

Modyfikacja parametrów kolorymetrycznych w oprawach oświetleniowych ze źródłami LED

Streszczenie. W artykule omówiono podstawowe zasady addytywnego sumowania strumienia świetlnego w układzie kolorymetrycznym XYZ. Przedstawiono zaimplementowany w ośmiobitowym mikrokontrolerze algorytm, realizujący addytywne sumowanie strumienia świetlnego z diod elektroluminescencyjnych o barwie czerwonej, zielonej i niebieskiej. Algorytm ten umożliwi niezależną regulację strumienia świetlnego mieszanki oraz zmianę położenia jej punktu chromatyczności.

Abstract. The article presents basics of additive luminous flux mixing in the XYZ colorimetric system. Describe implemented in eight-bit microcontroller additive summation algorithm which mixes light from RGB LED. This algorithm allows independent control of the mixtures luminous flux and change the position of the chromaticity point. (**Modification of colorimetric parameters in luminaires with LED sources**).

Słowa kluczowe: oprawa LED, mieszanie barw, strumień świetlny, sterowanie.

Keywords: LED luminaires, colour mixing, luminous flux, control.

Wstęp

Współczesna kolorymetria jest często określana mianem kolorymetrii trójchromatycznej, ponieważ powszechnie stosowany psychofizyczny opis światła i barwy opiera się na traktowaniu dowolnego światła jako addytywnej mieszanki strumieni świetlnych o trzech wybranych barwach podstawowych. Punktem wyjścia dla trójchromatycznego opisu światła jest wybór trzech barw podstawowych, które utworzą układ barw podstawowych. W takim układzie addytywne zsumowanie strumieni świetlnych o dwóch barwach z rozpatrywanej trójki nie doprowadzi do uzyskania mieszanki odtwarzającej promieniowanie o trzeciej barwie [1] [2].

Jednym z praktycznie używanych układów kolorymetrycznych jest wprowadzony przez Międzynarodową Komisję Oświetleniową w 1931 układ kolorymetryczny XYZ. Jest on oparty na fikcyjnych barwach podstawowych X, Y oraz Z. Barwy te wybrano tak, aby spełnione były następujące kryteria [3]:

- trójkąt XYZ zawiera w swoim wnętrzu wszystkie barwy widzialne,
- boki trójkąta leżą blisko krzywej barw czystych,
- strumienie jednostkowe związane z barwami X i Z są równe zeru.

Dzięki takim założeniom układu XYZ, obliczanie addytywnej mieszanki strumieni świetlnych bardzo się upraszcza. Wynika to przede wszystkim z tego, że strumienie jednostkowe składowych X i Z są z założenia równe zeru. Ogólna zależność określająca strumień świetlny mieszanki przyjmuje dla układu XYZ postać:

$$(1) \quad \Phi_F = Y_F \cdot \Phi_Y(E)$$

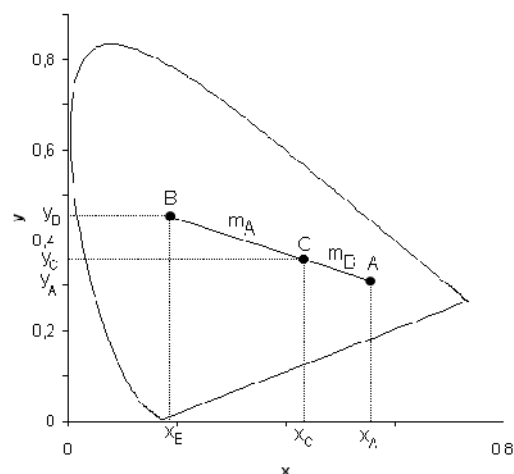
gdzie: Φ_F – strumień świetlny mieszanki, Y_F – składowa trójchromatyczna mieszanki, $\Phi_Y(E)$ – jednostkowy strumień świetlny bieli równoenergetycznej.

Jeśli przyjąć, że jednostkowy strumień świetlny bieli równoenergetycznej $\Phi_Y(E)$ wynosi 1 lumen, to składowa trójchromatyczna mieszanki Y_F jest liczbowo równa jej strumieniowi świetlnemu Φ_F . Ponadto, przy addytywnym mieszaniu światła pochodzącego z dwóch źródeł A i B, wypadkowy strumień świetlny Φ_F jest sumą strumieni składowych:

$$(2) \quad \Phi_F = \Phi_A + \Phi_B$$

gdzie: Φ_F – strumień świetlny mieszanki, $\Phi_{A,B}$ – strumienie świetlne składowych źródeł A i B.

Kolejną właściwością układu kolorymetrycznego XYZ jest fakt, że w wyniku addytywnego mieszania dwóch barw A i B o współrzędnych chromatycznych x_A, y_A oraz x_B, y_B otrzyma się barwę C, o współrzędnych x_C, y_C leżącą na prostej, łączącej obie barwy składowe (rys. 1) [2].



Rys.1. Addytywne mieszanie chromatyczności barw A i B

Jeżeli barwy zmieszane są w stosunku ilościowym (odpowiadającym stosunkowi ich strumieni świetlnych) wynoszącym m_A części barwy A i m_B części barwy B, to współrzędne barwy wypadkowej C wyniosą [2]:

$$(3) \quad \begin{aligned} x_C &= \frac{m_A \cdot x_A + m_B \cdot x_B}{m_A + m_B} \\ y_C &= \frac{m_A \cdot y_A + m_B \cdot y_B}{m_A + m_B} \end{aligned}$$

Pomimo zalet układu XYZ, dotyczących addytywnego sumowania chromatyczności oraz strumienia świetlnego pochodzącego z różnych źródeł, jego zasadniczą wadą jest znaczna nierównomierność percepcyjna [1] [4]. Skutkuje to tym, że niemożliwe jest porównanie chromatyczności strumieni świetlnych dwóch źródeł na podstawie ich euklidesowej odległości na płaszczyźnie barw.

Percepcyjnie równomierny trójchromatyczny model barw CIELAB, oznaczany także jako CIE $L^*a^*b^*$, został

opracowany przez CIE w 1976 roku. Układ ten powstał z nieliniowej transformacji układu XYZ, która opisana jest zależnościami (4). W przestrzeni tej współrzędna L^* reprezentuje jasność obiektu, natomiast parametry a^* , b^* składowe wektora barwności.

$$(4) \quad \begin{aligned} L^* &= 116 \cdot \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_W}} - 16 \\ a^* &= 500 \cdot \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_W}} \left[\sqrt[3]{\frac{y_W \cdot x}{x_W \cdot y}} - 1 \right] \\ b^* &= 200 \cdot \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_W}} \left[1 - \sqrt[3]{\frac{y_W \cdot z}{z_W \cdot y}} \right] \end{aligned}$$

gdzie: Y , Y_W – składowa trójchromatyczna rozpatrywanego źródła oraz źródła przyjętego jako punkt bieli; x , y , z – współrzędne trójchromatyczne źródła w pierwotnym układzie XYZ; x_W , y_W , z_W – współrzędne trójchromatyczne punktu bieli w układzie XYZ.

Transformacja ta sprawia, że różnica barw w układzie $L^*a^*b^*$ jest zwykłą odległością euklidesową pomiędzy dwoma punktami w przestrzeni trójwymiarowej:

$$(5) \quad \Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

Można przyjąć, że standardowy obserwator zauważa różnicę barw następująco:

$0 < \Delta E < 1$ – różnicę niezauważalna,

$1 < \Delta E < 2$ – różnicę zauważa jedynie doświadczony obserwator,

$2 < \Delta E < 3,5$ – różnicę zauważa niedoświadczony obserwator,

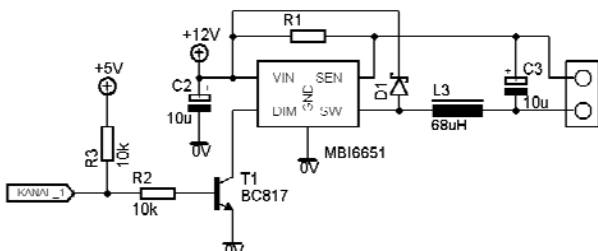
$3,5 < \Delta E < 5$ – zauważalna wyraźna różnica barw,

$5 < \Delta E$ – obserwator odnosi wrażenie dwóch różnych barw.

Układ elektroniczny realizujący mieszanie barw

Układ elektroniczny realizujący mieszanie barw składa się z trzech głównych bloków funkcyjnych. Pierwszym z nich jest mikrokontroler ATmega8 wraz z niezbędnymi do poprawnej pracy periferiami. Drugi to trzy niezależne impulsowe źródła prądowe, a schemat elektroniczny źródła zasilającego pojedynczy kanał pokazano na rysunku 2.

Głównym elementem źródła prądowego jest układ MBI6651. Jest to regulator step-down, będący w rzeczywistości stabilizatorem napięcia na rezystorze R_1 , które jest proporcjonalne do prądu płynącego przez diody. Pozostałe elementy źródła takie jak dławik L_3 , dioda zwrotna D_1 czy kondensatory filtrujące C_2 , C_3 pełnią takie same role, jak w układzie klasycznej przetwornicy obniżającej napięcie.



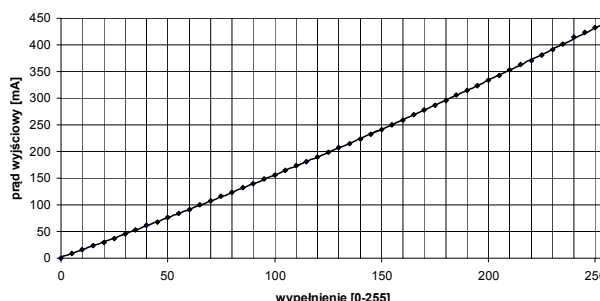
Rys.2. Schemat elektroniczny pojedynczego źródła prądowego

Poza wysoką sprawnością (w stosunku do klasycznych źródeł liniowych [8]) dochodzącą do 90%, niewątpliwą zaletą zastosowanego źródła jest możliwość regulacji prądu wyjściowego poprzez zmianę wypełnienia sygnału

sterującego podawanego na wyprowadzenie DIM. Według danych producenta relacja ta powinna być liniowa w całym zakresie regulacji. Jednak jak pokazały przeprowadzone testy rzeczywista charakterystyka regulacyjna, przedstawiona na rysunku 3, opisana jest równaniem drugiego rzędu (6).

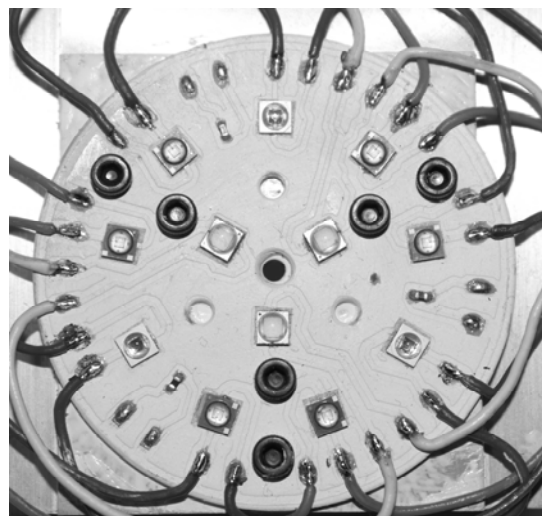
$$(6) \quad I_{LED} = 0,0012 \cdot W_{PWM}^2 + 1,4259 \cdot W_{PWM} + 1,6037$$

gdzie: I_{LED} – prąd płynący przez diody, W_{PWM} – wypełnienie sygnału sterującego.



Rys.3. Rzeczywista charakterystyka regulacyjna źródła prądowego

Ostatnim blokiem elektronicznym wchodzącym w skład systemu jest płytką drukowaną o podłożu aluminiowym (MCPCB), na której przylutowano metodą rozplwówką cztery łańcuchy LED-ów. Każdy z nich: czerwony, zielony, niebieski oraz biały składa się z trzech szeregowo połączonych LED-ów. W opisywanym przykładzie diody białe były odłączone od zasilania. Moduł z diodami został pokazany na rysunku 4.



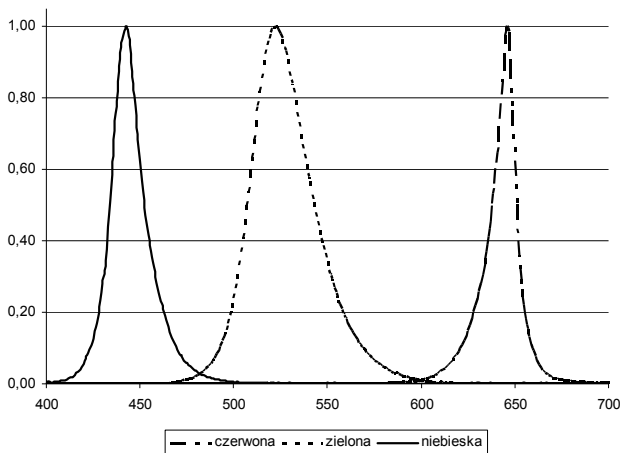
Rys.4. Moduł MCPCB z przylutowanymi diodami LED

Algorytm mieszania barw

Algorytm addytywnego mieszania barw został napisany w języku C i zaimplementowany w ośmiobitowym mikrokontrolerze Atmega8.

Do poprawnej pracy układ wymaga informacji na temat punktów chromatyczności poszczególnych LED-ów oraz zależności strumienia świetlnego od prądu zasilania poszczególnych diod. W celu wyznaczenia tych parametrów przeprowadzono szereg pomiarów.

Pierwszym etapem było wyznaczenie charakterystyk widmowych zastosowanych diod świecących. Pomiar został wykonany przy użyciu spektrometri OL-750 firmy Optronic Laboratories. Otrzymane charakterystyki spektralne przedstawiono na rysunku 5.



Rys.5. Względne charakterystyki spektralne diod zastosowanych w systemie

Otrzymane wyniki pozwoliły na obliczenie składowych trójchromatycznych diod z zależności:

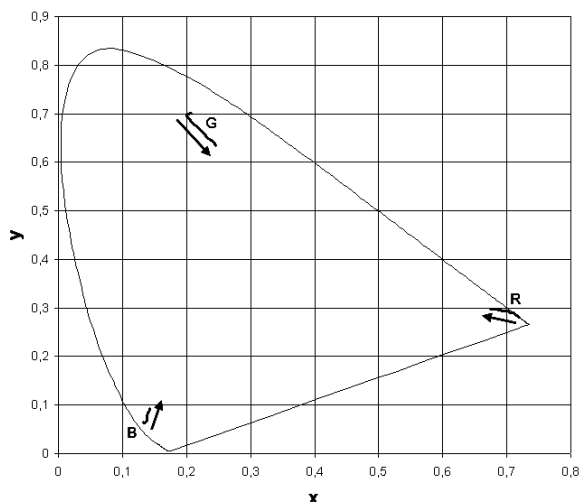
$$\begin{aligned}
 X &= \sum_{\lambda=380}^{780} P_e(\lambda) \cdot x_{2^\circ}(\lambda) \\
 Y &= \sum_{\lambda=380}^{780} P_e(\lambda) \cdot y_{2^\circ}(\lambda) \\
 Z &= \sum_{\lambda=380}^{780} P_e(\lambda) \cdot z_{2^\circ}(\lambda)
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

oraz współrzędnych trójchromatycznych

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z}, \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z}
 \tag{8}$$

gdzie: x, y, z – współrzędne chromatyczne, X, Y, Z – składowe chromatyczne, $P_e(\lambda)$ – widmowy rozkład strumienia energetycznego, $x_{2^\circ}(\lambda), y_{2^\circ}(\lambda), z_{2^\circ}(\lambda)$ – względne składowe trójchromatyczne obserwatora normalnego.

Pomiary powtórzone przy zasilaniu diod różnymi wartościami prądu. Wyznaczone punkty chromatyczności zamieszczono na rysunku 6. Strzałkami zaznaczono kierunek przesunięcia punktów chromatyczności składowych przy wzroście wartości prądu zasilania poszczególnych LED-ów.



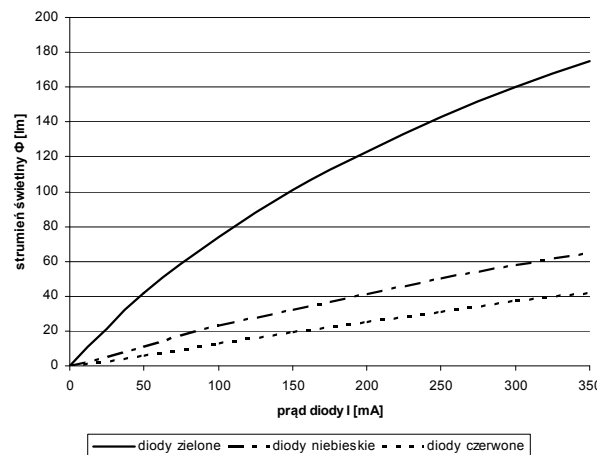
Rys.6. Współrzędne trójchromatyczne poszczególnych diod oświetlacza

Jak widać współrzędne trójchromatyczne LED-ów zbliżają się do środka trójkąta barw przy wzroście wartości prądu zasilania. Jest to zgodne z wynikami pomiarów innych badaczy [5], [6] oraz autorów [7], których poprzednie badania pokazały, że parametry kolorymetryczne diod elektroluminescencyjnych zmieniają się wraz ze zmianami temperatury złącza diody oraz prądu przez nią płynącego. W dalszych obliczeniach, jako współrzędne chromatyczności barw składowych, przyjęto średnie arytmetyczne z otrzymanych wyników. Wartości te zostały zestawione w tabeli 1.

Tabela 1. Współrzędne trójchromatyczne poszczególnych kanałów RGB

kanal	współrzędna chromatyczna x	współrzędna chromatyczna y
czerwony (R)	0,7210	0,2790
zielony (G)	0,2120	0,7250
niebieski (B)	0,1290	0,0660

Kolejnym krokiem było wyznaczenie strumienia świetlnego, który wyznaczono metodą pośrednią na goniometrze C – γ , przy różnych prądach zasilania diod. Na podstawie otrzymanych brył fotometrycznych, korzystając z metody sumowania strumieni cząstkowych, obliczono całkowite strumienie świetlne poszczególnych LED-ów. Uzyskane zależności przedstawiono na rysunku 7.



Rys.7. Zależność strumienia świetlnego od prądu zasilania LED-ów emitujących światło o różnych barwach

Analizując otrzymane wyniki można zauważyć, że strumienie świetlne poszczególnych łańcuchów diod LED mają różne wartości. Wynika to z definicji strumienia świetlnego:

$$\Phi = K_m \int_{380}^{780} P_e(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda
 \tag{9}$$

gdzie: Φ – strumień świetlny, K_m – fotometryczny równoważnik promieniowania, $P_e(\lambda)$ – widmowy rozkład strumienia energetycznego, $V(\lambda)$ – względna widmowa skuteczność świetlna ludzkiego oka.

Na podstawie (9) widać, że największy strumień świetlny Φ będą miały źródła, których widmowy rozkład mocy $P_e(\lambda)$ w znacznym stopniu pokrywa się z krzywą czułości ludzkiego oka $V(\lambda)$ dla widzenia fotonowego. W rozpatrywanych przypadku będą, więc to diody zielone.

Niezależnie od barwy emitowanego światła zależność strumienia świetlnego diody od jej prądu zasilania jest nieliniowa. Otrzymane relacje aproksymować można krzywymi drugiego rzędu:

$$\Phi_R = -0,0001 \cdot I_R^2 + 0,1337 \cdot I_R - 0,2083$$

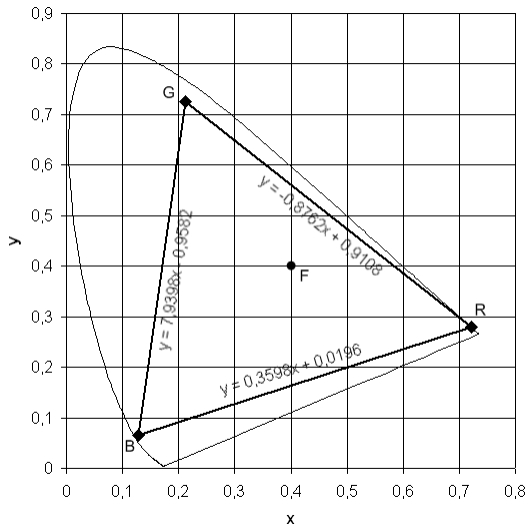
$$(10) \quad \Phi_G = -0,0008 \cdot I_G^2 + 0,7733 \cdot I_G + 2,75$$

$$\Phi_B = -0,0001 \cdot I_B^2 + 0,2357 \cdot I_B$$

gdzie: $\Phi_{R,G,B}$ – strumień świetlny kolejnych łańcuchów diod, $I_{R,G,B}$ – prąd zasilający diody.

Uzyskane wyniki dotyczące punktów chromatyczności LED-ów oraz zależności ich strumienia świetlnego od prądu zasilania zostały na stałe zapisane w pamięci mikrokontrolera. W aktualnej wersji algorytmu mieszania barw użytkownik nie ma możliwości zmiany ich wartości. Parametrami ustawianymi przez użytkownika systemu są współrzędne trójkątne mieszanki oraz żądana wartość strumienia świetlnego.

Po podaniu tych parametrów układ rozpoczyna obliczenia. W pierwszym kroku sprawdzane jest, czy wybrana mieszanka znajduje się wewnątrz trójkąta, którego wierzchołkami są punkty chromatyczności użytych diod LED. W tym celu kontroler wyznacza odcinki prostych łączących punkty R, G, B – rysunek 8.



Rys.8. Trójkąt barw możliwych do uzyskania w zaprojektowanym systemie

Następnie wyznaczane jest równanie prostej przechodzącej przez punkty B i F w postaci:

$$(11) \quad y = a_{BF} \cdot x + b_{BF}$$

której współczynniki a_{BF} , b_{BF} obliczane są z zależności:

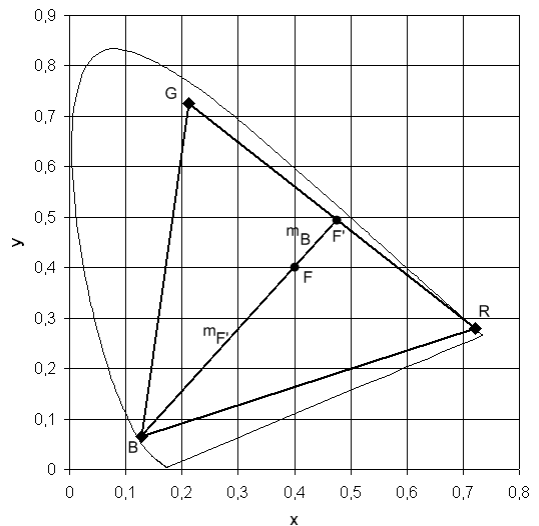
$$(12) \quad a_{BF} = \frac{y_B - y_F}{x_B - x_F}, \quad b_{BF} = y_F - a_{BF} \cdot x_F$$

Otrzymane wyniki wykorzystywane są do określenia punktu F' (rys. 9), w którym prosta BF przecina się z prostą RG. Współrzędne punktu F' obliczyć można z poniższych relacji:

$$(13) \quad x_{F'} = \frac{b_{RG} - b_{BF}}{a_{BF} - a_{RG}}$$

$$y_{F'} = \frac{a_{BF} \cdot b_{RG} - b_{BF} \cdot a_{RG}}{a_{BF} - a_{RG}}$$

gdzie: $x_{F'}$, $y_{F'}$ – punkt przecięcia prostych RG i BF, a_{RG} , b_{RG} – współczynniki prostej RG, a_{BF} , b_{BF} – współczynniki prostej BF.



Rys.9. Punkt przecięcia prostej BF z prostą RG

W następnym kroku obliczane są strumienie jednostkowe barw B i F' , których wartość jest proporcjonalna do długości odcinków m_B i $m_{F'}$ (rys. 9), korzystając z zależności:

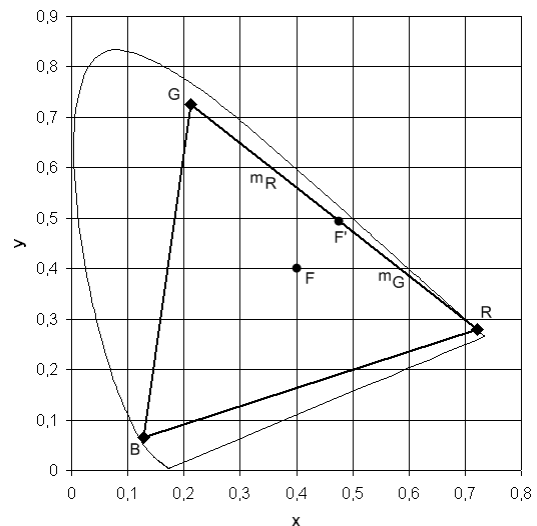
$$(14) \quad m_{F'} = \sqrt{(x_F - x_B)^2 + (y_F - y_B)^2}$$

$$m_B = \sqrt{(x_F - x_{F'})^2 + (y_F - y_{F'})^2}$$

Wartość strumienia świetlnego mieszanki F' jest w kolejnym etapie rozdzielana na strumienie jednostkowe barwy czerwonej oraz zielonej (rys. 10), analogicznie jak to miało miejsce w przypadku strumieni jednostkowych barw B i F'

$$(15) \quad m_R = \sqrt{(x_{F'} - x_B)^2 + (y_{F'} - y_B)^2}$$

$$m_G = \sqrt{(x_{F'} - x_R)^2 + (y_{F'} - y_R)^2}$$



Rys.10. Podział odcinka prostej RG na odcinki m_G i m_R

Po obliczeniu jednostkowych strumieni świetlnych poszczególnych LED-ów układ przeprowadza procedurę skalowania strumienia do wartości zadanej przez użytkownika. Uzyskane wartości rzeczywistych strumieni świetlnych w dalszym kroku pozwalają na wyznaczenie wypełnienia sygnału sterującego poszczególnymi kanałami. Układ dokonuje tego na podstawie zależności (6) oraz (10)

przekształconego do postaci pozwalającej na obliczenie prądu zasilania przy żądanym strumieniu świetlnym.

Analiza wyników

W celu weryfikacji działania układu przeprowadzono testy systemu. Układ miał za zadanie stworzenie wybranych przez użytkownika mieszanin strumieni świetlnych, których charakterystyki spektralne były następnie zmierzone przy pomocy spektrometru OL-750. Otrzymane charakterystyki widmowe posłużyły do obliczenia punktów chromatyczności zgodnie z zależnościami (7) i (8).

Współrzędne chromatyczne przykładowych mieszanin strumieni świetlnych zamieszczono w tabeli 2.

Tabela 2. Współrzędne tróchromatyczne przykładowych mieszanin

numer próbki	wartości zadane		wartości otrzymane	
	x	y	x	y
1	0,200	0,100	0,1713	0,0708
2	0,300	0,200	0,2597	0,1636
3	0,300	0,300	0,2649	0,2734
4	0,300	0,500	0,2791	0,5664
5	0,400	0,300	0,3626	0,2828
6	0,400	0,400	0,4081	0,4634
7	0,500	0,300	0,4755	0,2882
8	0,500	0,400	0,5097	0,4473

Przekształcając współrzędne tróchromatyczne układu XYZ do współrzędnych układu $L^*a^*b^*$ określono różnicę barwy pomiędzy wartościami zadanymi a uzyskanymi korzystając z zależności (5). Otrzymane wyniki zostały przedstawione w tabeli 3.

Tabela 3. Różnica barw ΔE pomiędzy zadaną a utworzoną chromatycznością przykładowych barwy

numer próbki	różnica barwy ΔE
1	1,2932
2	1,7122
3	1,3788
4	3,6308
5	1,3667
6	2,9899
7	0,8954
8	1,9587

Otrzymane wyniki pozwalają uznać, że opracowany algorytm działa poprawnie. Różnica barwy ΔE większości z otrzymanych mieszanin jest mniejsza niż 2. Pozwala to stwierdzić, że różnicę pomiędzy barwą zadaną a uzyskaną zauważy jedynie doświadczony obserwator.

Podsumowanie

W artykule przedstawiony została algorytm sterowania barwą światła emitowanego przez oświetlacz RGB. Algorytm ten został zaimplementowany w osmiobitowym mikrokontrolerze serii ATmega8. Przedstawiono wyniki działania opracowanego systemu.

Kolejnym etapem pracy nad udoskonalaniem omówionego układu sterowania barwą będzie dodanie modułu umożliwiającego pomiar chromatyczności poszczególnych składowych. Moduł ten jednocześnie zapewni optyczne sprzężenie zwrotne, mające na celu zmniejszenie różnicy barwy oraz zwiększenie jej stabilności.

Ponadto autorzy planują wyposażyć systemy w większą liczbę LED o różnych współrzędnych chromatycznych, aby poprawić ogólny wskaźnik oddawania barw otrzymanej mieszaniny strumieni świetlnych.

"Opracowano na podstawie wyników III etapu programu wieloletniego "Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy", finansowanego w latach 2014-2016 w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego/narodowego Centrum Badań i Rozwoju" - PW/BWP/WE/1/2014

Koordinator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy - Państwowy Instytut Badawczy

Wykonawca projektu: Politechnika Białostocka

LITERATURA

- [1] Fiok A., Telewizja – podstawy ogólne, WKiŁ, Warszawa 1996
- [2] Mielnicki J., Zarys wiadomości o barwie, Fundacja Rozwoju Polskiej Kolorystyki, Łódź 1997
- [3] Felhorski W., Staniach W., Kolorymetria tróchromatyczna, WNT, Warszawa 1973
- [4] Viscarra Rossel R.A., Minasny B., Roudier P., McBratney A.B., Colour space models for soil science, *Geoderma* Vol. 133, Issues 3–4 (2006), 320–337
- [5] Ackermann B., Schulz V., Martiny C., Hilgers A., Zhu X., Control of LEDs, *Industry Applications Conference* (2006), 2608 - 2615
- [6] Loo, K.H., Lai Y.M., Tan, S.C., Tse, C.K., On the Color Stability of Phosphor-Converted White LEDs Under DC, PWM, and Bilevel Drive, *Power Electronics, IEEE Transactions on* vol. 27 Issue 2 (2012), 974 – 984
- [7] Budzyński Ł., Influence of junction temperature on the spectral power distribution of Light Emitting Diodes, *Young Scientists Towards the Challenges of Modern Technology* (2014)
- [8] Wojtkowski W.: Programowe generatory PWM do wielokanałowej regulacji jasności świecenia LED mocy, *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 90 NR 3/2014

Autorzy: mgr inż. Łukasz Budzyński, Politechnika Białostocka, studia doktoranckie WE, ul. Wiejska 45D, 15-351 Białystok, e-mail: l.budzynski@pb.edu.pl; dr hab. inż. Maciej Zajkowski, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroenergetyki Fotoniki i Techniki Świetlnej, ul. Wiejska 45D, 15-351 Białystok, e-mail: maczak@we.pb.edu.pl