszych – źródeł światła powinno się używać pojęcia tzw. najbliższej temperatury barwowej. Łatwo jednak wykazać, że najbliższa temperatura barwowa nie jest określeniem jednoznacznym i te same wartości mogą być przypisane

lampom o zauważalnie różnym odcieniu światła białego (np. lampa zawierająca diody z selekcji „1” i lampa zawierająca diody z selekcji „13”). Dlatego też podczas przeprowadzania

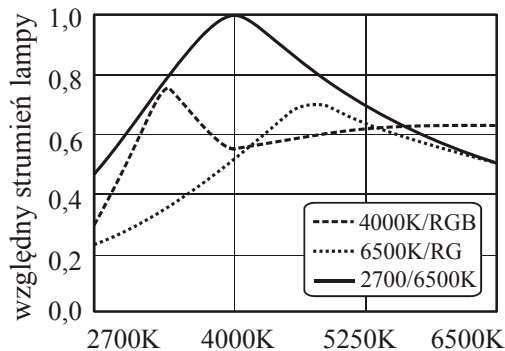


Rys. 3. CCT = 2700K z dokładniejszym podziałem na selekcje diod LED

badania, za bardzo istotną informację uznano fakt uzyskanej zgodności z krzywą Plancka. Ważną właściwością każdego źródła światła jest jego zdolność do prawidłowego

odzworowania barw oświetlanych obiektów. Poprzez pomiar samego parametru CRI nie zawsze jednak uzyskamy prawidłowe rezultaty. Przy porównywaniu różnego rodzaju źródeł światła białego (np. diody RGB i diody LED „białej”) wystąpią przypadki, w których wyższą wartość CRI uzyska lampa gorsza [7]. Znacznie lepszym wydaje się, zaproponowany przez National Institute of Standards and Technology parametr CQS (ang. Color Quality Scale). Wskaźnik ten jest podobny do CRI, pozbawiony jest jednak jego istotnych wad. Przede wszystkim zwiększono liczbę tablic kontrolnych, a ich kolory obejmują dużo większy zakres widma i są bardziej nasycone [8]. Niestety producent użytego spektrometru nie udostępnił jeszcze oprogramowania, które na podstawie mierzonego widma umożliwiłoby wyznaczenie wartości parametru CQS [7].

Na rysunku 4 zamieszczono wykresy względnych zmian maksymalnego strumienia światła w funkcji temperatury barwowej (dane z tabeli 1). W każdej tego typu lampie pożądana jest możliwość niezależnej regulacji CCT oraz jasności. Jedynym sposobem uniknięcia korelacji pomiędzy tymi wielkościami jest odpowiednio dobrany algorytm sterujący współczynnikami PWM_i. Uzyskanie wymaganej temperatury barwowej wymaga ustawienia właściwych proporcji pomiędzy poszczególnymi kanałami PWM_i, natomiast regulacja całkowitego strumienia światła może odbywać się poprzez równoczesną i proporcjonalną zmianę wszystkich nastaw PWM_i. Istnieje jeszcze problem optymalnego dobrania modułów świecących LED. Analizując dane z tabeli 1 łatwo zauważyć, że maksymalny strumień światła modułu RGB nie jest dobrany optymalnie. Maksymalna jasność składowej niebieskiej i zielonej jest zbyt wysoka (PWM₄ i PWM₅ zawsze jest mniejsze od 70%), z kolei światło czerwone okazuje się zbyt słabe. Chcąc zachować właściwe proporcje pomiędzy kanałami PWM_i (np. dla uzyskania CCT ≈ 2700K) konieczna staje się redukcja światła diody „białej” i w konsekwencji znaczące osłabienie całkowitego strumienia (wykresy na rys. 4; dotyczy tylko charakterystyk 4000K/RGB i 6500K/RGB).



Rys. 4. Znormalizowane charakterystyki maks. strumienia światła testowanych lamp

Zaprezentowane w niniejszej pracy wyniki pomiarów zawierają wiele informacji, które będą przydatne dla projektantów opracowujących własne modele lamp z regulowanym CCT. Dane ujęte w tabeli 1 stanowią

podstawę do stworzenia oprogramowania sterującego pracą modułów LED, natomiast po wykonaniu prostych przeliczeń współczynników PWM_i można także wyznaczyć optymalne jasności składowych RGB dla dowolnie założonej wielkości strumienia światła lampy. Podczas przeprowadzania pomiarów starano się minimalizować wpływ temperatury na parametry chromatyczne diod LED. W przypadku, gdy tego wpływu nie uda się uniknąć należy zastosować mechanizm kompensacji. Zarówno temperatura jak i prąd zasilający diodę LED wpływają na jej parametry fotometryczne. Korygując wartość amplitudy prądu przewodzenia diody LED można (w pewnym zakresie) kompensować wpływ zmian temperatury [9].

Analizując możliwe obszary zastosowań danego wariantu lampy, wydaje się, że wersje 4000K/RGB i 6500K/RGB – z racji bardzo dokładnej regulacji CCT – będą głównie wykorzystywane w medycynie i w defektoskopii. Natomiast lampy 2700/6500K znajdują zastosowanie w instalacjach oświetlenia ogólnego z dobowym cyklem regulacji temperatury barwowej światła.

Przedstawione w tym komunikacie wyniki uzyskane zostały w ramach badań statutowych Instytutu Elektroniki.

Autorzy: dr inż. Jacek Chęciński, dr hab. inż. Zdzisław Filus, prof. Pol. Śl., Politechnika Śląska, Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki, ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice, E-mail: jacek.checinski@polsl.pl; Zdzislaw.Filus@polsl.pl.

LITERATURA

- [1] Dyle M., Narendran N., Bierman A., Klein T., Impact of dimming white LEDs: Chromaticity shifts due to different dimming methods, *Proceedings of SPIE*, (2005), Vol. 5941, 291-299
- [2] Chęciński J., Filus Z., Wpływ metody sterowania na stabilność parametrów chromatycznych diod LED, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2015/9, Wydawnictwo SIGMA-NOT
- [3] Chęciński J., Filus Z., Zaburzenia radioelektryczne generowane przez instalacje oświetleniowe LED, *Elektronika-Konstrukcja, Technologie, Zastosowania*, 2013/10, Wydawnictwo SIGMA-NOT
- [4] Lee A.T.L., Chen H.-T., Tan S.-C., Hui S.Y., Precise Dimming and Color Control of LED Systems Based on Color Mixing, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 31, No. 1, January 2016, 65-80
- [5] Chen H.-T., Tan S.-C., Hui S.Y., Nonlinear Dimming and Correlated Color Temperature Control of Bicolor White LED Systems, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 30, No. 12, December 2015, 6934-6947
- [6] Buso S., Spiazzi G., White Light Solid State Lamp with Luminance and Color Temperature Control, *The 11th Brazilian Power Electronics Conference*, Natal, Brazil, 11-15 September 2011, 837-843
- [7] Davis W., Ohno Y., Rationale of Color Quality Scale, *NIST*, June 2010
- [8] Davis W., Ohno Y., The Color Quality Scale, *Optical Engineering*, March 2010
- [9] Loo K., Lai Y., Tan S., Tse C., On the Color Stability of Phosphor-Converted White LEDs Under DC, PWM and Bilevel Drive, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 27, No. 2, February 2012, 974-984