

## Założenia konstrukcyjne wieloemiterowego źródła SSL do okresowej kontroli metrologicznej fotometrów

**Streszczenie.** Procedury okresowej kontroli fotometrów pozostają niezmiennione od wielu lat. Współczesna technika oświetleniowa stosuje źródła światła, których charakterystyki widmowe znacznie odbiegają od rozkładów temperaturowych stosowanych podczas wzorcowania mierników. Liczbowe oszacowanie parametrów kolorymetrycznych promiennika w żaden sposób nie określa wpływu na błąd odpowiedzi głowicy fotometru wynikający z rozkładu spektralnego różnego od referencyjnego iluminantu A. Źródła o identycznych temperaturach barwowych najbliższych lecz odmiennych rozkładach widmowych dają różne odpowiedzi fotometru, których odchylenie rośnie z niedoskonałością dopasowania widmowego detektora do krzywej  $V(\lambda)$ . Wpływ metameryzmu zauważa norma ISO/CIE 19476 narzucając okresowe sprawdzanie charakterystyki widmowej fotometru przy użyciu wąskopasmowych pobudzeń. W artykule przedstawiono założenia konstrukcyjne źródła, które spełniłyby wymagania powołanej normy, jak również dawałyby zbieżne wyniki badań wykonanych w różnych laboratoriach.

**Abstract.** Periodic control procedures of photometers have remained unchanged for many years. Modern lighting technology uses light sources whose spectral characteristics significantly differ from distribution used for calibration of meters. A numerical estimation of radiator colorimetric parameters doesn't determine in any way the photometer head error resulting from relative optic power per wavelength varied from the referential A illuminate. Sources with identical closest colour temperature but different spectral distribution give various photometer answers. The deviation increases along with the imperfection of the spectral detector response matching in relation to the  $V(\lambda)$  curve. The influence of metamatism is included in ISO/CIE 19476 standard, which imposes periodic spectral characteristics control using narrowband stimulations. This article discusses the structural basis of the source which will meet the requirements of the above-mentioned standard and provide coherent results for the research conducted in diverse laboratories. (**Design assumptions of multi-emitter SSL source for periodic metrological control of photometers**).

**Słowa kluczowe:** temperatura barwowa, metameryzm, LED, punkty chromatyczności, mieszanie barw, niepewność pomiaru, gama barw  
**Keywords:** colour temperature, metamerism, LED, chromaticity points, colour mixing, uncertainty measurement, gamut

### Wstęp

Półprzewodnikowe wieloemiterowe źródła światła (RGBW) LED pozwalają formować dynamicznie parametry kolorymetryczne strumienia świetlnego poprzez skalę korelacji wartości zadanej mocy optycznej poszczególnych składowych [1]. Zakres dostępnej gamy barw zależy od położenia wierzchołkowych punktów chromatyczności źródeł quasi-monochromatycznych, umieszczonych na wspólnej matrycy w układzie litografii planarnej.

Uzyskanie zadanego punktu chromatyczności jest wynikiem regulacji odpowiednich wartości zmieszanych składowych elementarnych strumieni świetlnych. Źródło półprzewodnikowe charakteryzuje pewna niestabilność achromatyczna zależna głównie od temperatury złącza półprzewodnikowego i wartości prądu zasilającego [2,3].

W przypadku umieszczenia chipów LED-owych na wspólnej matrycy, temperatura złącza emiterów jest jednakowa i zależy od całkowitej mocy cieplnej oddawanej przez całą strukturę półprzewodnikową [1].

Uzyskanie wymaganego punktu chromatycznego jest zatem złożoną funkcją uwzględniającą szereg zjawisk fizycznych występujących w strukturze złącza emitera półprzewodnikowego, które wpływają na ostateczny kształt widma emisyjnego (m.in. kwantowy efekt Starka) [4].

W artykule przedstawiono założenia projektowe źródła wieloemiterowego pozwalającego bezwzględnie uzyskiwać założone parametry kolorymetryczne przy równoczesnej stabilnej emisji światłości. Ponadto zrealizowano serię pomiarów spektrofotometrycznych bazując na źródle prototypowym oraz opracowano korekcyjny algorytm matematyczny. Spełnienie powyższych wymagań pozwoliło na realizację kalibratora fotometrycznego SSL.

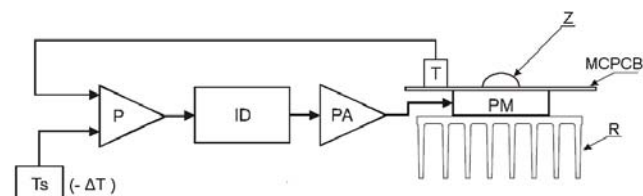
### Założenia projektowe

Podstawowym kryterium źródła wzorcowego jest utrzymywanie odtwarzalnych oraz dokładnych parametrów fotometrycznych. Dlatego emiterzy półprzewodnikowe zostały wstępnie poddane procesowi starzenia, aby uniknąć początkowych znacznych wahań strumienia świetlnego [5]. W analizowanym pre-kalibratorze czas eksploatacji został z premedytacją obniżony do 500h, zaś po tym okresie

należy wykonać ponowną pełną procedurę pomiarową.

Źródło wyposażone jest w aktywny elektroniczny układ korekcji temperaturowej, bazujący na sprzężeniu zwrotnym, gdzie wartością referencyjną jest opór wewnętrzny termistora NTC w punkcie pomiarowym, zintegrowanym z podłożem MCPCB, w bliskiej odległości od złącza LED.

W związku z występowaniem pewnej pasożytniczej przewodności cieplnej, zwiększenie wydzielanej mocy przez emiter półprzewodnikowy zwiększa gradient temperatur pomiędzy punktem odniesienia a fizycznym w złączu źródła promieniowania ( $\Delta T = 1^\circ\text{C/W}$ ) [6]. Kompensacja tej różnicy zmienia wartość zadaną nastawy dla regulatora PID (rys.1).



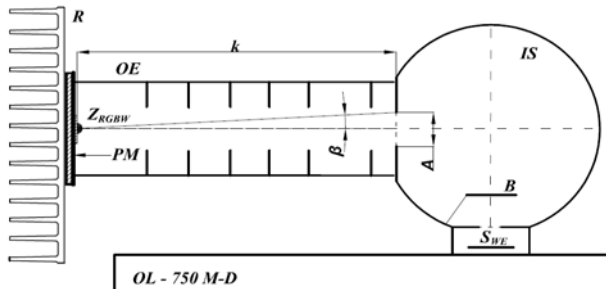
Rys.1. Schemat blokowy regulatora temperatury złącza LED gdzie:  $T_s$  – temperatura zadana,  $T$  – termistor (punkt pomiarowy),  $P$  – wzmacniacz błędów,  $ID$  – człon różniczkujący całkujący,  $PA$  – wzmacniacz wyjściowy mocy,  $PM$  – moduł Peltiera,  $R$  – element odprowadzający ciepło,  $Z$  – źródło półprzewodnikowe MCPCB – podłoże chipu LED,  $\Delta T$  – kompensacja nastawy

Najbliższa temperatura barwowa CCT [7] dotyczy tylko rozkładów widma promieniowania, których współrzędne chromatyczności leżą w pobliżu krzywej normalnej Plancka. W przypadku badanego emitera światła białego możliwe jest jej określenie na bazie przybliżonej metody Robertsona. Zmiany wartości prądu zasilającego złącze źródła powoduje znaczne różnice w najbliższej temperaturze barwowej strumienia świetlnego nawet o ponad 500K. Wynika to pośrednio z przesunięcia rozkładu widma promieniowania wymuszającego konwersje luminoforu domieszkowanego pierwiastkami ziem rzadkich (cer, prazeodym) jak również przyrostu temperatury materiału fotoluminescencyjnego [8]. Analogiczne przesunięcia spektralne dotyczą emiterów quasi-monochromatycznych, zaś period ich zmian zależy

jest głównie od technologicznej struktury samego źródła półprzewodnikowego [9].

### Opis układu pomiarowego

Pomiary laboratoryjne zrealizowano wykorzystując zautomatyzowany dwusiatkowy spektrometr (OL - 750) sprzężony z kulą całkującą (rys.2). Aby zapobiec wtórnym odbiciom strumienia świetlnego w obszarze apertury wejściowej, a źródłem promieniowania zastosowano szereg poczernionych przesłon optycznych. Wartością wyjściową pomiaru jest bezwzględny rozkład widmowy natężenia napromienienia (irradiacja spektralna).



Rys.2. Uproszczony schemat układu świetlnooptycznego gdzie: IS – kula całkująca, B – przesłona, k – odległość źródła od powierzchni detekcyjnej, OE – prowadnica optyczna z pułapką świetlną, A – apertura wejściowa, PM – moduł Peltiera, Z<sub>RGBW</sub> – źródło półprzewodnikowe, S<sub>WE</sub> – szczelina wejściowa - (0,5mm / 1,25mm / 0,5mm), R - element odprowadzający ciepło, β – kąt połowkowy płaski mierzonego promieniowania optycznego

Na podstawie uzyskanych wyników badań oraz znajomości wymiarów geometrycznych układu świetlnooptycznego wyznaczono średnią światłość osiową J<sub>M</sub> jako cząstkowy strumień świetlny ΔΦ<sub>z</sub> emitowany w wąskim kącie brylowym ω (β = 9,54°). Obliczono również położenie punktów chromatyczności x, y w przekroju przestrzeni gammy barw CIE 1931 według poniższych równań (1, 2, 3):

$$J_M = \frac{K_m \frac{\pi A^2}{4} \int_{360}^{830} V(\lambda)G(\lambda)d\lambda}{2\pi \cdot (1 - \cos \beta)} \quad [cd] \quad (1)$$

gdzie: K<sub>m</sub> – największa wartość widmowej skuteczności świetlnej dla widzenia fotonowego, V(λ) – znormalizowana krzywa czułości oka, G(λ) – bezwzględna gęstość mocy promienistej [W/(cm<sup>2</sup>·nm)], λ – długość fali świetlnej [nm]

$$\begin{aligned} x^1 &= \frac{\int G(\lambda) \cdot x_{CIE}(\lambda) d\lambda}{\int G(\lambda) \cdot [x_{CIE}(\lambda) + y_{CIE}(\lambda) + z_{CIE}(\lambda)] d\lambda} \\ y^2 &= \frac{\int G(\lambda) \cdot y_{CIE}(\lambda) d\lambda}{\int G(\lambda) \cdot [x_{CIE}(\lambda) + y_{CIE}(\lambda) + z_{CIE}(\lambda)] d\lambda} \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie: x<sub>CIE</sub>, y<sub>CIE</sub>, z<sub>CIE</sub> – spektralne względne sprawności wizualne czopków, X, Y, Z – współrzędne trójchromatyczne

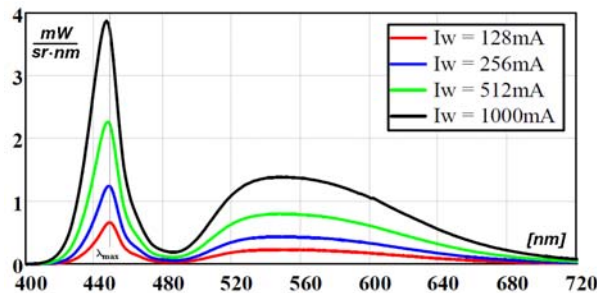
Celem porównania skali (krotności) przesunięć punktów chromatyczności zastosowano konwersję na ujednoczony pod względem luminancji obszar w przekroju barw CIE u', v' 1976. Następnie wyznaczono elipsy MacAdama, których kontur określa granicę niedostrzeganą przez znormalizowaną percepcję wzrokową.

$$k_{MacAdam} = \frac{\sqrt{(u'_F - u'_M)^2 + (v'_F - v'_M)^2}}{1,1 \times 10^{-3}} \quad (3)$$

gdzie: u'<sub>F</sub>, v'<sub>F</sub> – brzegowe, zadane domyślnie (referencyjne) współczynniki kolorymetryczne po konwersji na układ

o zlinearyzowanej luminancji - percepcji różnic barwnych, u'<sub>M</sub>, v'<sub>M</sub> – punkty pomiarowe w układzie CIE 1976.

Opracowane wyniki pomiarów laboratoryjnych zostały zestawione w poniższych tabelach 1 - 4 oraz przedstawione w zgrupowanej kolejności (WRGB) na rysunkach 3 - 11.



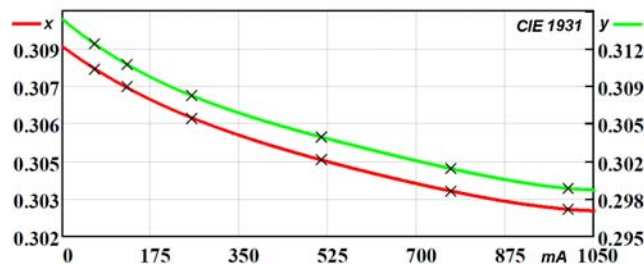
Rys.3. Bezwzględne rozkłady gęstości mocy optycznej emitera białego dla wybranych prądów zasilających złącze

Tabela 1. Parametry kolorymetryczne x, y CIE 1931 dla emitera szerokopasmowego (białego) w funkcji prądu zasilającego

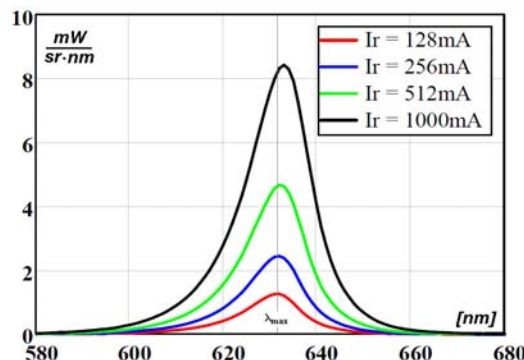
I [mA]	CCT [K]	x CIE	y CIE	J <sub>M</sub> [cd]	k <sub>MacAdam</sub>
64	6953,3	0,30793	0,31259	6,93	7,8423
128	7018,6	0,30732	0,31069	13,45	6,7372
256	7136,0	0,30618	0,30787	25,60	5,0801
512	7300,8	0,30473	0,30408	47,06	2,8266
768	7436,7	0,30361	0,30121	65,95	1,0992
1000	7522,2	0,30297	0,29940	81,59	Ref (0)

Tabela 2. Parametry kolorymetryczne x, y CIE 1931 dla emitera czerwonego 630nm w funkcji prądu zasilającego

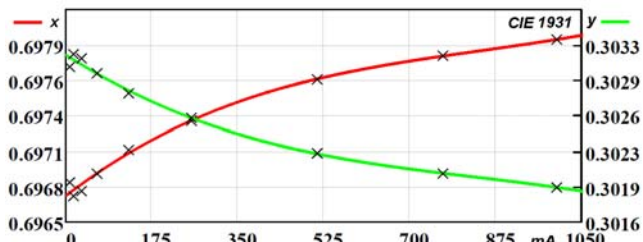
I [mA]	x CIE	y CIE	J <sub>M</sub> [cd]	k <sub>MacAdam</sub>
8	0,69682	0,30306	0,217	2,2823
16	0,69671	0,30318	0,495	2,5145
32	0,69675	0,30314	1,063	2,4343
64	0,69689	0,30300	2,184	2,1535
128	0,69708	0,30281	4,409	1,7720
256	0,69731	0,30258	8,74	1,3096
512	0,69764	0,30225	17,099	0,6453
768	0,69783	0,30206	24,902	0,2623
1000	0,69796	0,30193	31,682	Ref (0)



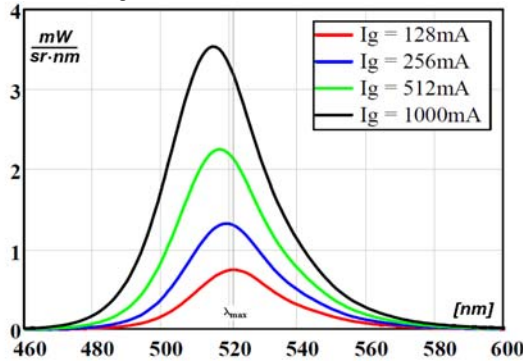
Rys.4. Aproxymowane funkcje zależności położenia składowej kolorymetrycznej x, y względem wartości prądu zasilającego złącza emitera szerokopasmowego (białego)



Rys.5. Bezwzględne rozkłady gęstości mocy optycznej emitera czerwonego dla wybranych prądów zasilających złącze



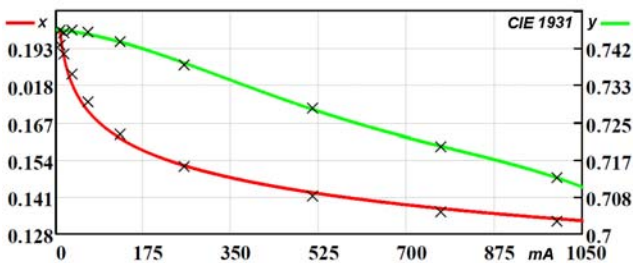
Rys.6. Aproxymowane funkcje zależności położenia składowej kolorymetrycznej  $x, y$  względem wartości prądu zasilającego złącze emitera czerwonego 630nm.



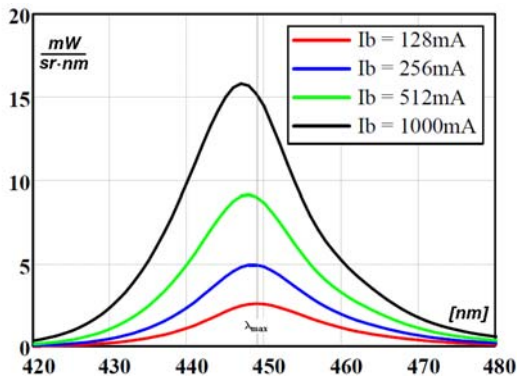
Rys.7. Bezwzględne rozkłady gęstości mocy optycznej emitera zielonego dla wybranych prądów zasilających złącze

Tabela 3. Parametry kolorymetryczne  $x, y$  CIE 1931 dla emitera zielonego 520nm w funkcji prądu zasilającego

$I$ [mA]	$x$ CIE	$y$ CIE	$J_M$ [cd]	$k_{MacAdam}$
8	0,19393	0,74560	0,795	21,4304
16	0,19086	0,74500	1,769	20,4152
32	0,18381	0,74565	3,665	18,1701
64	0,17412	0,74516	7,078	15,0924
128	0,16280	0,74305	12,952	11,5112
256	0,15165	0,73781	22,501	7,8600
512	0,14133	0,72815	37,414	4,0945
768	0,13583	0,71958	49,144	1,6921
1000	0,13253	0,71266	58,327	Ref (0)



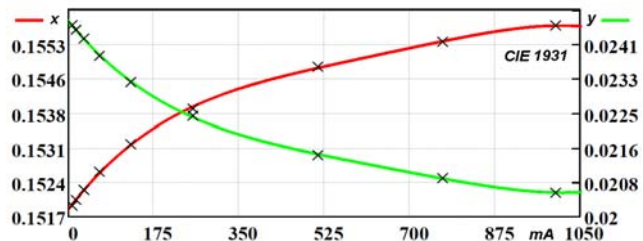
Rys.8. Aproxymowane funkcje zależności położenia składowej kolorymetrycznej  $x, y$  względem wartości prądu zasilającego złącze emitera zielonego 520nm.



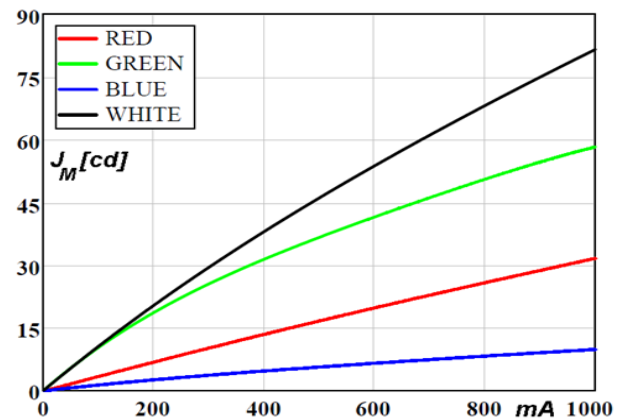
Rys.9. Bezwzględne rozkłady gęstości mocy optycznej emitera niebieskiego dla wybranych prądów zasilających złącze

Tabela 4. Parametry kolorymetryczne  $x, y$  CIE 1931 dla emitera niebieskiego 450nm w funkcji prądu zasilającego

$I$ [mA]	$x$ CIE	$y$ CIE	$J_M$ [cd]	$k_{MacAdam}$
8	0,15193	0,024628	0,108	12,8931
16	0,15205	0,024513	0,234	12,5221
32	0,15226	0,024298	0,479	11,8390
64	0,15264	0,023884	0,932	10,5396
128	0,15321	0,023244	1,767	8,5353
256	0,15394	0,022435	3,252	5,9769
512	0,15481	0,021493	5,816	2,9569
768	0,15533	0,020935	8,041	1,1514
1000	0,15567	0,020584	9,899	Ref (0)



Rys.10. Aproxymowane funkcje zależności położenia składowej kolorymetrycznej  $x, y$  względem wartości prądu zasilającego złącze emitera niebieskiego 450nm.



Rys.11. Bezwzględne funkcje światłości osiowej względem wartości prądu zasilającego złącza emiterów półprzewodnikowych

### Algorytm korekcyjny

Danymi wejściowymi algorytmu matematycznego jest rodzina aproksymujących funkcji wielomianów  $n$ -tych rzędów, sprzężonych z rzeczywistym położeniem punktów chromatyczności  $x, y$  CIE 1931 względem wartości prądu zasilającego. Krzywe, wraz z zaznaczonymi punktami pomiarowymi, zostały przedstawione w poprzednim dziale.

Algorytm matematyczny złożony jest z kilku iteracji. Początkowym zadaniem warunkiem brzegowym są punkty chromatyczności trzech składowych chromatycznych dla wartości prądu  $I_{R,G,B} = 8\text{mA}$ , następnie przeprowadzane jest automatyczne korygowanie tej wartości w czasie kolejnych kroków obliczeniowych. Proces opisano w sekwencjach zrealizowanych w środowisku programowalnym Mathcad.

- Zadanie światłości  $I_z$  oraz docelowego punktu barwnego  $F = (x_F, y_F)$ , który należy uzyskać w wyniku zmieszania.
- Wprowadzenie w postaci macierzej bądź funkcji ciągłej rodziny funkcji aproksymujących zarówno położenia punktów chromatyczności  $x_{R,G,B,W}(I), y_{R,G,B,W}(I)$  jak również wartości bezwzględnych światłości  $J_M(I)$  lub cząstkowego strumienia świetlnego  $\Delta\Phi(I)$  względem prądu zasilającego badany emiter półprzewodnikowy.
- Wyznaczanie trzech prostych przechodzących przez źródła wierzchołkowe (składowe emitory) w celu

wykreślenia gamutu barw. Absolutny zakres barwny jest ograniczony wpływem prądu zasilającego źródło, zatem wynikowa „gamma barwna” jest tylko częścią wspólną obszarów dla całego przedziału prądów zasilających.

- Sprawdzenie czy docelowy punkt mieści się w zakresie barwnym. Następnie wykreślenie równania prostej  $|BK|$  przechodzącej przez współrzędną  $(x_F, y_F)$  oraz dowolnie wybrany punkt zbioru jednego z wierzchołków gamutu.

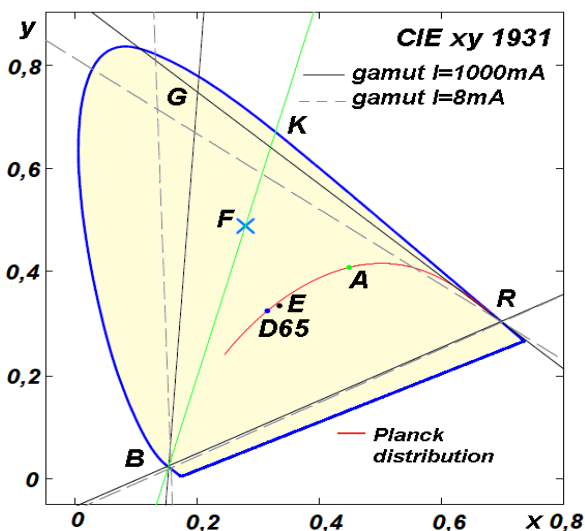
Wyznaczono w ten sposób geometryczne długości odcinków  $|BF|$ ,  $|BK|$ ,  $|GK|$  i  $|RK|$  oraz dokładne współrzędne położenia punktu  $K = (x_K, y_K)$  w miejscu przecięcia prostych opisanych układem równań liniowych (rys.12) [10]. Celem otrzymania zadanej światłości  $J_M$  o określonym punkcie chromatyczności CIE  $F = (x_F, y_F)$ , należy wyznaczyć stopień wzajemnej korelacji poszczególnych składowych emiterów RGB w widmie wyjściowym. Ostatecznie wartości te zostały obliczone arytmetycznie według poniższych wzorów (4, 5):

$$(4) \quad \Phi'_B = |KF| \cdot y_B(I_B), \quad \Phi'_{RG} = |BK| \cdot y_K[I_R, I_G, I_B], \\ \Phi'_G = |RK| \cdot y_G(I_G), \quad \Phi'_R = |GK| \cdot y_R(I_R)$$

gdzie:  $\Phi'_{R,R,G,G,B}$  – sprowadzony współczynnik względny udziału strumienia świetlnego poszczególnych składowych w widmie światła wyjściowego po zmieszaniu

$$(5) \quad \Phi_B = \frac{\Phi'_Z \cdot \Phi'_B}{\Phi'_{RG} + \Phi'_B}, \quad \Phi_{RG} = \frac{\Phi'_Z \cdot \Phi'_{RG}}{\Phi'_{RG} + \Phi'_B} \\ \Phi_G = \frac{\Phi'_{RG} \cdot \Phi'_G}{\Phi'_R + \Phi'_G}, \quad \Phi_R = \frac{\Phi'_{RG} \cdot \Phi'_R}{\Phi'_R + \Phi'_G}$$

gdzie:  $\Phi_{R,G,B}$  – wartości bezwzględne udziału strumienia świetlnego poszczególnych składowych w widmie światła wyjściowego po zmieszaniu.



Rys.12. Przedstawienie realizowanego układu geometrycznego w przestrzeni barw  $x, y$  CIE 1931 w celu wyznaczenia skali udziału strumienia świetlnych źródeł składowych.

Sekwencyjny algorytm nadążnie korygujący parametry kolorymetryczne zrealizowany w pętli iteracyjnej (wzór 6). Warunkami brzegowymi są punkty chromatyczne RGB dla prądu o wartości zbliżonej do zera ( $\sim 8mA$ ). Po wyznaczeniu cząstkowych składowych strumieni świetlnych poszukiwana jest przybliżona wartość prądu wywołująca daną wielkość fotometryczną (funkcja odwrotna), która jest przypisywana jako dana wejściowa w kolejnej iteracji matematycznej.

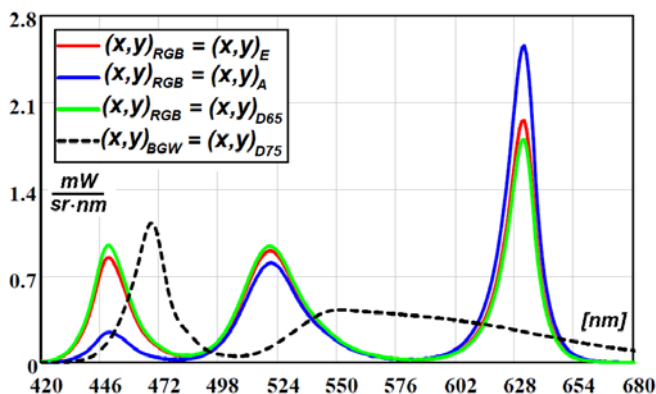
$$n = 0, I(n)_{R,G,B} = 8mA, \Phi_Z = \Phi_R + \Phi_G + \Phi_B, F(x_F, y_F) \\ \longrightarrow x_{R,G,B} y_{R,G,B}(I_{R,G,B}) - \text{approximation} \\ \uparrow x_R y_R(I(n)_R), x_G y_G(I(n)_G), x_B y_B(I(n)_B) \\ (6) \uparrow \text{find}(\Phi(n)_R, \Phi(n)_G, \Phi(n)_B) \\ \uparrow \Phi_{R,G,B}(I_{R,G,B}) - \text{approximation} \\ \longleftarrow^{n+1} \text{solve}[\Phi_{R,G,B}(I_{R,G,B}) \cong \Phi(n)_{R,G,B}] = I(n+1)_{R,G,B}$$

gdzie:  $n$  – krotność iteracji,  $I(n)_{R,G,B}$  – wartość prądu składowej RGB w  $n$ -tej iteracji,  $\Phi(n)_{R,G,B}$  – strumień świetlny w danej iteracji,  $\text{find}()$  – funkcja obliczająca składowe pobudzenia RGB,  $\text{solve}()$  – procedura zwracająca argument funkcji spełniający równość przybliżoną numerycznie

W złożonej procedurze inicjacji algorytmu odczytywano w pętli aproksymowane wartości punktów chromatyczności splecione z prądem, które trendem oscylacyjnym dążyły do wyniku absolutnego. Po przeprowadzeniu szeregu obliczeń uzyskano dostateczną dokładność wyniku po 5 iteracjach dlatego dalszą arytmetykę przerywano (tab.5.)

Tabela 5. Wyznaczone prądy zasilające źródło RGB w kolejnych iteracjach dla światłości  $J_M = 80cd$  dla punktu achromatycznego E

n	$I_R$ [mA]	$I_G$ [mA]	$I_B$ [mA]	$\Delta I$ [mA] uchyb
0	8,0	8,0	8,0	$\Delta I = I_{n+1} - I_n (-)$
1	679,89771	919,98113	168,97782	-81,651
2	762,65483	866,01163	140,13826	1,10635
3	761,56181	866,20314	142,12454	0,01333
4	761,54626	866,24938	142,01067	-0,0022
5	761,54863	866,2458	142,0167	0,00015
6	761,54848	866,24601	142,01639	Ref(0)



Rys.13. Zmierzone bezwzględne rozkłady gęstości mocy optycznej zmieszanych emiterów RGB i WBG dla zdefiniowanych punktów chromatyczności CIE przy prądach wyznaczonych opisywanym algorytmem matematycznym przy zadanej światłości  $J_M = 22,985cd$

Błąd odwzorowania  $\delta$  zadanych pozornych iluminatów (tabela 6, 7) zdeterminowany jest wyłącznie dokładnością danych wejściowych oraz precyzją doboru wartości prądu zasilających poszczególne składowe źródła. Mimo tego różnice barwne nieznacznie odbiegają optycznie od wzorca.

Tabela 6. Zestawienie wyników zmieszania strumieni świetlnych w konfiguracji RGB dla zadanych punktów referencyjnych

RGB	$x_F$ CIE	$y_F$ CIE	$\delta\Phi_M$ [%]	$\delta_{k-MacAdam}$
Iluminat A	0,44759	0,40754	+ 1,4695	2,5381
D65	0,313531	0,323623	+ 1,5820	1,5789
E	0,33338	0,33335	+ 0,7701	1,0618

Tabela 7. Zestawienie wyników zmieszania strumieni świetlnych w konfiguracji WBG dla zadanych punktów referencyjnych

WBG	$x_F$ CIE	$y_F$ CIE	$\delta\Phi_M$ [%]	$\delta_{k-MacAdam}$
D75	0,300338	0,310259	+ 3,1677	2,5985

## Podsumowanie

Przedstawione wyniki pomiarów prototypowego układu rzeczywistego z dokładną stabilizacją temperatury złącza półprzewodnikowego są analogiczne do niezależnych prac badawczych dotyczących tego samego zagadnienia [11, 12]. Sugeruje to poprawność realizacji doświadczenia eksperymentalnego opisanego w niniejszej publikacji.

W wyniku niewielkiego zwiększenia nakładu kosztu numerycznego uzyskano doskonałą precyzję w możliwości kreowania parametrów barwnych (rys.13) przy zadaniu punktów chromatyczności iluminatów jak również doboru ilościowego strumienia świetlnego  $J_M$ . Wykazane cechy techniczne kalibracyjnego źródła SSL powinny posłużyć w weryfikacji krzywej korekcji  $V(\lambda)$  wszelkiej klasy fotometrów.

W celu realizacji źródła stabilnego w czasie eksploatacji należy dokonać sprzężenia zwrotnego strumienia świetlnego kosztem nieznacznych przesunięć punktów chromatyczności lub uwzględnić period procesu starzenia w pamięci EEPROM mikrokontrolera, wraz z danymi korygującymi prąd zasilający tak, aby zachować dobrą stabilność kolorymetryczną. Dość złożone zagadnienie wymaga wielu badań eksperymentalnych nad zjawiskami kwantowymi degradacji złącz półprzewodnikowych oraz materiałów luminescencyjnych (min. wybielanie luminoforu).

Wstępne badania wykazały pewną niepowtarzalność technologiczną chipów emiterów półprzewodnikowych pochodzących z określonej serii produkcyjnej. Prowadzi to do konieczności indywidualnego wyznaczenia całej rodziny krzywych aproksymujących ilościowo oraz jakościowo strumień świetlny danego egzemplarza.

W przypadku braku możliwości względnie dobrego dopasowania funkcji położenia punktów chromatyczności względem prądu, można stosować podział na polilinie pod warunkiem, że wykres będzie ciągły w całym zakresie. Alternatywą jest przeniesienie układu na ujednoczoną płaszczyznę barw CIE  $u', v'$  1976, jednak niezbędna będzie dwukierunkowa konwersja do formatu CIE  $x, y$  1930.

Główną przyczyną zaobserwowanego błędu  $\delta$  pomiędzy parametrami oczekiwanymi według analizowanego modelu matematycznego, a wartościami pomiarową, jest niestabilność oraz skończona dokładność ustawienia zadanych prądów przez zasilacz stabilizowany ( $\pm 0,5$  mA). Lepszą precyzję uzyskano dla quasi-iluminantu  $E$ , gdyż wartości składowych wszystkich prądów znajdują się poza zakresem granicy największych odchyłń użytego przyrządu laboratoryjnego.

Biorąc pod uwagę fakt, że punkty chromatyczności rzeczywistych iluminatów odwzorowane źródłem RGBW dają identyczne wrażenie barwne mimo odmiennych rozkładów spektralnych (metameryzm) [13], zasadniczo wykłuczając definicję ustandaryzowanego wzorca świetlnego. Jednak metrologiczne wyidealizowany miernik fotometryczny powinien wskazać tą samą wartość sygnału niezależnie od użytego składu spektralnego pobudzenia. Skonstruowane doświadczalne źródło prototypowe doskonale nadaje się do okresowej kontroli stabilności korekcji widmowej - stopnia dopasowania krzywej  $V(\lambda)$  (stanu systemu filtrów absorpcyjnych, interferencyjnych), urządzeń pomiarowych wielkości nieelektrycznych zgodnie z powołaną normą ISO/CIE 19476 [14].

Przyjęcie zaproponowanych punktów chromatyczności pobudzeń RGBW do założeń opisywanego źródła SSL zapewni zbieżne wyniki badań w różnych laboratoriach. Warto rozważyć rozszerzenie układu o dodatkowe emitery (Amber, Cyan), aby wypełnić nieciągłości w modulowanym widmie spektralnym VIS (360nm – 830nm) [15].

Artykuł został zrealizowany w Katedrze Elektroenergetyki, Fotoniki i Techniki Świetlnej Politechniki Białostockiej, oraz we współpracy z firmą SONOPAN spółka z o.o.. Badania zostały zrealizowane ze środków służących rozwojowi młodych naukowców oraz uczestników studiów doktoranckich PB w ramach pracy własnej MB/WE/4/2018 i sfinansowane ze środków na naukę MNIŚW.

**Autorzy:** mgr inż. Mateusz Prorok, studia doktoranckie Wydziału Elektrycznego Politechniki Białostockiej, Katedra Elektroenergetyki, Fotoniki i Techniki Świetlnej, 15-351 Białystok, ul. Wiejska 45D  
E-mail: [m.prorok@doktoranci.pb.edu.pl](mailto:m.prorok@doktoranci.pb.edu.pl)

## LITERATURA

- [1] Hu N., Feng Y., Wu C., Hsiao S., Optimal radiant flux selection for multi-channel light-emitting diodes for spectrum-tunable lighting, *Lighting Research & Technology*, (2014), Vol. 46, Issue 4, 434-452
- [2] Budzyński Ł., Influence of junction temperature on the spectral power distribution of Light Emitting Diodes, *Challenges of Modern Technology*, (2015) Vol. 6, No. 4, 3-7
- [3] Pässler R., Parameter Sets Due to Fittings of the Temperature Dependencies of Fundamental Bandgaps in Semiconductors, *Physica Status Solidi*, Vol. 216, Issue 2, (1999), 975-1007
- [4] Chhajed S., Xi Y., Gessmann Th., Xi J.-Q., Shah J. M., Kim J. K., Schubert E. F., Junction temperature in light-emitting diodes assessed by different methods, *Proceedings of the SPIE*, (2005), Vol. 5739, 16-24
- [5] Wagner M., Herzog A., Ganev H., Khanh T.Q., LED aging acceleration — An analysis from measuring and aging data of 14,000 hours LED degradation, *12th China International Forum on Solid State Lighting (SSLCHINA)*, (2015), 75-78
- [6] Jayasighe L., Narendran N., Dong T., Is the Thermal Resistance Coefficient of High-power LEDs constant?, *Seventh International Conference on Solid State Lighting*, Proc. of SPIE 6669, (2007), 146-152
- [7] Norma PN-90/E-01005, Technika Świetlna. Terminologia
- [8] Prorok M., Zajkowski M., Analiza możliwości dynamicznej zmiany parametrów kolorymetrycznych układu świetlnooptycznego współpracującego z wydzielonym luminoforem, *Przegląd Elektrotechniczny*, 94 (2018), nr.2, 146-151
- [9] Roscam Abbing F.D., Pertijs M.A.P., Light-emitting diode junction-temperature sensing using differential voltage/current measurements, *IEEE Sensors*, (2011), 861-864
- [10] Budzyński Ł., Zajkowski M., Modyfikacja parametrów kolorymetrycznych w oprawach oświetleniowych ze źródłami LED, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2015), 91, nr 7, 67-71
- [11] Błaszczak U., Gilewski M., Gryko Ł., Zajac A., Badanie wpływu sposobu zasilania na wybrane parametry optyczne zestawu diod elektroluminescencyjnych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92 (2016), nr.9, 150-153
- [12] Vaitonis Z., Stonkus A., Zukauskas A., Effect of junction temperature oscillation on output characteristics of a light-emitting diode under pulse-width and pulse-frequency modulation driving modes, *IET Optoelectronics*, (2012), Vol. 6, Issue 1, 52-56
- [13] Banaszak A., Tabaka P., Wtorkiewicz J., Analiza wybranych właściwości różnych typów luksomierzy, *Prace Instytutu Elektrotechniki*, (2015), nr 268, 83-100
- [14] Norma ISO/CIE 19476:2014(E), Characterization of the performance of illuminance meters and luminance meters
- [15] Chalmers A., Soltic S., Towards the Optimum Light Source Spectrum, *Advances in Optoelectronics*, (2010), Vol. 2010