

Wpływ metody sterowania na stabilność parametrów chromatycznych diod LED

Streszczenie. Główne zalety półprzewodnikowych źródeł światła to wysoka skuteczność świetlna oraz możliwość regulacji strumienia w bardzo szerokim zakresie. Jakość uzyskanego tą drogą oświetlenia w wielu przypadkach była zauważalnie gorsza od klasycznych rozwiązań wykorzystujących lampy fluorescencyjne czy zwykłe żarówki. Postęp technologiczny umożliwił produkcję diod LED emitujących według zapewnienia producentów: „energoozczędne światło przyjazne dla oczu”. Wielkość wskaźnika CRI najlepszych diod LED przekracza 90. Warto jednak zauważyć, że wysokie wartości współczynnika CRI i stabilności temperatury barwowej, deklarowane są w określonych warunkach pomiarowych. Rzeczywiste warunki eksploatacji mogą znacznie odbiegać od referencyjnych i tym samym wpływać na pogorszenie istotnych parametrów światła diod LED. W pracy zbadano i przedstawiono wyniki wpływu sposobu regulacji natężenia oświetlenia (regulacja prądu I_F lub modulacja PWM) na parametry chromatyczne diod LED wykorzystywanych w technice oświetleniowej.

Abstract. Main advantages of semiconductor light sources are high luminous efficacy and possibility of controlling the luminous flux over a very wide range. However, the quality of such lighting, in many cases, was noticeably poorer than that offered by classical solutions making use of fluorescent or incandescent lamps. Technological advances have made possible production of LEDs that emit light, which is, according to their manufacturers, energy saving and eyes-friendly. For the best LEDs the Colour Rendering Index (CRI) exceeds 90. Nevertheless, it is worth mentioning that high values of CRI and colour temperature stability are only obtained under predetermined measurement conditions. Real operating conditions may considerably differ from the reference ones and, therefore, cause deterioration of the most important parameters of LED lighting. In our work we have examined and described how the method of dimming, i.e. light intensity control (variation of constant current I_F or PWM), influences chromatic parameters of LEDs used in lighting technology. (Effect of the current control method on the stability of chromatic parameters of LEDs).

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

Keywords: LED, SSL, CRI, CQS, colour temperature, CCT, PWM.

Wprowadzenie

Ocena jakości białego światła diody LED nie jest sprawą prostą. O ile takie parametry jak wydajność świetlna czy charakterystyka kierunkowa diody LED są łatwo mierzalne i podlegają jednoznacznym kryteriom oceny, to w przypadku analizy samego światła białego sytuacja jest znacznie bardziej skomplikowana. Bardzo istotne znaczenie mają subiektywne wrażenia odbiorcy, np. postrzeganie barwy i odcieni bieli. W technice oświetleniowej podczas wyboru światła białego najczęściej bierze się pod uwagę dwa parametry. Pierwszym jest tzw. temperatura barwowa: CCT (ang. *Correlated Colour Temperature*). W przestrzeni barw (np. historycznej już CIE1931 z naniesionym trójkątem barw) wyszczególnione są odcinki określone jako temperatura barwowa światła białego. Powiązanie z temperaturą wynika z podobieństwa analizowanego promieniowania do promieniowania emitowanego przez ciało doskonale czarne w określonej temperaturze. Nie jest to jednak kryterium jednoznaczne. Zaznaczony na trójkącie barw zakres odpowiadający danej wartości CCT nie jest jednorodny. W takim przypadku lampy pochodzące od różnych producentów, pomimo iż będą sygnowane tą samą wartością temperatury barwowej, mogą emitować zauważalnie różniące się światło (są to bardzo często spotykane przypadki). Dokładniejszym kryterium definiującym odcień światła białego będzie podawanie współrzędnych xy przestrzeni barw CIE $_{xyY}$ (x oraz y określają chromatyczność, natomiast Y luminancję). Ze względu na znaczny rozrzut procesu technologicznego producenci źródeł światła będą zazwyczaj podawali grupy współrzędnych określające pewien obszar na płaszczyźnie xy . W sytuacji, gdy takie obszary będą właściwie dobierane (np. mieszczące się wewnątrz tzw. elipsy MacAdama – tj. obszaru xy postrzeganego przez oko jako jednorodnego chromatycznie), to także opis barwowy dowolnego źródła światła będzie całkowicie jednoznaczny.

Tę metodę oznakowania przyjęli przede wszystkim producenci diod LED światła białego (diody emitujące promieniowanie monochromatyczne opisywane zwykle będą poprzez tzw. dominującą długość fali: λ_{DOM}). W przypadku pozostałych źródeł światła, np. lamp

fluorescencyjnych, w dalszym ciągu najczęściej używana jest wartość CCT. Niejednoznaczność tego parametru często próbuje się doprecyzować poprzez powiązanie wartości temperatury barwowej z nazwą znanego producenta lampy. W przypadku renomowanego producenta rynek traktuje takie powiązanie jako barwę wzorcową lub barwę odniesienia.

Drugim istotnym parametrem określającym właściwości światła jest tzw. wskaźnik oddawania barw oznaczony jako R_a lub CRI (ang. *Colour Rendering Index*). Jest to symbol bezwymiarowy, wyrażony za pomocą liczby z przedziału od zera do stu (jednak w szczególnych przypadkach może to być też liczba ujemna). Wskaźnik oddawania barw także nie jest wielkością jednoznaczną. Teoretycznie im wyższa jego wartość, tym bardziej dane źródło światła zbliżone jest do światła słonecznego i kolory oświetlonych takim światłem obiektów powinny wydawać się bardziej naturalne. W przypadku lamp charakteryzujących się wysoką wartością CRI (np. 70-90) łatwo przedstawić przykłady przeczące tej tezie [1]. Powodem takiej sytuacji jest sam sposób wyliczania wartości wskaźnika oddawania barw poprzez uśrednienie wyników ośmiu pomiarów. Każdy pomiar dotyczy jednej tablicy testowej o ściśle określonym kolorze. Taką tablicę początkowo oświetla się światłem referencyjnym, którego temperatura barwowa musi być maksymalnie zbliżona do temperatury barwowej światła testowanego, a następnie światłem badanej lampy. Z każdego pomiaru wyliczany jest szczegółowy wskaźnik R_i zgodnie ze wzorem [1]:

$$(1) \quad R_i = 100 - 4,6 \cdot \Delta E_i$$

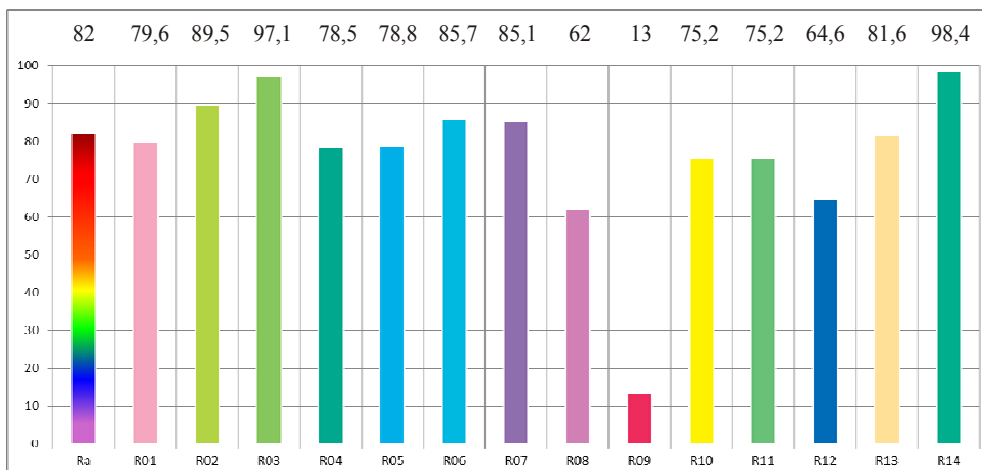
gdzie: ΔE_i jest odległością euklidesową pomiędzy skorygowanymi współrzędnymi punktów p_1 (światło referencyjne) i p_2 (światło testowane) obrazującymi odczytany kolor w przestrzeni barw. Ogólny wskaźnik R_a w takim wypadku wyniesie:

$$(2) \quad R_a = \frac{1}{8} \cdot \sum_{i=1}^8 R_i$$

Istotną niedogodnością tej metody jest jej niska czułość na nawet znaczne przekłamanie koloru pojedynczej tablicy (uśredniona suma nie zawiera już informacji o wielkości poszczególnych składników) oraz niewielka liczba tablic kontrolnych. Próbuje się temu zaradzić wprowadzając dodatkowe tablice kontrolne (sześć nowo opracowanych tablic), których specjalnie dobrane kolory łatwiej ujawniają wady współczesnych źródeł światła. W takim przypadku, obok klasycznie wyliczonego wskaźnika R_a wyznaczonego na podstawie pomiarów ośmiu podstawowych tablic,

przedstawia się też szczegółowe wartości wskaźnika R_i dla sześciu dodatkowych tablic: $R_8, R_9, R_{10}, R_{11}, R_{12}, R_{13}, R_{14}$. Prezentacja taka często też ma postać zapisu graficznego przedstawionego na rysunku 1.

Specjalistyczne mierniki parametrów światła często posiadają rozbudowane pakiety oprogramowania (np. dla komputerów klasy PC), automatycznie generujące pliki zawierające tabele z wynikami oraz odpowiadające im wykresy graficzne.



Rys. 1. Zmierzone parametry diody LED europejskiego producenta (dane katalogowe diody: CCT = 3000K, wskaźnik $R_a > 80$; wartości zmierzone: CCT = 2965K, $R_a = 82$)

Na rysunku 1 przedstawiono wyniki pomiarów diody LED emitującej światło białe ciepłe. Wysokość kolejnych pasków (każdy obrazuje barwę tablicy kontrolnej) jest proporcjonalna do wyznaczonej wartości szczegółowych wskaźników R_i . Pomiar przeprowadzone za pomocą spektrometru (typu: GL SPECTIS 1.0 TOUCH) w pełni potwierdziły deklarowane dane katalogowe. Warto jednak zauważyć, że pomimo dość wysokiej wartości ogólnego wskaźnika $R_a = 82$ (wyliczonego jednak na podstawie tylko pierwszych ośmiu tablic testowych) niektóre kolory będą zauważalnie przekłamane. Bardzo dużym problemem lamp zbudowanych w oparciu o diody LED jest wierne oddanie koloru intensywnej czerwieni (kolor czerwony będzie postrzegany jako ciemny i mało intensywny). W analizowanym przypadku wskaźnik R_9 wynosi tylko 13. Wbrew pozorom dla diod LED emitujących światło białe, które wykorzystują konwersję światła niebieskiego przez luminofor, jest to wartość dość dobra. Zwykle spotyka się gorsze diody nawet z ujemną wartością tego wskaźnika. W takim przypadku informacja ograniczona tylko do temperatury barwowej i wartości R_a , dla większości lamp LED nie będzie wystarczająca. Niestety, nawet w bardzo obszernych kartach katalogowych, dotyczących zarówno lamp jak i samych modułów LED, trudno doszukać się bardziej szczegółowych informacji. Producenci chętnie eksponują wysoką wartość ogólnego wskaźnika R_a , rzadko jednak podają znacznie gorszą wartość wskaźnika R_9 .

Sposobem mającym zaradzić wyżej opisanym problemom są próby opracowania i wdrożenia nowych wskaźników, bardziej użytecznych przy ocenianiu jakości współczesnych źródeł światła (szczególnie wykonanych w technologii SSL). Jednym z przykładów takiego działania jest opracowany przez National Institute of Standards and Technology parametr CQS (ang. *Color Quality Scale*, czasem też przedstawiany jako Q_a). Wskaźnik ten posiada bardzo wiele analogii do parametru CRI, pozbawiony jest jednak jego najistotniejszych wad. Zwiększono liczbę tablic

testowych do 15. Kolory poszczególnych tablic obejmują większą część widma i są bardziej nasycone. Zmieniono przestrzeń barw, w której zobrazowane są kolejne pomiary na nowocześniejszą CIELAB. Wykorzystano inną matematyczną formułę wyliczania ogólnej wartości wskaźnika Q_a ze wskaźników cząstkowych Q_1-Q_{15} , jednak przy zachowanym zakresie 0-100. Dokładniejszy opis właściwości parametru CQS można znaleźć w pracach [1] i [2]. Jego najistotniejsze zalety to duża zależność od przekłamania koloru nawet pojedynczej tablicy oraz bardziej fizjologiczna ocena przesunięcia koloru w przestrzeni barw. Wskaźniki cząstkowe są znacznie bardziej czułe na zmianę lub osłabienie barwy niż na wzrost jej intensywności, który czasami może być postrzegany jako korzystny [1].

Określenie czynników wpływu i pomiar parametrów

Jedną z najistotniejszych zalet lamp LED jest możliwość regulacji strumienia światła w bardzo szerokich granicach. Możliwe są dwa sposoby regulacji. Pierwszy, to regulacja wartości prądu stałego płynącego przez diodę, i drugi bazujący na modulacji PWM. Obie metody nie są jednak pozbawione wad. Parametry chromatyczne diody LED mogą zależeć od wartości płynącego przez nią prądu (szczególnie przy niskich wartościach I_F) [3], natomiast modulacja PWM (komutowana stała wartość prądu I_F) może wywoływać różnego rodzaju zakłócenia [4] oraz powodować nienaturalne postrzeganie szybko poruszających się obiektów (efekty stroboskopowe spowodowane „migoczącym” oświetleniem). Regulację prądową najczęściej stosuje się w punktowych źródłach światła, np. w pojedynczych lampach, w których zastosowano diody LED dużej mocy lub moduły COB (ang. *Chip On Board*). W przypadku światła rozproszonego, np. duże powierzchnie świecące, stosowanych będzie wiele modułów LED małej mocy, sterowanych kluczowanym napięciem zasilającym. Są to moduły napięciowe wyposażone we własne stabilizatory prądu.

Źródłem światła w diodzie LED jest zjawisko rekombinacji promienistej. W bardzo uproszczonym modelu, elektron w obszarze złącza p-n przeskakuje z pasma przewodnictwa do pasma walencyjnego wypromieniowując różnicę energii w postaci fotonu. Długość promieniowanej fali jest odwrotnie proporcjonalna do różnicy poziomów energetycznych. Szerokość pasma zabronionego oraz poziom domieszek półprzewodnika, z którego wykonano złącze p-n, to najistotniejsze czynniki mające wpływ na kolor emitowanego światła.

Dokonując pewnych uproszczeń (np. pomijając rezystancję doprowadzeń oraz upływności) można założyć, że napięcie przewodzenia U_F diody LED zależy głównie od różnicy energii elektronu w paśmie przewodnictwa i w paśmie walencyjnym złącza p-n (tj. barwy emitowanego światła), oraz że wielkość strumienia elektronów biorących udział w rekombinacji promienistej to wartość płynącego przez złącze prądu I_F . Należy jednak zaznaczyć, że tylko część kwantów zdoła opuścić obszar złącza p-n tworząc użyteczny strumień światła. Wielkość ta zależy jest, między innymi, od stopnia przezroczystości półprzewodnika oraz jego kształtów geometrycznych i związanych z tym zjawiskami optycznymi. Jeżeli powiążemy odchyłki napięcia przewodzenia diody U_F z odchyłkami barwowymi emitowanego przez diodę LED światła, to analizując wpływ poszczególnych czynników na wartość tego napięcia można postawić tezę, że czynniki te będą miały podobny wpływ na parametry chromatyczne diody LED. Analizę taką można łatwo przeprowadzić korzystając z przekształconego równania Shockleya przy założeniu, że prąd I_F jest dużo większy od prądu nasycenia złącza I_S :

$$(3) \quad U_F \approx n \frac{kT}{q} \cdot \ln \frac{I_F}{I_S}$$

gdzie: k – stała Boltzmana, T – temperatura, q – ładunek elektronu, I_F – prąd diody, I_S – prąd nasycenia złącza. Analizując powyższy wzór można wskazać na dwa czynniki zewnętrzne wpływające na wartość napięcia U_F . Jest to prąd przewodzenia diody oraz temperatura złącza p-n. Przyrost prądu I_F spowoduje przyrost napięcia U_F i zwiększenie różnicy poziomów energetycznych. Konsekwencją jest skrócenie długości fali emitowanego promieniowania. Ze wzoru (3) wynikałoby, że wpływ temperatury na U_F jest liniowy. Sprzeczność tę łatwo wyjaśnić, jeśli uwzględnimy znacznie silniejszy wpływ temperatury na wartość prądu I_S . Podwojenie wartości prądu nasycenia następuje już przy wzroście temperatury o kilka, kilkanaście stopni. W takim przypadku można dostrzec pewną korzystną właściwość. Wzrost prądu przewodzenia I_F będzie powodował wzrost napięcia przewodzenia U_F , ale także zwiększy temperaturę złącza p-n, co z kolei wpływa na obniżenie U_F . Teoretycznie można więc tak dobrać warunki zasilania i chłodzenia diody LED, aby uzyskać kompensację zmian napięcia U_F i tym samym zapewnić większą stabilność chromatyczną emitowanego przez diodę LED światła [5].

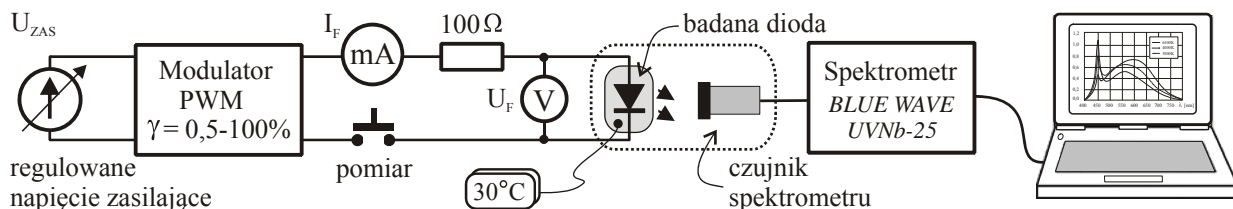
Na rysunku 2 przedstawiono schemat stanowiska pomiarowego. Układ umożliwia zadawanie stałej wartości prądu w zakresie od 0 do 100 mA, oraz jego komutację dla współczynnika PWM zmieniającego się w zakresie $\gamma = 0,5-100\%$. Badaniu poddano diody LED średniej mocy (0,5 W) emitujące światło białe (konwersja światła niebieskiego poprzez żółty luminofor) w kategoriach temperatur barwowych: 2700K, 3000K, 4000K, 6500K oraz diodę RGB o sumarycznej mocy do 0,5 W, przeznaczoną do zastosowaniach w ekranach LED.

Tabela 1. Wyniki pomiarów diod LED o różnych kategoriach temperatur barwowych (CCT) przy zasilaniu stałoprądowym ($I_F = 1-100$ mA, $\gamma = 100\%$) oraz komutowanym ($I_F = 100$ mA, $\gamma = 1-100\%$)

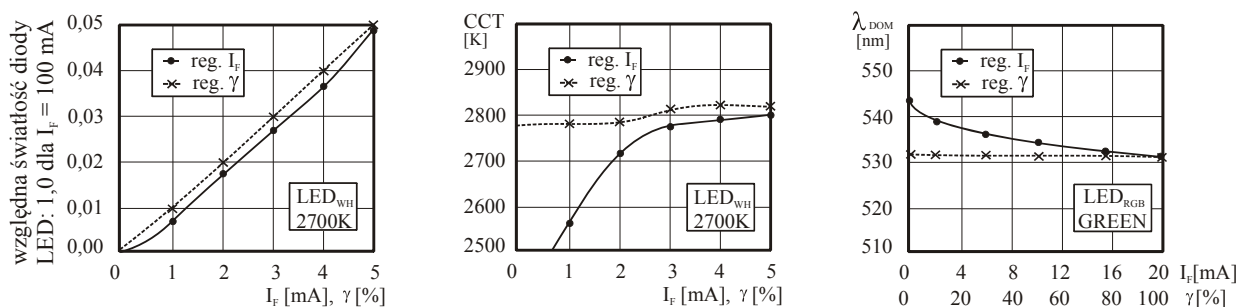
I_F [mA]	LED 2700K, $\gamma=100\%$				LED 3000K, $\gamma=100\%$				LED 4000K, $\gamma=100\%$				LED 6500K, $\gamma=100\%$			
	$x \cdot 10^3$	$y \cdot 10^3$	CCT	lx	$x \cdot 10^3$	$y \cdot 10^3$	CCT	lx	$x \cdot 10^3$	$y \cdot 10^3$	CCT	lx	$x \cdot 10^3$	$y \cdot 10^3$	CCT	lx
1	485	443	2561K	44	468	442	2824K	68	403	418	3819K	89	343	398	5823K	56
2	465	425	2727K	118	444	418	2994K	171	387	393	3974K	191	329	360	6100K	147
3	461	420	2773K	183	437	410	3037K	265	382	386	4067K	322	324	353	6173K	240
4	458	416	2781K	247	434	406	3100K	360	381	383	4093K	408	324	350	6267K	327
5	455	415	2791K	321	431	404	3100K	469	379	381	4130K	534	322	347	6317K	436
10	452	411	2816K	676	428	400	3118K	980	376	377	4147K	1100	319	342	6378K	933
20	451	409	2816K	1394	427	399	3118K	2011	375	375	4147K	2244	319	340	6378K	1907
50	451	409	2816K	3436	427	398	3120K	4933	375	374	4148K	5567	318	338	6388K	4824
100	450	408	2823K	6581	426	397	3125K	9359	373	370	4160K	10400	317	334	6405K	9380
Pomiary przy prądzie $I_F = 100$ mA komutowanym ($f_{PWM} = 250$ Hz i 2 kHz) dla wsp. PWM: $\gamma = 1-100\%$																
γ [%]	LED 2700K, $I_F=0,1A$				LED 3000K, $I_F=0,1A$				LED 4000K, $I_F=0,1A$				LED 6500K, $I_F=0,1A$			
	$x \cdot 10^3$	$y \cdot 10^3$	CCT	lx	$x \cdot 10^3$	$y \cdot 10^3$	CCT	lx	$x \cdot 10^3$	$y \cdot 10^3$	CCT	lx	$x \cdot 10^3$	$y \cdot 10^3$	CCT	lx
1	458	416	2780K	61	436	409	3040K	90	382	385	4069K	97	322	345	6325K	87
2	455	415	2793K	128	432	405	3100K	183	381	382	4095K	207	319	341	6379K	180
3	452	411	2816K	197	431	404	3102K	279	379	380	4129K	312	319	338	6384K	278
4	451	409	2822K	265	427	399	3119K	372	375	372	4154K	413	318	335	6400K	370
5	450	408	2824K	330	426	397	3125K	465	373	370	4157K	522	317	334	6407K	473
5-100	450	408	2824K	6583	426	397	3125K	9362	373	370	4157K	10410	317	334	6407K	9383

Tabela 2. Wyniki pomiarów diody RGB przy zasilaniu stałoprądowym oraz komutowanym sygnałem PWM

I_F	λ_{DOM} dla: $I_F=0,2-20$ mA oraz $\gamma=100\%$			λ_{DOM} dla: $\gamma=1-100\%$, $I_F=20$ mA i $f_{PWM}=250$ Hz/2kHz			
	Red	Green	Blue	γ	Red	Green	Blue
200 μ A	629 nm	544 nm	472 nm	1,0 %	628 nm	532 nm	464 nm
300 μ A	629 nm	544 nm	472 nm	1,5 %	628 nm	532 nm	464 nm
400 μ A	628 nm	543 nm	471 nm	2,0 %	628 nm	532 nm	464 nm
500 μ A	628 nm	543 nm	471 nm	2,5 %	628 nm	532 nm	464 nm
1 mA	628 nm	543 nm	469 nm	5,0 %	628 nm	532 nm	464 nm
2 mA	628 nm	539 nm	468 nm	10,0 %	628 nm	532 nm	464 nm
5 mA	628 nm	537 nm	467 nm	25,0 %	628 nm	532 nm	464 nm
10 mA	628 nm	534 nm	466 nm	50,0 %	628 nm	532 nm	464 nm
20 mA	628 nm	532 nm	464 nm	100,0 %	628 nm	532 nm	464 nm



Rys. 2. Stanowisko pomiarowe do badania diod LED



Rys. 3. Wykresy zmian parametrów diody LED 2700K i diody RGB (chip InGaN) dla regulacji I_F oraz PWM

W przypadku diod „białych” badania polegały na pomiarze współrzędnych xy przestrzeni barw CIE $_{xyY}$, natężenia oświetlenia (I_x), oraz temperatury barwowej (CCT) emitowanego przez diodę światła dla różnych wartości stałego prądu I_F . Pomiary powtórzone dla prądu $I_F = 100$ mA komutowanego sygnałem PWM, którego współczynnik wypełnienia dobierano tak, aby średnie wartości prądu $i_F(t)$ były maksymalnie zbliżone do wartości stałych, zadawanych w poprzednim pomiarze. Otrzymane wyniki przedstawiono w tabeli 1.

Podobną procedurę zastosowano przy pomiarach przesunięcia widma diody RGB. Mierzono dominującą długość fali (λ_{DOM}) każdej składowej barwy osobno, przy zasilaniu stałoprądowym regulowanym w zakresie $I_F = 0,2-20$ mA, oraz przy prądzie $I_F = 20$ mA komutowanym sygnałem PWM, którego współczynnik wypełnienia zmieniano w zakresie $\gamma = 1-100\%$. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 2.

Maksymalne wartości prądu przewodzenia każdej diody zostały tak dobrane, aby nie przekraczały wartości katalogowych (ok. 50-70% wartości dopuszczalnej). Dla ograniczenia wpływu temperatury na wyniki pomiarów wykorzystano diody LED z bardzo małą rezystancją termiczną (diody z tzw. padami termalnymi) oraz zastosowano radiatory o dużej pojemności cieplnej. Przy możliwie krótkim czasie pojedynczego pomiaru temperatura kryształu półprzewodnikowego (T_j) każdej badanej diody, w całym cyklu pomiarowym, zawierała się w granicach od 30 do 43°C ($30^\circ\text{C} \leq T_j \leq 30^\circ\text{C} + I_F \cdot U_F \cdot R_{th-JS}$, gdzie: R_{th-JS} – katalogowa wartość rezystancji termicznej „junction – solder point”).

Podsumowanie

Do pomiarów użyto nowoczesnych diod LED jednego z największych europejskich producentów. Odnotowano wysoką zgodność deklarowanych parametrów (szczegółowe dane katalogowe) z uzyskanymi wynikami. Przyjęty zakres regulacji 1-100% jest dość szeroki, jednak w technice oświetleniowej bardzo pożądany. Na rysunku 3 przedstawiono wykresy porównujące obie metody sterowania jasnością. Łatwo zauważyć, że diody LED

wykazują duże problemy ze stabilnością swoich parametrów w zakresie małych prądów przewodzenia. Zarejestrowana zmiana temperatury barwowej diod „białych” oraz dominującej długości fali dla barwy zielonej i niebieskiej diody RGB jest już widoczna dla oka [3] i w wielu przypadkach nie będzie akceptowalna. Bardziej wskazane wydaje się stosowanie metod opartych na modulacji PWM. W zakresie zmian współczynnika γ : 1-100% dla diody RGB i 5-100% dla diod „białych” parametry chromatyczne były stabilne. Pomiary przeprowadzono dla częstotliwości sygnału PWM: 250 Hz i 2 kHz. Dla obu wartości wyniki były bardzo zbliżone. Sami producenci diod LED zalecają modulację PWM. Zamieszczone w karcie katalogowej szczegółowe wartości parametrów określone są zwykle dla konkretnej wartości prądu przewodzenia I_F , a wykresy ich zmian dla węższego zakresu niż 1-100% I_{Fmax} .

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

LITERATURA

- [1] Davis W., Ohno Y., The Color Quality Scale, *Optical Engineering*, March 2010
- [2] Davis W., Ohno Y., Rationale of Color Quality Scale, NIST, June 2010
- [3] Dyble 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
- [4] Chęciński J., Filus Z., Zaburzenia radioelektryczne generowane przez instalacje oświetleniowe LED, *Elektronika-Konstrukcja, Technologie, Zastosowania*, 2013/10, Wydawnictwo SIGMA-NOT
- [5] 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

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