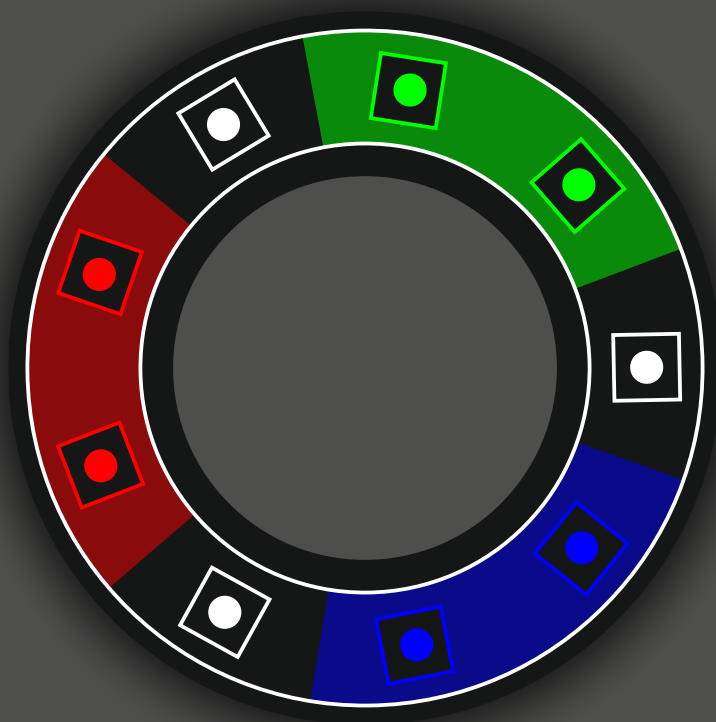


Łukasz Budzyński

Kształtowanie parametrów fotometrycznych i kolorymetrycznych modułów oświetleniowych ze źródłami LED



Łukasz Budzyński

**KSZTAŁTOWANIE PARAMETRÓW
FOTOMETRYCZNYCH
I KOLORYMETRYCZNYCH
MODUŁÓW OŚWIETLENIOWYCH
ZE ŹRÓDŁAMI LED**

 Politechnika
Białostocka

OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI BIAŁOSTOCKIEJ
BIAŁYSTOK 2021

Recenzenci:
dr hab. inż. Piotr Pracki, prof. PW
dr hab. inż. Antoni Różowicz, prof. PŚ

Redaktor naukowy dyscypliny automatyka, elektronika i elektrotechnika:
prof. dr hab. inż. Jan Dorosz

Redakcja i korekta językowa:
Janina Demianowicz

Skład, grafika i okładka:
Marcin Dominów

© Copyright by Politechnika Białostocka, Białystok 2021

ISBN 978-83-66391-68-0 (eBook)
DOI: 10.24427/978-83-66391-68-0



Publikacja jest udostępniona na licencji
Creative Commons Uznanie autorstwa-Użycie niekomercyjne-Bez utworów zależnych 4.0
(CC BY-NC-ND 4.0).

Pełną treść licencji udostępniono na stronie
creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.pl.
Publikacja jest dostępna w Internecie na stronie Oficyny Wydawniczej PB.

Oficina Wydawnicza Politechniki Białostockiej
ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok
e-mail: oficina.wydawnicza@pb.edu.pl
www.pb.edu.pl

Spis treści

Wykaz symboli i oznaczeń	5
Wstęp	7
1. Analiza parametrów półprzewodnikowych źródeł światła.....	9
1.1. Selekcja półprzewodnikowych źródeł światła.....	11
1.2. Charakterystyki prądowo-napięciowe wybranych LED-ów	11
1.3. Współrzędne trójchromatyczne wybranych LED-ów	14
1.4. Pomiar strumienia świetlnego wybranych LED-ów	25
Podsumowanie	30
2. Analiza parametrów scalonych czujników barwy.....	31
2.1. Względna czułość widmowa detektorów	37
2.2. Liniowość charakterystyki sygnału wyjściowego oraz zakres pomiarowy.....	38
2.3. Analiza parametrów kolorymetrycznych oraz kalibracja scalonych czujników barwy	50
Podsumowanie	68
3. Model oprawy o regulowanych parametrach	69
3.1. Odczyt parametrów kolorymetrycznych na powierzchni referencyjnej.....	69
3.2. Model oprawy LED o trzech barwach składowych.....	69
3.3. Model oprawy LED o czterech barwach składowych	78
Podsumowanie	91
4. Badania opracowanych modeli opraw LED.....	92
4.1. Układy sterowania modelu oprawy LED.....	92
4.2. Badania oprawy z modułem RGB	96
4.3. Badania oprawy z modułem RGBW	105
Podsumowanie	111
Podsumowanie.....	113
Literatura	116
Spis tabel.....	118
Spis rysunków	120

Niniejsza monografia powstała na bazie pracy doktorskiej autora, zatytułowanej *Metoda kształtowania parametrów fotometrycznych i kolorymetrycznych oprawy oświetleniowej ze źródłami LED*, której promotorem był dr hab. inż. Maciej Zajkowski, prof. nzw. PB

Pragnę serdecznie podziękować promotorowi dr hab. inż. Maciejowi Zajkowskiemu za pomoc otrzymaną przy realizacji pracy doktorskiej jak również niniejszej monografii

Autor

Wykaz symboli i oznaczeń

- a – współczynnik kierunkowy prostej przechodzącej przez rozpatrywane punkty
- a_p – współczynnik kierunkowy prostej prostopadłej do prostej przechodzącej przez rozpatrywane punkty
- a_R – współczynnik kierunkowy prostej równoległej do prostej przechodzącej przez rozpatrywane punkty
- a^*, b^* – składowe barwowe w układzie CIELAB
- b – wyraz wolny prostej przechodzącej przez rozpatrywane punkty
- b_p – wyraz wolny prostej prostopadłej do prostej przechodzącej przez rozpatrywane punkty
- b_R – wyraz wolny prostej równoległej do prostej przechodzącej przez rozpatrywane punkty
- B – składowa trójchromatyczna w układzie kolorymetrycznym CIE RGB 1931
- C – wektor składowych chromatycznych docelowego układu kolorymetrycznego
- d_R – odległość pomiędzy dwoma równoległymi prostymi
- E – natężenie oświetlenia
- G – składowa trójchromatyczna w układzie kolorymetrycznym CIE RGB 1931
- h – moduł barwy
- $I(C, \gamma)$ – światłość w kierunku (C, γ)
- I_F – natężenie prądu płynącego przez diodę spolaryzowaną w kierunku przewodzenia
- I_{IN} – natężenie prądu wejściowego wzmacniacza transimpedancyjnego
- I_{zas} – wartość prąd zasilania źródła kalibracyjnego
- k, k_{10° – czynniki normalizacyjne
- $k(\lambda)$ – widmowy współczynnik korekcyjny
- $k_\phi, k'_\phi, k''_\phi$ – współczynniki skalowania strumienia świetlnego
- K – prostokątna macierz transformacji
- L – macierz zawierająca składowe chromatyczne w lokalnym układzie kolorymetrycznym czujnika koloru
- $m_{11} \dots m_{33}$ – współczynniki macierzy transformacji
- M – kwadratowa macierz transformacji
- n_M – liczba poziomów różnicy barwy w notacji MacAdama
- P – moc elektryczna

Q	– prostokątna macierz transformacji czujnika MMCS6
r_o	– promień okręgu wyznaczającego granicę różnicy barwy
B	– składowa trójchromatyczna widmowa w układzie CIE RGB 1931
R	– składowa trójchromatyczna w układzie kolorymetrycznym CIE RGB 1931
R_a	– ogólny wskaźnik oddawania barw
R_K	– współczynnik determinacji funkcji
R_Z	– wartość rezystancji w pętli sprzężenia zwrotnego
S	– wektor składowych chromatycznych bazowego układu kolorymetrycznego
$S(\lambda)$	– charakterystyka widmowa badanego źródła światła
$S_C(\lambda)$	– względna widmowa czułość detektora
$S_k(\lambda)$	– unormowana charakterystyka widmowa badanego źródła światła
$S_{REF}(\lambda)$	– względna charakterystyka widmowa źródła referencyjnego
T	– macierz zawierająca składowe trójchromatyczne bazowego układu kolorymetrycznego
T_b	– temperatura barwowa
T_{bn}	– temperatura barwowa najbliższa
u, v, w	– współrzędne trójchromatyczne w układzie CIE UVW 1960
u_{MT104}	– niepewność pomiaru napięcia wyjściowego układu MT104
u_x, u_y, u_z	– napięcia wyjściowe detektora MTCiCS
$u_{425} \dots u_{675}$	– napięcia wyjściowe kolejnych torów pomiarowych czujnika MMCS6
U_F	– napięcie przewodzenia diody półprzewodnikowej
U, V, W	– składowe trójchromatyczna w układzie CIE UVW 1960
U^*, V^*, W^*	– składowe trójchromatyczna w układzie CIE $U^*V^*W^*$ 1964
U_{OUT}	– wartość napięcia na wyjściu wzmacniacza transimpedancyjnego
U_{REF}	– wartość napięcia referencyjnego
U_{zas}	– wartość napięcia zasilania źródła kalibracyjnego
u', v'	– współrzędne trójchromatyczne w układzie $U^*V^*W^*$
W_{MT104}	– poziom przetwarzania wzmacniacza transimpedancyjnego
x, y, z	– współrzędne trójchromatyczne w układzie CIE XYZ 1931
$\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$	– składowe trójchromatyczne widmowe obserwatora normalnego w układzie CIE XYZ 1931
X, Y, Z	– składowe trójchromatyczne w układzie CIE XYZ 1931
α_s	– kąt obserwacji czujnika
η	– skuteczność świetlna
λ	– długość fali
ρ	– współczynnik odbicia
ΔE_{CIE}	– różnica barwy w układzie CIE $U^*V^*W^*$ 1964
ΔE_{LAB}	– różnica barwy w układzie CIELAB
Φ	– strumień świetlny
Φ', Φ''	– wskaźniki strumienia świetlnego

Wstęp

Do końca lat dziewięćdziesiątych XX wieku głównymi sztucznymi źródłami światła stosowanymi w oświetleniu wnętrzowym były źródła żarowe, źródła fluorescencyjne oraz wysokoprężne lampy wyładowcze. Oprawy oświetleniowe ze źródłami elektroluminescencyjnymi stanowiły jedynie niewielki odsetek wszystkich produkowanych opraw oświetleniowych. Wynikało to głównie z faktu niskiej sprawności źródeł LED, słabych właściwości kolorymetrycznych emitowanego przez nie światła oraz wysokich kosztów produkcji.

Od początku XXI wieku nastąpiło zintensyfikowanie prac nad źródłami tego typu. Ich efektem jest wzrost strumienia świetlnego oraz skuteczności świetlnej diod emitujących promieniowanie z zakresu widzialnego. Ponadto, w przypadku achromatycznych źródeł LED poprawiono ogólny wskaźnik oddawania barw R_a .

Przedmiotem niniejszej monografii są zagadnienia związane z dynamicznym kształtowaniem wyjściowych parametrów fotometrycznych oraz kolorymetrycznych opraw oświetleniowych z półprzewodnikowymi źródłami światła. Wśród tych parametrów wyróżnić można między innymi wyjściowy strumień świetlny Φ oraz temperaturę barwową najbliższą T_{bn} emitowanego promieniowania.

Monografię podzielono na dwie części. Pierwszą poświęcono parametrom fotometrycznym i kolorymetrycznym wybranych modeli diod elektroluminescencyjnych oraz właściwościom scalonych czujników koloru dostępnych w ofercie handlowej czołowych producentów. W rozdziale pierwszym wyznaczono współrzędne trójchromatyczne oraz wartości strumienia świetlnego wybranych LED-ów. Na podstawie otrzymanych wyników podjęto ostateczną decyzję o przeznaczeniu konkretnych modeli diod do konstrukcji modeli opraw oświetleniowych. W rozdziale drugim zaprezentowano podstawowe parametry scalonych czujników koloru takich, jak względna czułość widmowa detektorów, zakres pomiarowy oraz liniowość charakterystyki przetwarzania. Wyjaśniono w nim również procedurę kalibracji czujników oraz metodykę wyznaczania macierzy transformacji pomiędzy układami kolorymetrycznymi.

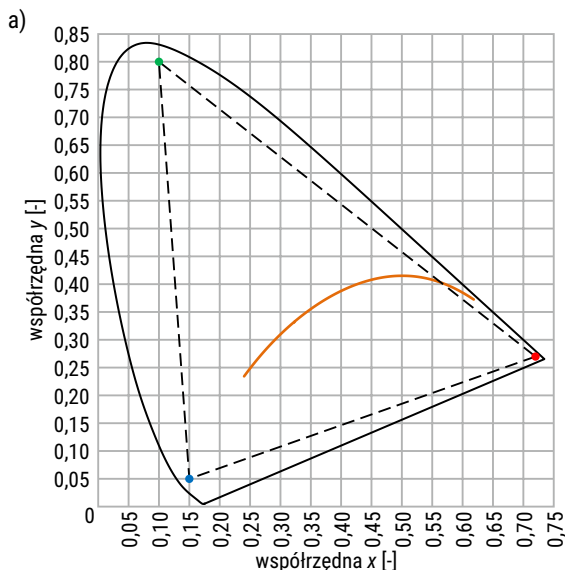
Drugą część pracy poświęcono konstrukcji modeli opraw LED oraz opracowaniu algorytmów sterowania. W rozdziale trzecim przedstawiono konstrukcje zaprojektowanych modułów oświetleniowych LED wykorzystujących trzy oraz cztery barwy składowe. Opisano w nim również opracowane algorytmy sterowania oprawami oświetleniowymi tego typu. W rozdziale czwartym przedstawiono konstrukcje układów elektronicznych odpowiedzialnych za sterowanie modelami opraw oświetleniowych oraz zaprezentowano wyniki badań laboratoryjnych opracowanych modeli

opraw bazujących na trzech oraz czterech barwach składowych. Podsumowano w nim również efekty badań zrealizowanych w ramach pracy oraz sformułowano wynikające z nich wnioski końcowe. Zaproponowano także możliwe dalsze kierunki badań nad oprawami i systemami oświetleniowymi bazującymi na wielu barwnych źródłach składowych.

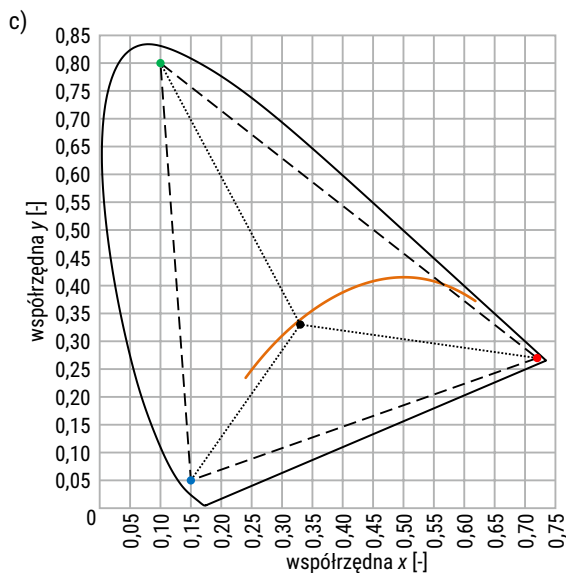
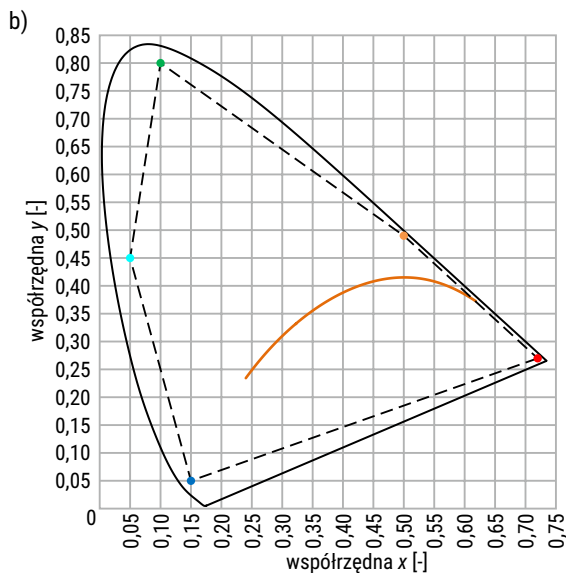
1. Analiza parametrów półprzewodnikowych źródeł światła

Jednym ze sposobów realizacji modelu oprawy oświetleniowej o płynnie regulowanych temperaturze barwowej najbliższej T_{bn} oraz strumieniu świetlnym może być zastosowanie źródeł składowych emitujących promieniowanie o wąskim zakresie widmowym. Przykładem takich źródeł są diody elektroluminescencyjne.

Na wykresach chromatyczności pokazanych na rysunku 1.1 zaproponowano kilka koncepcji modeli opraw oświetleniowych wraz z zaznaczeniem punktów chromatyczności potencjalnych źródeł składowych. Pierwsza zakładała użycie trzech barw składowych leżących w obszarach wierzchołków zadeklarowanego trójkąta barw – rysunek 1.1a. W drugiej, w celu poprawy ogólnego wskaźnika oddawania barw zaproponowano zastosowanie dodatkowych składowych z zakresu barw niebiesko-zielonej oraz żółto-pomarańczowej – rysunek 1.1b. Ostatnia koncepcja zakładała dodanie do trzech składowych barwnych czerwonej, zielonej oraz niebieskiej dodatkowej składowej achromatycznej – rysunek 1.1c.



RYS. 1.1. Współrzędne trójchromatyczne źródeł składowych zaproponowanych rozwiązań oprawy oświetleniowej: a) trzy składowe barwne RGB



RYS. 1.1. Współrzędne trójchromatyczne źródeł składowych zaproponowanych rozwiązań oprawy oświetleniowej: b) pięć składowych barwnych RGB+CA, c) trzy składowe barwne oraz jedna achromatyczna RGB+W

W dalszej części monografii zostaną przedstawione koncepcje oraz modele opraw oświetleniowych bazujących na trzech źródłach składowych RGB oraz na czterech źródłach RGB+W.

1.1. Selekcja półprzewodnikowych źródeł światła

Pierwszym etapem prac badawczych było przeprowadzenie analizy parametrów elektrycznych, fotometrycznych i kolorymetrycznych dostępnych handlowo źródeł półprzewodnikowych. Wstępnym testom poddano następujące modele diod elektroluminescencyjnych:

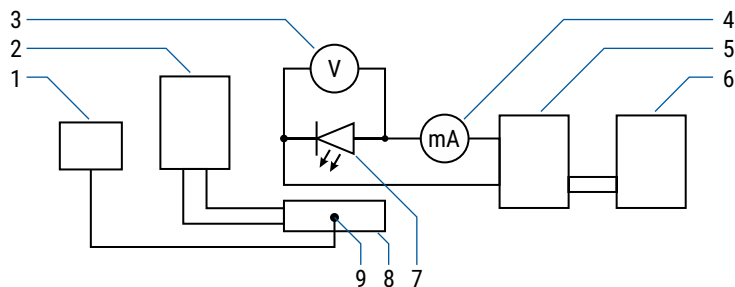
- 1) ProLight 3W Power LED PK2N-3LDE-SD – Royal Blue
- 2) ProLight 3W Power LED PK2N-3LBE-SD – Blue
- 3) ProLight 3W Power LED PK2N-3LCE-SD – Cyan
- 4) ProLight 3W Power LED PK2N-3LGE-SD – Green
- 5) ProLight 3W Power LED PK2N-3LAE-SD – Amber
- 6) ProLight 3W Power LED PK2N-3LME-SD – Crimson
- 7) ProLight 3W Power LED PK2N-3LEE-SD – Cherry Red
- 8) Cree XP-C XPCBLU – Blue
- 9) Cree XP-E XPEBGR – Green
- 10) Cree XP-C XPCGRN – Green
- 11) Cree XP-C XPCRDO – Red-Orange
- 12) Cree XP-E XPEBRD – Red
- 13) Cree XP-E XPEPHR – Photo Red
- 14) Cree XP-G XPGBWT – Cool White
- 15) Cree XP-G XPGBHT – Warm White

Wymienione modele LED-ów zostały wstępnie wyselekcjonowane na podstawie emitowanej przez nie barwy światła tak, aby możliwa była realizacja oprav oświetleniowych zgodna z przedstawionymi na rysunku 1.1 koncepcjami.

1.2. Charakterystyki prądowo-napięciowe wybranych LED-ów

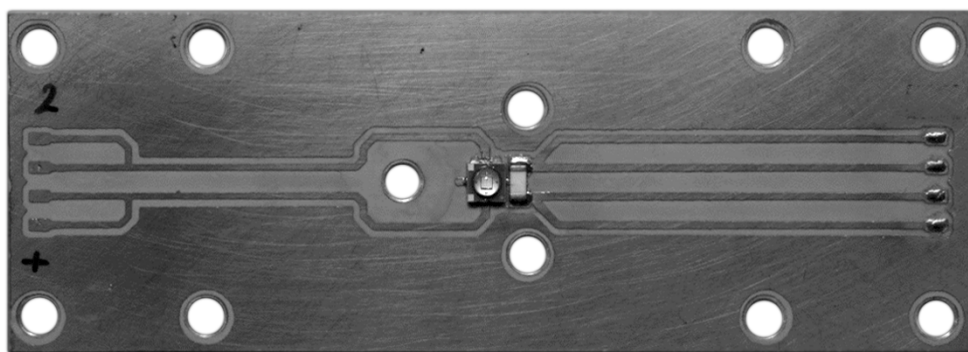
Pierwszym etapem było wyznaczenie charakterystyk prądowo-napięciowych poszczególnych modeli LED-ów. Do testów wybrano losowo po 10 egzemplarzy każdego z modeli diod w celu oszacowania tolerancji położenia punktu chromatyczności oraz strumienia świetlnego w stosunku do danych podawanych przez producenta.

Wyznaczenie charakterystyki prądowo-napięciowej w zakresie prądu zasilania od 0 mA do 500 mA wymagało wykonania kilkudziesięciu pomiarów. W tym celu opracowano automatyczny system pomiarowy, którego schemat blokowy przedstawiono na rysunku 1.2.



RYS. 1.2. Schemat blokowy automatycznego systemu pomiarowego do wyznaczania charakterystyk prądowo-napięciowych LEDów: 1 – rejestrator temperatury, 2 – zasilacz modułu chłodzącego, 3 – woltomierz, 4 – miliamperomierz, 5 – zasilacz laboratoryjny, 6 – komputer PC, 7 – badana dioda, 8 – moduł chłodzący, 9 – termorezystor PT100

Głównym elementem systemu pomiarowego był sterowany cyfrowo zasilacz laboratoryjny OWON ODP3031. Pomiar napięcia oraz prądu zrealizowano przy użyciu multimetrów cyfrowych Rigol DM3068. Badane diody przylutowano techniką rozplýwową na płytke drukowaną o podłożu aluminiowym (MCPCB), którą następnie przykręcono do modułu chłodzącego. Dodatkowo przy każdej diodzie zamontowano czujnik temperatury w postaci termorezystora PT100 w obudowie SMD 1206 – rysunek 1.3. Dane o zmianach temperatury rejestrowano przez kolejny multimetr Rigol DM3068. Cały system pomiarowy działał pod kontrolą oprogramowania LabView.



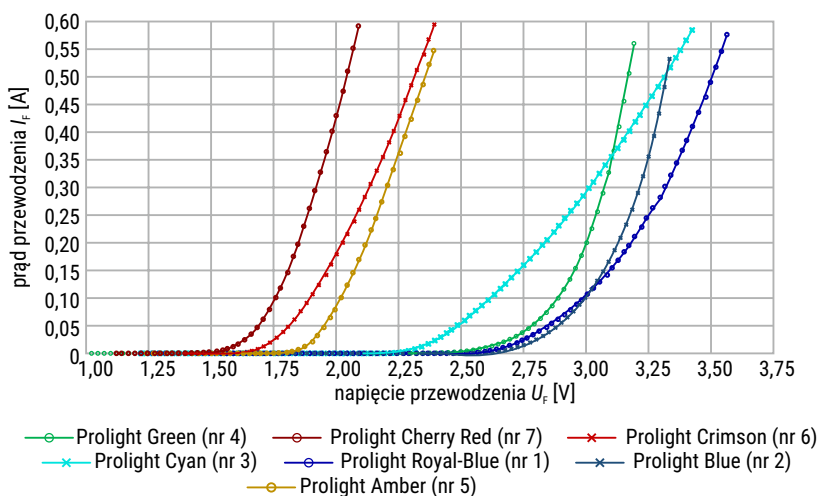
RYS. 1.3. Obwód drukowany o podłożu aluminiowym, do którego przylutowano testowane LED-y

W projektowanym modelu oprawy oświetleniowej do zasilania poszczególnych diod zaplanowano zastosowanie źródeł prądowych. Wydawało się więc właściwe wyznaczenie charakterystyki prądowo-napięciowej ze stałą rozdzielczością w zakresie prądu od 0 mA do wartości nominalnej danego modelu diody. Niestety, zastosowany zasilacz mógł pracować jedynie w roli źródła napięciowego z ograniczeniem prądowym, którego przekroczenie powodowało odłączenie obciążenia. Jednak biorąc pod

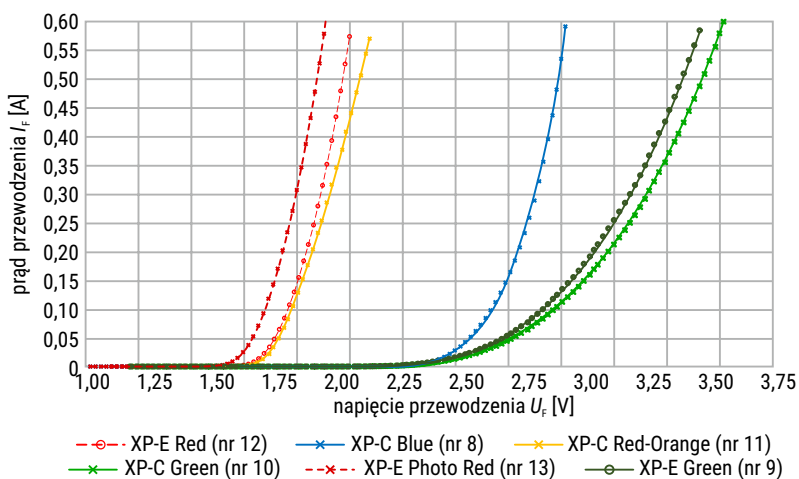
uwagę automatyzację procesu pomiarowego oraz możliwość zadania zmiany napięcia zasilania diody z rozdzielczością 25 mV (minimalna zmiana napięcia to 1 mV), zdecydowano się na przeprowadzenie badań w takiej formie.

Badaniu poddano po 10 egzemplarzy wybranych diod elektroluminescencyjnych. Ponadto, w celu ograniczenia przypadkowych błędów pomiarowych, charakterystyka prądowo-napięciowa każdej diody została zbadana dwudziestokrotnie. Otrzymane charakterystyki prądowo-napięciowe przedstawiono na rysunkach od 1.4 do 1.6.

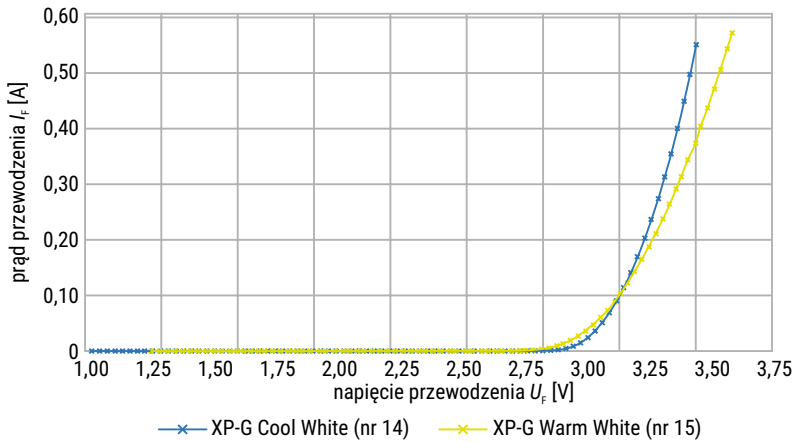
Charakterystyki na rysunkach od 1.4 do 1.6 przedstawiają uśrednione wyniki z wykonanych pomiarów.



RYS. 1.4. Charakterystyki prądowo-napięciowe wybranych LED-ów firmy Prolight



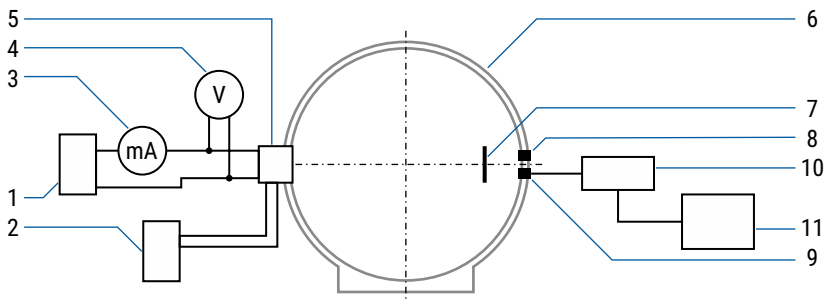
RYS. 1.5. Charakterystyki prądowo-napięciowe wybranych LED-ów firmy Cree



RYS. 1.6. Charakterystyki prądowo-napięciowe wybranych LED-ów firmy Cree

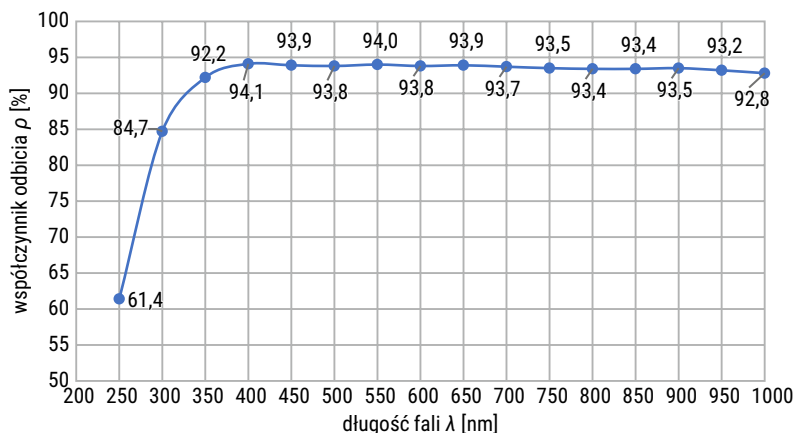
1.3. Współrzędne trójchromatyczne wybranych LED-ów

Kolejnym krokiem było wyznaczenie współrzędnych trójchromatycznych światła emitowanego przez wybrane diody. Badanie to podzielono na dwa główne etapy. Pierwszy etap badawczy dotyczył pomiaru widmowego rozkładu promieniowania emitowanego przez poszczególne egzemplarze wyselekcjonowanych diod. Do przeprowadzenia tego typu testów wykonano stanowisko badawcze, którego schemat przedstawiono na rysunku 1.7.



RYS. 1.7. Stanowisko badawcze do wyznaczania charakterystyk widmowych diod elektroluminescencyjnych: 1 – zasilacz laboratoryjny, 2 – zasilacz modułu chłodzącego, 3 – miliamperomierz, 4 – woltomierz, 5 – moduł chłodzący z badaną diodą, 6 – kula całkująca, 7 – przesłona, 8 – kolorymtr CL-200, 9 – światłowód z nasadką kosinusową, 10 – spektrometr CCD Stellar-net Black-Comet, 11 – komputer PC

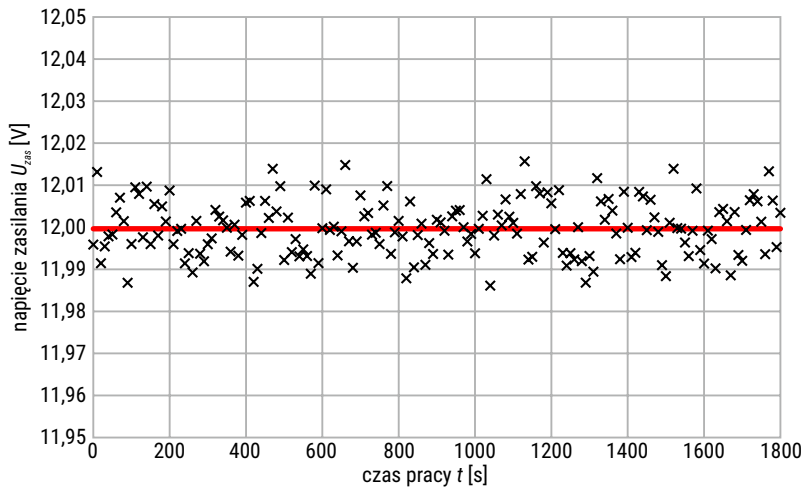
Głównym elementem stanowiska był spektrometr CCD firmy Stellarnet Black-Comet wraz z kulą całkującą o średnicy 500 mm. Zgodnie z zaleceniami dotyczącymi pokryć powierzchni wewnętrznej sfer całkujących stosowanych w fotometrii – kula od wewnątrz została pomalowana siarczanem baru rozpuszczonym w mieszaninie alkoholu poliwinylowego oraz izopropylowego [3], [4], [5], [22]. Widmowy współczynnik odbicia tego typu farby przedstawiono na rysunku 1.8.



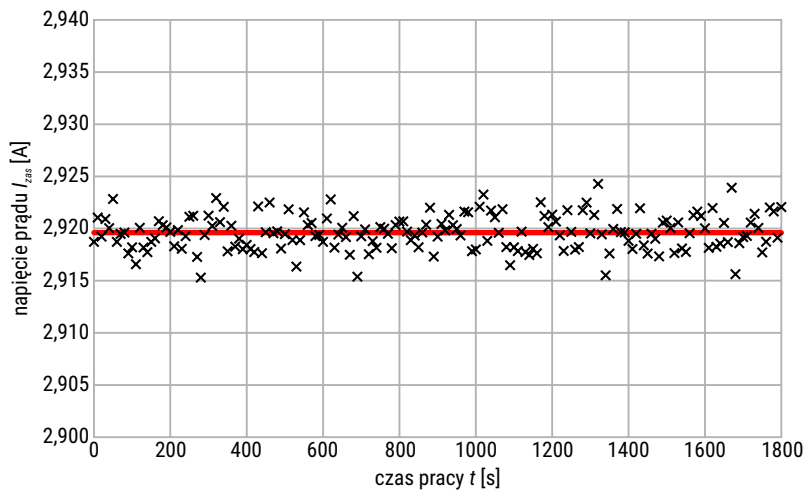
RYS. 1.8. Widmowy współczynnik odbicia farby na bazie siarczanu baru BaSO_4 [22]

Przed przystąpieniem do właściwego pomiaru charakterystyk spektralnych LED-ów, stanowisko pomiarowe należało skalibrować. Do tego celu posłużyły dwa źródła żarowe o mocy 35 W, których rozkłady spektralne wyznaczono przy użyciu spektrometrii wzorcowego OL-750 [23], z rozdzielczością 1 nm w zakresie od 300 nm do 1000 nm.

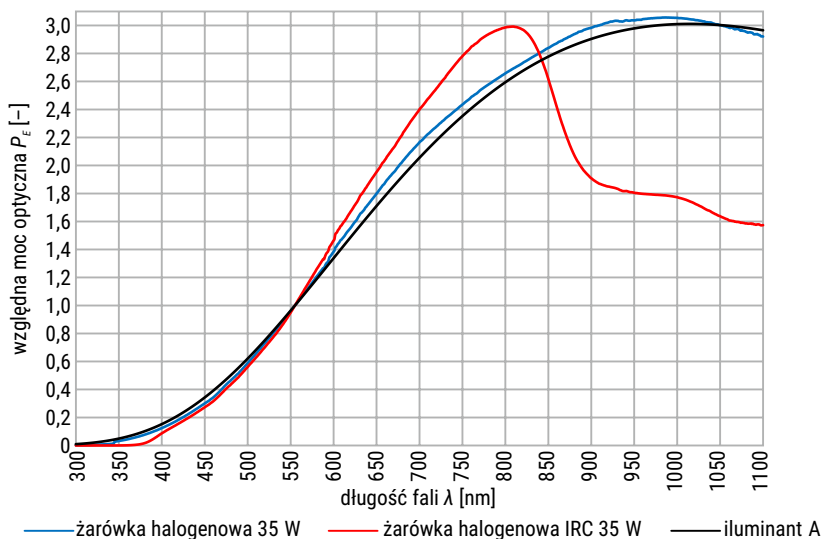
Oba źródła w czasie pomiarów podłączono do zasilacza laboratoryjnego Korad KA3005P, pracującego w trybie źródła napięciowego. Wartości prądu I_{zas} oraz napięcia zasilającego U_{zas} źródła rejestrowano przez cały czas trwania pomiaru multimetrami cyfrowymi Rigol DM3068 (rysunek 1.9 oraz 1.10). Otrzymane charakterystyki widmowe obu źródeł, po unormowaniu do wartości przy długości fali 555 nm, przedstawiono na rysunku 1.11.



RYS. 1.9. Wartość napięcia zasilającego U_{zas} źródła żarowe w czasie pomiaru spektrometrem OL-750

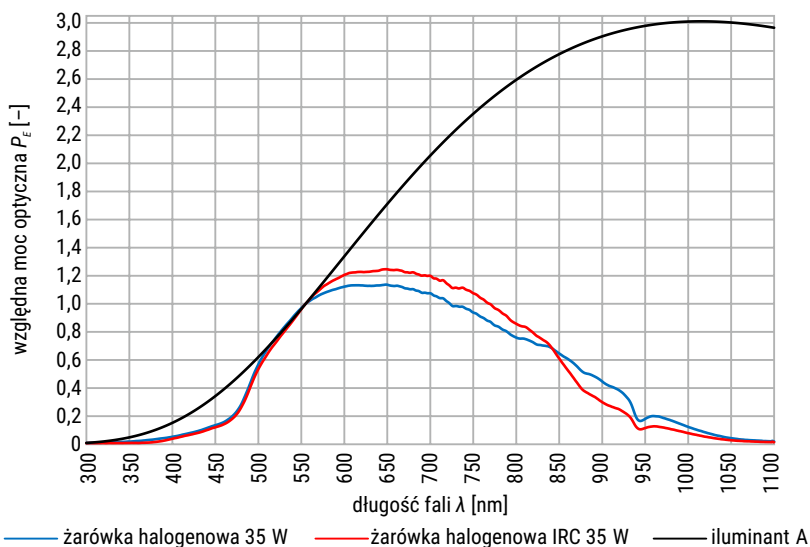


RYS. 1.10. Wartość natężenia prądu I_{zas} zasilającego źródła żarowe w czasie pomiaru spektrometrem OL-750



RYS. 1.11. Względne charakterystyki widmowe użytych źródeł żarowych (pomiar przy użyciu spektrometru OL-750) oraz teoretyczny rozkład iluminantu A

Następnym krokiem badawczym było umieszczenie badanego źródła w skali-browanej kuli całkującej. Wykonano serię 20 pomiarów spektrometrycznych dla każdego z rozpatrywanych źródeł światła. Wyniki uśredniono, a następnie unormowano do wartości przy długości fali 555 nm. Otrzymane wyniki przedstawiono na rysunku 1.12.



RYS. 1.12. Względne charakterystyki widmowe użytych źródeł żarowych (pomiar przy użyciu spektrometru Black-Comet) oraz teoretyczny rozkład iluminantu A

Porównując otrzymane charakterystyki (rysunek 1.11 oraz 1.12) widać, że rozkłady spektralne zmierzone spektrometrem Black-Comet znacząco różnią się od rzeczywistych rozkładów widmowych źródeł żarowych. Wynika to, po pierwsze, z nieliniowej charakterystyki czułości detektora krzemowego zastosowanego w spektrometrze CCD. Po drugie, współczynnik odbicia siarczynu baru przyjmuje różne wartości przy zmianie długości fali promieniowania padającego na powierzchnię kuli całkującej.

Wpływ obu tych zjawisk można ograniczyć wyznaczając widmowy współczynnik korekcyjny $k(\lambda)$:

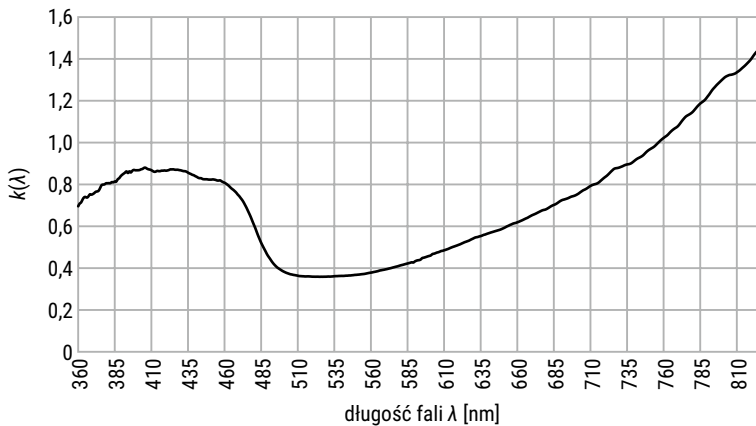
$$k(\lambda) = \frac{S_{K, REF}(\lambda)}{S_{REF}(\lambda)} \quad (1.1)$$

gdzie:

$S_{K, REF}(\lambda)$ – względna charakterystyka widmowa źródła referencyjnego wyznaczona kalibrowanym przyrządem,

$S_{REF}(\lambda)$ – względna charakterystyka widmowa źródła referencyjnego.

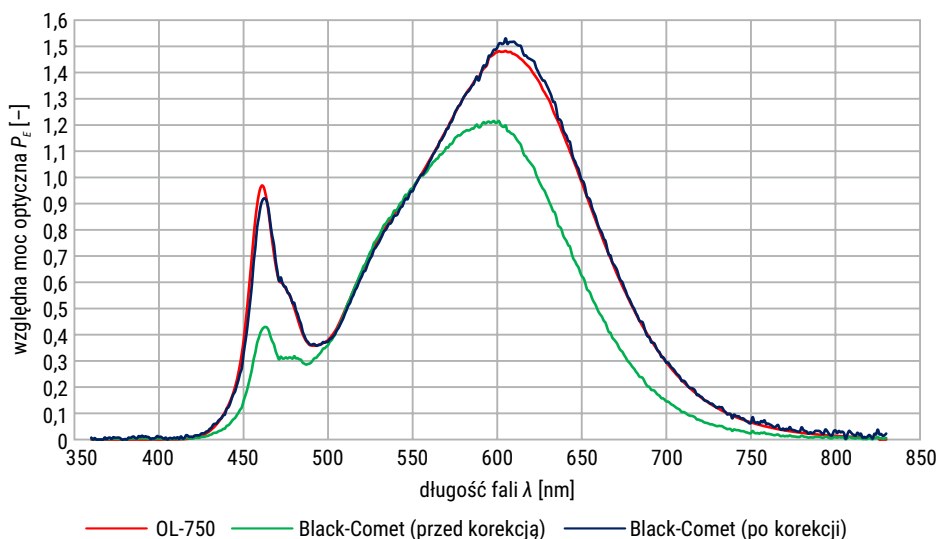
Na rysunku 1.13 przedstawiono wartości $k(\lambda)$ w zakresie długości fali od 360 nm do 830 nm, co odpowiada zakresowi składowych trójchromatycznych widmowych układów kolorymetrycznych zdefiniowanych przez CIE [6], [7], [18].



RYS. 1.13. Wartości widmowego współczynnika korekcyjnego opracowanego stanowiska pomiarowego

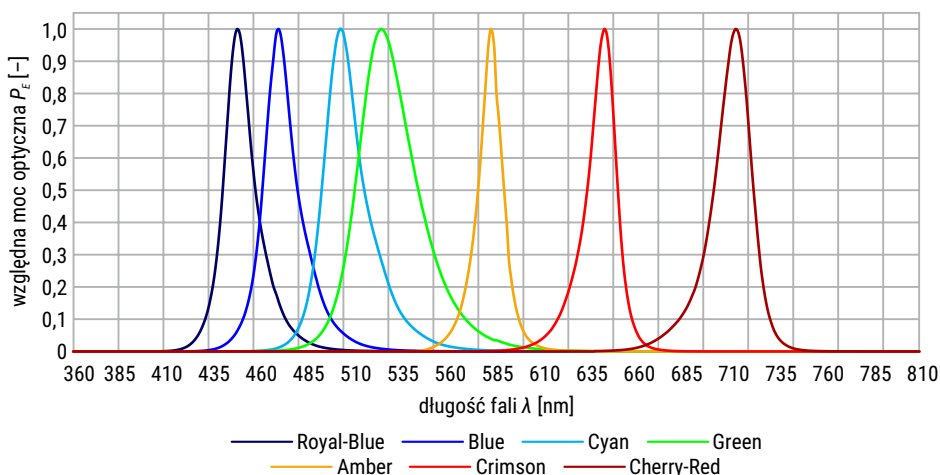
Względne charakterystyki zbadanych źródeł światła należało pomnożyć przez widmowy współczynnik korekcyjny, co pozwoliło na wyznaczenie rzeczywistych charakterystyk widmowych źródeł. Przykład charakterystyki przed oraz po korekcji przedstawiono na rysunku 1.14. Dodatkowo na wykresie pokazano względny rozkład widmowy promieniowania diody wykonany przy użyciu spektrometru OL-750 (linia czerwona). Jak widać, przed przeskalowaniem kształt charakterystyki wyznaczonej układem Black – Comet (linia zielona) znacząco różni się od rzeczywistego

rozkładu widmowego diody (linia czerwona). Przeprowadzenie procedury korekcyjnej sprawia, że względna skorygowana charakterystyka widmowa wyznaczona spektrometrem Black – Comet (linia niebieska) niemal w całym rozpatrywanym zakresie pokrywa się z rozkładem promieniowania wyznaczonym przy pomocy spektrometru OL-750.

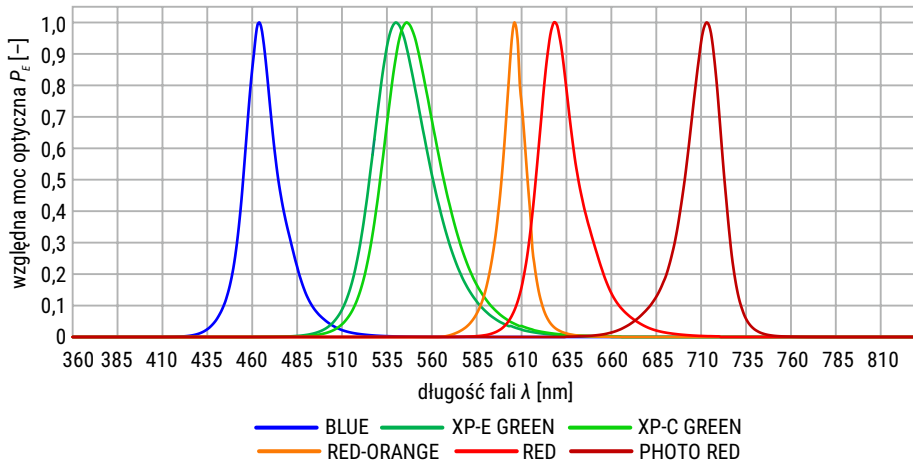


RYS. 1.14. Względne charakterystyki widmowe diody Cree XP-G XPG-BHT – Warm White przed oraz po uwzględnieniu współczynnika korekcyjnego

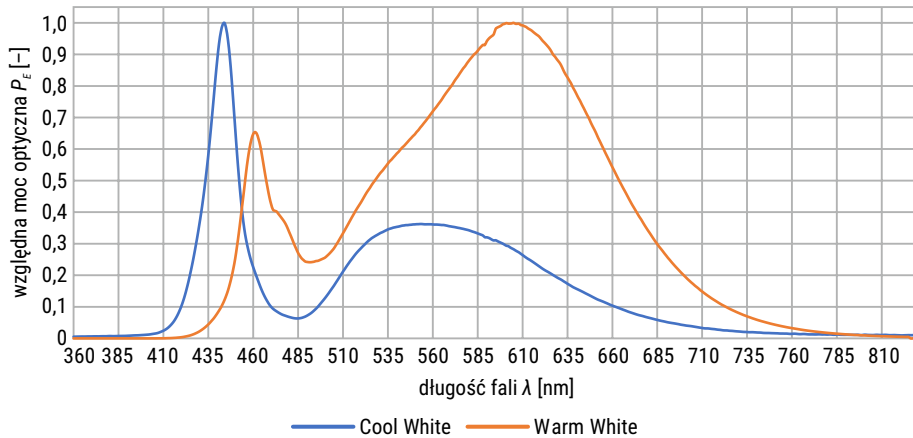
Na rysunkach 1.15, 1.16 oraz 1.17 przedstawiono względne charakterystyki widmowe wybranych diod elektroluminescencyjnych po przeskalowaniu ich przez wyznaczony uprzednio współczynnik korekcyjny $k(\lambda)$.



RYS. 1.15. Względne skorygowane charakterystyki widmowe wybranych LED-ów firmy ProLight



RYS. 1.16. Względne skorygowane charakterystyki widmowe wybranych LED-ów firmy CREE



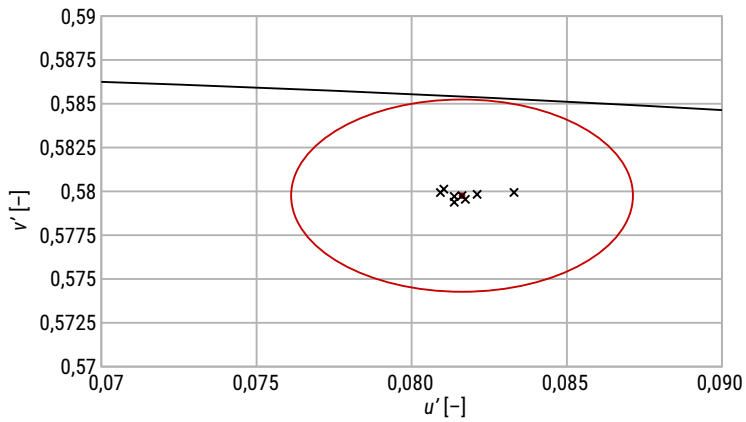
RYS. 1.17. Względne skorygowane charakterystyki widmowe wybranych LED-ów firmy CREE

Na podstawie wyznaczonych skorygowanych rozkładów spektralnych oraz składowych trójchromatycznych widmowych układu kolorymetrycznego XYZ, obliczono współrzędne trójchromatyczne x oraz y testowanych LED-ów [7],[18].

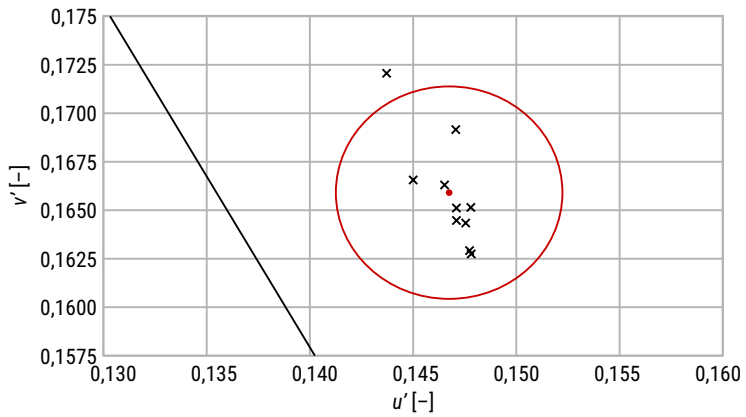
Drugi etap badawczy polegał na określeniu różnicy barwy ΔE_{CIE} pomiędzy kolejnymi egzemplarzami danego modelu diody. Analizę tą przeprowadzono na podstawie otrzymanych w pierwszym etapie wyników badań rozkładów widmowych. Obliczone współrzędne chromatyczne w układzie CIE XYZ 1931 przetransformowano do układu CIE $U^*V^*W^*$ [7], [8], [18]. Za współrzędne trójchromatyczne danego modelu diody przyjęto współrzędne obliczone jako średnia arytmetyczna wyników z 10 testowanych egzemplarzy LED-ów. Uzyskane w ten sposób przykładowe dane przedstawiono na rysunkach 1.18–1.21. Różnice barwy pomiędzy poszczególnymi egzemplarzami a średnią poszczególnych serii LED-ów zestawiono w tabeli 1.1.

TABELA 1.1. Różnice barwy ΔE_{CIE} pomiędzy przyjętą chromatycznością modeli diod a wynikami poszczególnych egzemplarzy

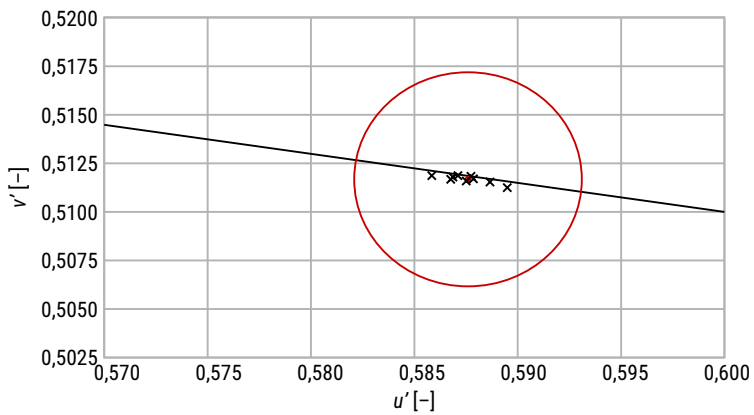
różnica barwy ΔE_{CIE}										
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	numer próbki
0,0012	0,0016	0,0058	0,0013	0,0005	0,0021	0,0010	0,0033	0,0080	0,0025	PK2N-3LDE-SD – Royal Blue $u' = 0,2071; v' = 0,0818$
0,0013	0,001	0,0002	0,0012	0,001	0,0003	0,0017	0,0015	0,0011	0,0011	PK2N-3LBE-SD – Blue $u' = 0,1069; v' = 0,2527$
0,0001	0,0003	0,0006	0,0004	0,0003	0,0005	0,0002	0,0003	0,0011	0,0005	PK2N-3LCE-SD – Cyan $u' = 0,0324; v' = 0,5613$
0,0007	0,0008	0,0002	0,0002	0,0003	0,0004	0,0001	0,0005	0,0017	0,0000	PK2N-3LGE-SD – Green $u' = 0,0816; v' = 0,5797$
0,0010	0,0011	0,0006	0,0001	0,0006	0,0007	0,0003	0,0004	0,0013	0,0011	PK2N-3LAE-SD – Amber $u' = 0,3338; v' = 0,5496$
0,002	0,0013	0,0003	0,0014	0,0001	0,0021	0,0017	0,0019	0,0022	0,0028	PK2N-3LME-SD – Crimson $u' = 0,5851; v' = 0,5118$
0,0002	0,0002	0,0013	0,0011	0,0004	0,0017	0,0003	0,0013	0,0022	0,0001	PK2N-3LEE-SD – Cherry Red $u' = 0,6215; v' = 0,5067$
0,0033	0,0069	0,0014	0,0008	0,0005	0,0031	0,0013	0,0019	0,0017	0,0033	XP-C XPCBLU – Blue $u' = 0,1468; v' = 0,1659$
0,0001	0,0007	0,0005	0,0001	0,0001	0,0008	0,0004	0,0008	0,0001	0,0001	XP-E XPEBGR – Green $u' = 0,0882; v' = 0,5800$
0,0003	0,0004	0,0004	0,0003	0,0001	0,0002	0,0008	0,0007	0,0006	0,0004	XP-C XPCGRN – Green $u' = 0,0880; v' = 0,5802$
0,0012	0,0008	0,0015	0,0015	0,0013	0,0005	0,0013	0,0047	0,0006	0,0013	XP-C XPCRDO – Red-Orange $u' = 0,3500; v' = 0,5444$
0,0004	0,0009	0,0001	0,0011	0,0009	0,0011	0,001	0,0025	0,0001	0,0014	XP-E XPEBRD – Red $u' = 0,4784; v' = 0,5164$
0,0003	0,0001	0,0020	0,0006	0,0011	0,0008	0,0017	0,0005	0,0002	0,0003	XP-E XPEPHR – Photo Red $u' = 0,5876; v' = 0,5117$
0,0001	0,0021	0,0011	0,0014	0,0004	0,0011	0,0008	0,0020	0,0012	0,0013	XP-G XPGBWT – Cool White $u' = 0,1993; v' = 0,4843$
0,0022	0,0016	0,0008	0,0022	0,0021	0,0015	0,0008	0,0004	0,0041	0,0023	XP-G XPGBHT – Warm White $u' = 0,2504; v' = 0,5217$



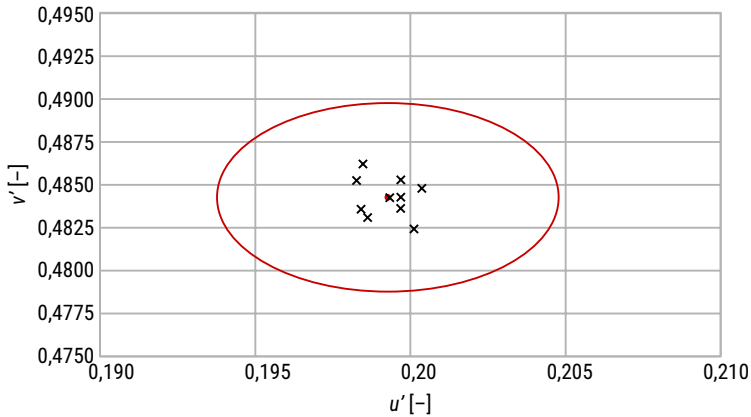
RYS. 1.18. Współrzędne trójchromatyczne diod PK2N-3LGE-SD – Green na płaszczyźnie $u'v'$



RYS. 1.19. Współrzędne trójchromatyczne diod XP-C XPCBLU – Blue na płaszczyźnie $u'v'$



RYS. 1.20. Współrzędne trójchromatyczne diod XP-E XPEPHR – Photo Red na płaszczyźnie $u'v'$



RYS. 1.21. Współrzędne trójkromatyczne diod XP-G XPGBW T – Cool White na płaszczyźnie $u'v'$

Wokół punktów przyjętych jako współrzędne serii pomiarowych zaznaczono okręgi różnicy barwy, będące uproszczonym odpowiednikami elips MacAdama w układzie kolorymetrycznym CIE XYZ 1931 [7], [17], [18].

Jak wiadomo, w ogólnym przypadku, kształt krzywych odpowiadających stałej różnicy barwy w układzie CIE $U^*V^*W^*$ przyjmuje kształt elips [6] [17], [18]. Ich opis matematyczny jest jednak kłopotliwy i od pewnego czasu prowadzono prace nad zmianą sposobu ich opisu. Jednym z efektów tych badań jest możliwość zastąpienia okręgiem elipsy różnicy barwy w układzie CIE $U^*V^*W^*$ z zakresu barw achromatycznych [8].

Na podstawie tych wytycznych oraz przeprowadzonych badań wielu producentów zdecydowało się zastąpić elipsy różnicy barwy okręgami, również w przypadku pól odpowiadających barwom chromatycznym [10].

Okręgi wyznaczające stałą różnicę barwy przedstawić można zależnością [8]:

$$(u' - u'_C)^2 + (v' - v'_C)^2 = r_O^2 = (0,0011 \cdot n_M)^2 \quad (1.2)$$

gdzie:

u', v' – punkty okręgu,

u'_C, v'_C – współrzędne środka okręgu,

r_O – promień okręgu,

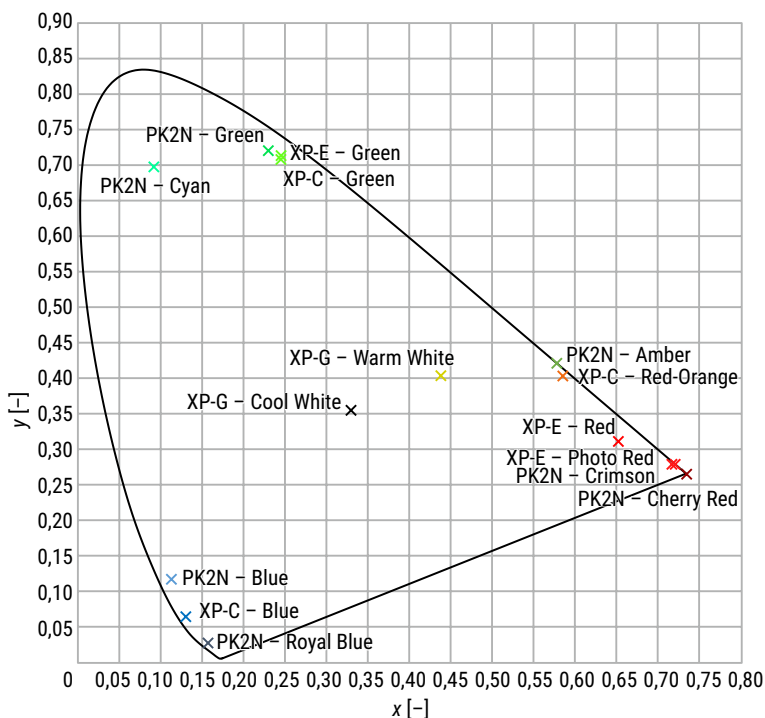
n_M – liczba poziomów różnicy barwy w notacji MacAdama.

Przyjęty promień okręgu $r_O = 0,0055$ odpowiada w przybliżeniu pięciu poziomom różnicy barwy w skali przyjętej przez MacAdama. Długość promienia okręgu r_O leży w tolerancji parametrów kolorymetrycznych akceptowalnej przez producentów wybranych LED-ów [24], [25], [26].

Obliczone w opisany powyżej sposób współrzędne trójchromatyczne wyselekcjonowanych LED-ów zestawiono na wykresie jednostkowym układu CIE XYZ 1931 – rysunek 1.22. Na jego podstawie można przedstawić pierwsze wnioski dotyczące wyboru konkretnych modeli diod, które należy zastosować w przyszłej konstrukcji oprawy LED.

Rozpatrując koncepcję przedstawioną na rysunku 1.1a celowe jest wybranie LED-ów, których punkty chromatyczności leżą jak najbliżej wierzchołków trójkąta barw. Takie rozmieszczenie barw składowych, po pierwsze, pozwoli uzyskać wypadkową mieszaninę ich strumieni świetlnych z niemal całego pola trójkąta jednostkowego. Po drugie, w przypadku tworzenia mieszaniny z zakresu barw achromatycznych zwiększy stabilność jej punktu chromatyczności.

W przypadku diod emitujących światło achromatyczne uzasadnione wydaje się użycie diody Cree XP-G XPGBWT – Cool White. Jej punkt chromatyczności leży bliżej środka ciężkości płaszczyzny jednostkowej (0,33; 0,33) i tym samym pola trójkątów RGW, RBW oraz GBW w koncepcji przedstawione na rysunku 1.1c będą zbliżone. Zastosowanie diody Cree XP-G XPGBHT – Warm White wyraźnie zmniejszy obszar zajmowany przez trójkąt RGW i zmniejszy precyzję ustawienia chromatyczności mieszaniny z tego obszaru.



RYS. 1.22. Współrzędne trójchromatyczne wybranych LED-ów

Podobny wniosek nasuwa się analizując wykresy z rysunków 1.15 oraz 1.17. Dioda PK2N-3LCE-SD – Cyan emituje największą wartość strumienia świetlnego w zakresie długości fali 508 nm, natomiast minimum promieniowania diody XP-G XPGBWT – Cool White odpowiada długości fali 484 nm. W celu otrzymania mieszaniny strumieni świetlnych tych dwóch LED-ów o wysokim wskaźniku oddawania barw R_a , zakres promieniowania diody PK2N-3LCE-SD – Cyan powinien zawierać długości fali od około 470 nm do 500 nm.

Podsumowując dotychczas otrzymane wyniki pomiarów, do konstrukcji modelu oprawy oświetleniowej LED jako źródło achromatyczne należy zastosować diodę XP-G XPGBWT – Cool White. W przypadku źródeł emitujących światło barwne jako składową o barwie czerwonej można wybrać spośród następujących modeli:

- ProLight 3W Power LED PK2N-3LME-SD – Crimson,
- ProLight 3W Power LED PK2N-3LEE-SD – Cherry Red,
- Cree XP-E XPEBRD – Red,
- Cree XP-E XPEPHR – Photo Red.
- Diody stanowiące składową o barwie zielonej można wybrać z modeli:
- ProLight 3W Power LED PK2N-3LGE-SD – Green,
- Cree XP-E XPEBGR – Green,
- Cree XP-C XPCGRN – Green.

Natomiast źródłem emitującym strumień świetlny o barwie niebieskiej może być jeden z następujących modeli diod:

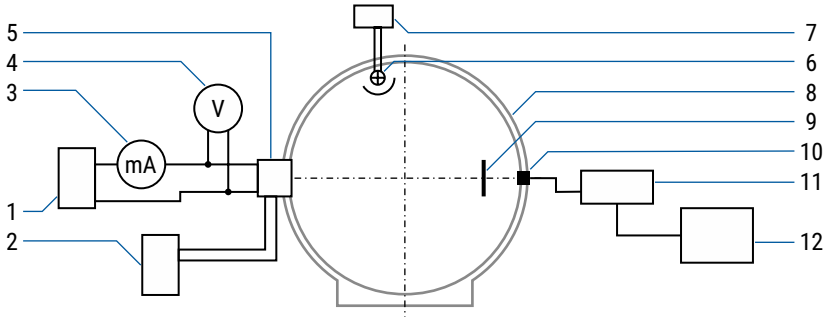
- ProLight 3W Power LED PK2N-3LDE-SD – Royal Blue,
- ProLight 3W Power LED PK2N-3LBE-SD – Blue,
- Cree XP-C XPCBLU – Blue.

W przypadku wymienionych modeli diod emitujących światło barwne niezbędne jest przeprowadzenie dodatkowych badań. Pomiary te mają na celu wyznaczenie zależności strumienia świetlnego Φ_i diody w funkcji prądu zasilania I_f oraz wybranie LED-ów o najwyższym strumieniu świetlnym Φ .

1.4. Pomiar strumienia świetlnego wybranych LED-ów

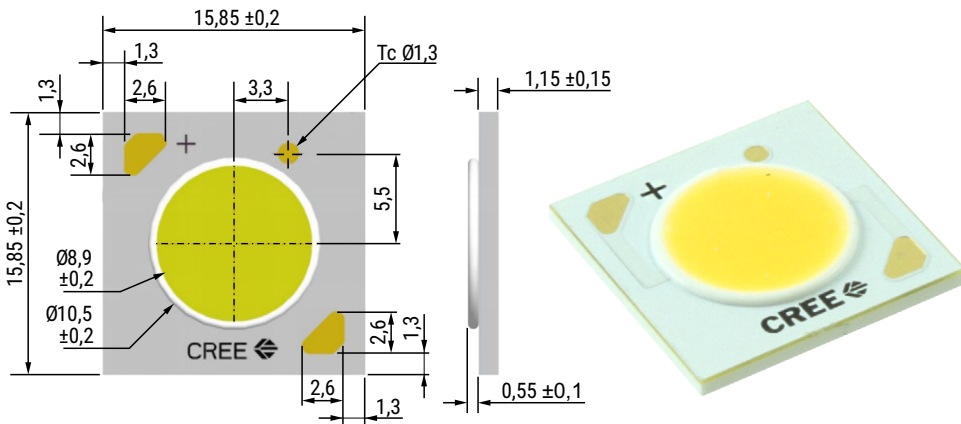
W pracach [3], [4], [5], [11] opisano dwie najczęściej stosowane metody wyznaczania strumienia świetlnego źródeł światła – metoda oparta na całkowaniu bryły fotometrycznej oraz metoda wykorzystująca lumenomierz kulisty. Pierwsza z nich zapewnia większą dokładność pomiaru, jest niestety czasochłonna. Natomiast dokładność pomiaru strumienia świetlnego w lumenomierzu kulistym w dużej mierze zależy od użytego wzorca strumienia świetlnego, w tym również od jego bryły fotometrycznej, której kształt powinien być zbliżony do bryły fotometrycznej badanego źródła.

Wyznaczenie zależności strumienia świetlnego w funkcji prądu zasilania diod przeprowadzono w kuli całkującej. W tym celu zmodyfikowano stanowisko pomiarowe do badania charakterystyk widmowych do postaci pokazanej na rysunku 1.23.



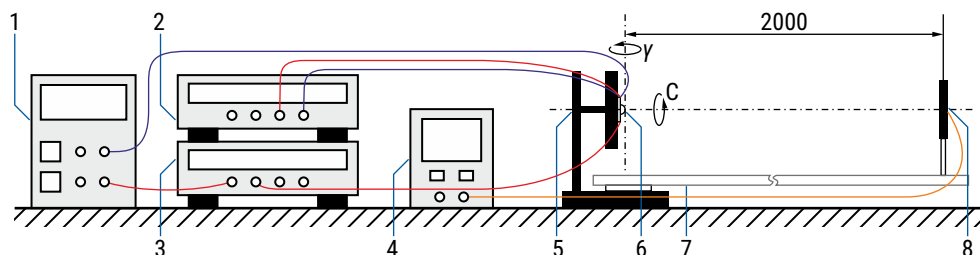
RYS. 1.23. Stanowisko badawcze do wyznaczania strumienia świetlnego diod elektroluminescencyjnych: 1 – zasilacz laboratoryjny, 2 – zasilacz modułu chłodzącego, 3 – miliamperomierz, 4 – woltomierz, 5 – moduł chłodzący z badaną diodą lub źródłem wzorcowym, 6 – źródło pomocnicze, 7 – zasilacz źródła pomocniczego, 8 – kula całkująca, 9 – przesłona, 10 – głowica luksomierza, 11 – luksomierz L-100, 12 – komputer PC

Przed właściwym pomiarem strumienia świetlnego wyselekcjonowanych LED-ów konieczne było wykonanie wzorca strumienia świetlnego, który jest niezbędny przy pomiarach w kuli całkującej. Jako źródło wzorcowe wybrano powierzchniową diodę elektroluminescencyjną firmy Cree o oznaczeniu CXA 1512 o temperaturze barwowej najbliższej 4000 K – rysunek 1.24.



RYS. 1.24. Dioda Cree CXA1512 Easy White 4000 K użyta jako wzorec strumienia świetlnego

Strumień świetlny Φ_w diody CXA 1512 obliczono na podstawie bryły fotometrycznej, wyznaczonej na stanowisku pomiarowym, którego schematyczną budowę pokazano na rysunku 1.25. Jego głównym elementem był fotometr ramienny o długości ramienia wynoszącej 2 metry. W czasie pomiarów diodę zasilano prądem o stałym natężeniu 100 mA. Do pomiaru natężenia oświetlenia wykorzystano luksomierz L-100 o błędzie granicznym nieprzekraczającym 2,5%.



RYS. 1.25. Stanowisko do wyznaczenia bryły fotometrycznej źródeł światła: 1 – zasilacz laboratoryjny, 2 – woltomierz, 3 – amperomierz, 4 – luksomierz L-100, 5 – fotometr, 6 – badana dioda, 7 – obrotowe ramię fotometru, 8 – głowica luksomierza

Otrzymane w czasie pomiarów wartości natężenia oświetlenia $E(C, \gamma)$ użyto do obliczenia światłości $I(C, \gamma)$ w danych kierunkach zgodnie z zależnościami opisanymi w pracach [4], [5]. Na ich podstawie, wyznaczono cząstkowe strumienie świetlne oraz całkowity strumień świetlny Φ_w diody CXA 1512 przy zasilaniu prądem o wartości 100 mA.

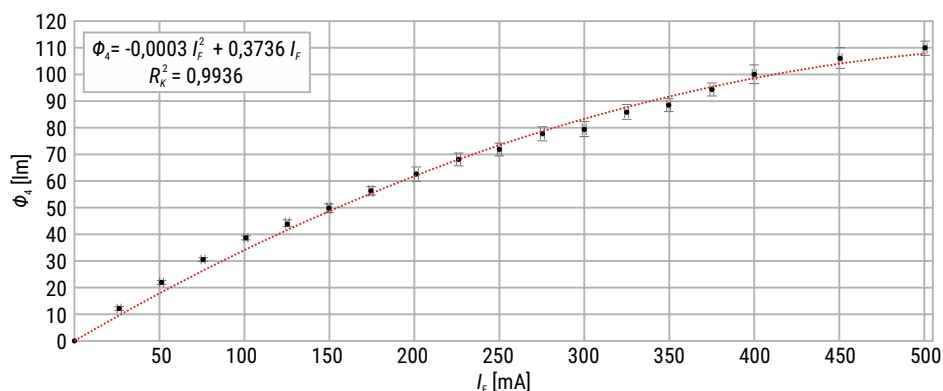
Po obliczeniu strumienia świetlnego wzorca Φ_{wz} przystąpiono do właściwego pomiaru strumienia świetlnego Φ_i wyselekcjonowanych egzemplarzy LED-ów. W czasie tego badania wyznaczono charakterystyki zmian strumienia świetlnego Φ_i poszczególnych egzemplarzy LED-ów w funkcji prądu zasilającego I_F w zakresie do 500 mA.

Podobnie jak w poprzednich etapach, badaniom poddano po 10 egzemplarzy każdej serii diod. Miało to na celu określenie tolerancji parametrów fotometrycznych danego modelu diody elektroluminescencyjnej. Dodatkowo pomiar każdego egzemplarza przeprowadzono dziesięciokrotnie, aby ograniczyć błędy przypadkowe.

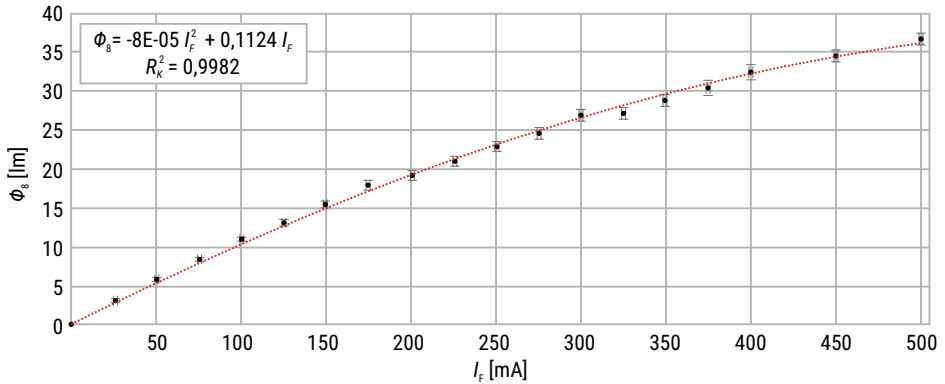
Otrzymane wyniki po uśrednieniu zebrano w tabeli 1.2. Cztery przykładowe charakterystyki pokazano na rysunkach od 1.26 do 1.29. Przedstawione na wykresach zależności strumienia świetlnego Φ_i w funkcji natężenia prądu zasilającego diody I_F wyznaczono korzystając z metody najmniejszych kwadratów. Wykresy zostały uzupełnione o „wąsy”, których górne końce wyznaczają największą zmierzoną wartość strumienia świetlnego Φ_i a dolne jego najmniejszą wartość.

TABELA 1.2. Równania opisujące zależność strumienia świetlnego Φ_i diody elektroluminescencyjnej od wartości natężenia prądu zasilającego I_F w zakresie od 0 do 500 mA

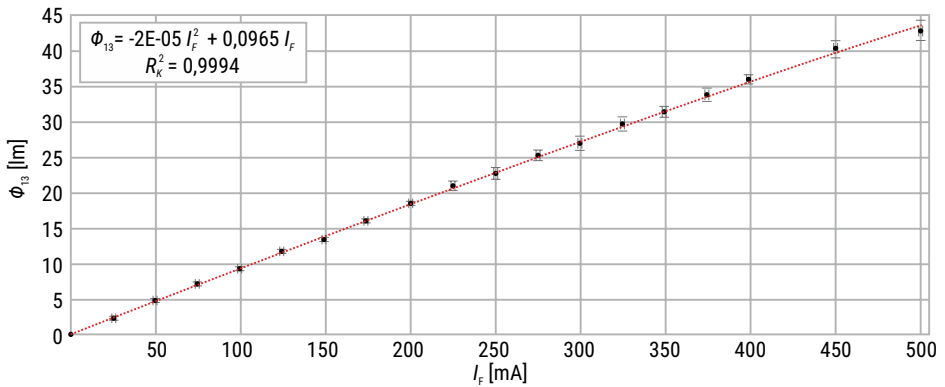
nazwa modelu diody	równanie regresji $\Phi_i(I_F)$	współczynnik determinacji funkcji R_k^2	maksymalna wartość strumienia świetlnego Φ_i [lm]
PK2N-3LDE-SD – Royal Blue	$\Phi_1 = -0,00003 \cdot I_F^2 + 0,0358 \cdot I_F$	0,9966	11,6
PK2N-3LBE-SD – Blue	$\Phi_2 = -0,00008 \cdot I_F^2 + 0,1124 \cdot I_F$	0,9982	36,7
PK2N-3LCE-SD – Cyan	$\Phi_3 = -0,0002 \cdot I_F^2 + 0,2522 \cdot I_F$	0,9923	77,0
PK2N-3LGE-SD – Green	$\Phi_4 = -0,0003 \cdot I_F^2 + 0,3736 \cdot I_F$	0,9936	109,8
PK2N-3LAE-SD – Amber	$\Phi_5 = -0,00007 \cdot I_F^2 + 0,1735 \cdot I_F$	0,9987	69,5
PK2N-3LME-SD – Crimson	$\Phi_6 = -0,00001 \cdot I_F^2 + 0,0764 \cdot I_F$	0,9995	35,2
PK2N-3LEE-SD – Cherry Red	$\Phi_7 = -0,000003 \cdot I_F^2 + 0,0055 \cdot I_F$	0,9977	2,0
XP-C XPCBLU – Blue	$\Phi_8 = -0,00008 \cdot I_F^2 + 0,1124 \cdot I_F$	0,9982	24,8
XP-E XPEBGR – Green	$\Phi_9 = -0,0002 \cdot I_F^2 + 0,2497 \cdot I_F$	0,9928	65,2
XP-C XPCGRN – Green	$\Phi_{10} = -0,0002 \cdot I_F^2 + 0,2543 \cdot I_F$	0,9897	69,8
XP-C XPCRDO – Red-Orange	$\Phi_{11} = -0,000007 \cdot I_F^2 + 0,1821 \cdot I_F$	0,9993	72,5
XP-E XPEBRD – Red	$\Phi_{12} = -0,000002 \cdot I_F^2 + 0,0929 \cdot I_F$	0,9985	41,3
XP-E XPEPHR – Photo Red	$\Phi_{13} = -0,000002 \cdot I_F^2 + 0,0965 \cdot I_F$	0,9994	42,9
XP-G XPGBWT – Cool White	$\Phi_{14} = -0,0001 \cdot I_F^2 + 0,4450 \cdot I_F$	0,9992	194,8
XP-G XPGBHT – Warm White	$\Phi_{15} = -0,0001 \cdot I_F^2 + 0,3387 \cdot I_F$	0,9995	141,2



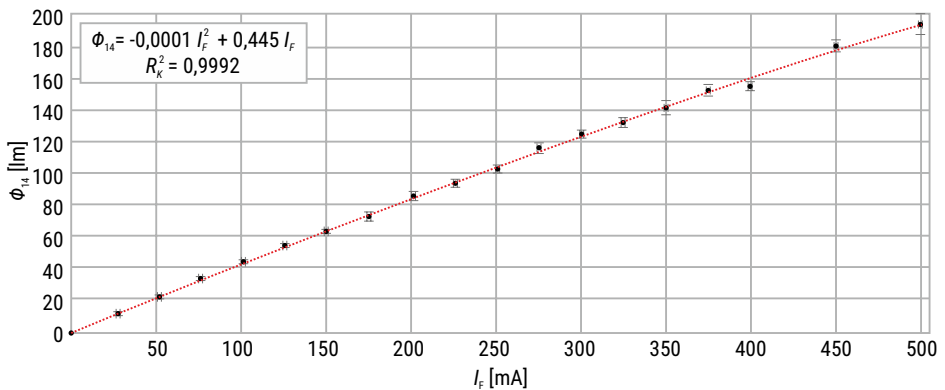
RYS. 1.26. Zależność strumienia świetlnego Φ_4 modelu diod LED PK2N-3LGE-SD – Green w funkcji prądu zasilania I_F



RYS. 1.27. Zależność strumienia świetlnego Φ_8 modelu diod XP-C XPCBLU – Blue w funkcji prądu zasilania I_F



RYS. 1.28. Zależność strumienia świetlnego Φ_{13} modelu diod XP-E XPEPHR – Photo Red w funkcji prądu zasilania I_F



RYS. 1.29. Zależność strumienia świetlnego Φ_{14} modelu diod XP-G XPGBWT – Cool White w funkcji prądu zasilania I_F

Podsumowanie

W rozdziale 1 opisano wyniki badań właściwości spektrometrycznych oraz fotometrycznych wyselekcjonowanych modeli diod elektroluminescencyjnych.

Pierwszy etap badań polegał na wyznaczeniu względnych charakterystyk widmowych wybranych LED-ów. Otrzymane wyniki pomiarów wykorzystano do obliczenia współrzędnych trójchromatycznych emitowanego przez nie promieniowania. Na tej podstawie, do modelu oprawy oświetleniowej bazującej na czterech źródłach składowych, jako źródło achromatyczne wybrano diodę Cree XP-G XPGWBWT – Cool White. Przyczynił się do tego fakt, że jej punkt chromatyczności leży bliżej środka ciężkości płaszczyzny jednostkowej układu kolorymetrycznego CIE XYZ 1931, dzięki temu pola trójkątów RGW, RBW oraz GBW w koncepcjach przedstawionych na rysunku 1.1c będą zbliżone. Ponadto, zbadano zmiany strumienia świetlnego w zależności od wartości natężenia prądu zasilającego. Na ich podstawie stwierdzono, że dioda ta charakteryzuje się wyższym strumieniem świetlnym niż jej odpowiednik emitujący promieniowanie o niższej temperaturze barwowej najbliższej.

Poza źródłami achromatycznymi, zbadano również diody emitujące promieniowanie barwne. Pierwszy etap badań pozwolił na wybranie grup diod spełniających warunki dotyczące parametrów kolorymetrycznych. W kolejnym etapie wyznaczono charakterystyki zmian strumienia świetlnego LED-ów, na podstawie których do dalszych etapów pracy nad modelem oprawy LED wybrano diody o najwyższym strumieniu świetlnym. Ostatecznie na podstawie obu etapów badań zdecydowano, że jako źródła emitujące promieniowanie barwne użyte zostaną modele diod:

- Cree XP-E XPE**PHR** – Photo Red,
- ProLight 3W Power LED PK2N-3LGE-SD – Green,
- Cree XP-C XPC**BLU** – Blue.

2. Analiza parametrów scalonych czujników barwy

Zgodnie z założeniami projektu, model adaptacyjnej oprawy oświetleniowej powinien być przystosowany do doświetlania pomieszczeń, które wstępnie zostały oświetlone światłem dziennym. Zadaniem oprawy oświetleniowej jest więc kontrola utrzymania zadanego poziomu natężenia oświetlenia (luminancji) na powierzchni oświetlanej oraz dostosowywanie parametrów kolorymetrycznych emitowanego strumienia świetlnego do właściwości strumienia świetlnego światła dziennego.

Do realizacji tego zadania można użyć scalonego matrycowego detektora, odpowiedzialnego za pomiar osiągniętego poziomu natężenia oświetlenia jak również parametrów kolorymetrycznych światła dziennego odbitego od powierzchni oświetlanej [12].

Spośród kilkunastu dostępnych handlowo scalonych matrycowych czujników barwy wyselekcjonowano i wybrano dwa, które poddano szczegółowym testom. Wyniki tych badań miały na celu wskazanie sensora, który pozwoli na jednoczesne określenie poziomu natężenia oświetlenia lub luminancji oświetlanej powierzchni oraz wyznaczenia współrzędnych trójchromatycznych w układzie CIE XYZ 1931, a tym samym określenie temperatury barwowej zarówno promieniowania padającego na powierzchnię oświetlaną, jak też powstałej mieszaniny. W czasie testów określono również niepewności wyników pomiarów realizowanych przez analizowane czujniki barwy.

Badaniom poddano następujące scalone matrycowe czujniki koloru:

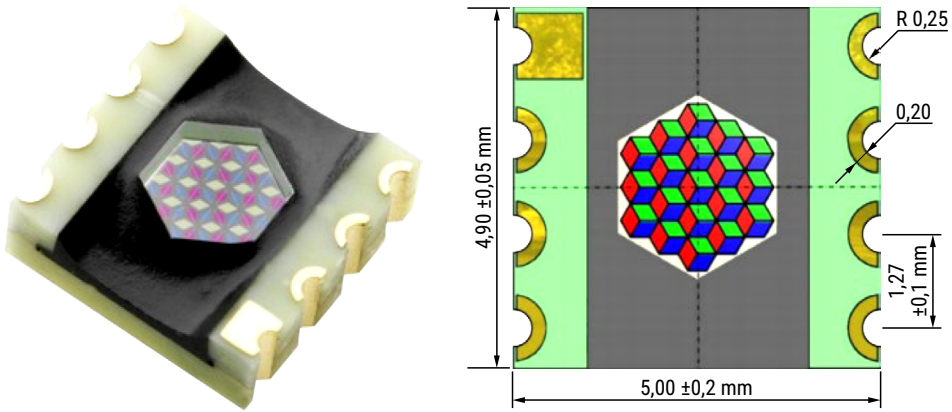
- MTCSiCS (MAZeT GmbH) [27],
- MMCS6CS (MAZeT GmbH) [28].

Wybór wymienionych czujników poprzedzono analizą dokumentacji technicznej udostępnionej przez producentów na stronach internetowych [27], [28]. Przy wstępnym wyborze sensorów kierowano się takimi parametrami jak: czułość widmowa, liniowość charakterystyki przetwarzania, zakres pomiarowy oraz sposób komunikacji z układami nadrzędnymi.

Oba modele wybranych czujników koloru produkowane są przez firmę MAZeT. Pierwszy z nich to układ MTCSiCS, którego zdjęcie oraz rzeczywiste wymiary pokazano na rysunku 2.1.

W układzie firmy MAZeT również zastosowano matrycę fotodiod, który pokryto warstwą filtrów optycznych o względnych widmowych czułościach zbliżonych do kształtu składowych trójchromatycznych widmowych obserwatora normalnego CIE, [7], [18]. W celu zwiększenia wartości sygnału wyjściowego sensora, jakim w tym detektorze jest zmiana natężenia prądu wyjściowego, wszystkie

fotodiody poszczególnych kanałów połączono równolegle. Biorąc pod uwagę ten rodzaj sygnału wyjściowego, przed odczytaniem go przez przetwornik analogowo – cyfrowy, konieczne jest zastosowanie w torze elektronicznym konwertera prąd – napięcie. W tym celu użyto dedykowany układ MTI04 (również produkowany przez firmę MAZeT). Jego schematyczna budowa została pokazana na rysunku 2.2.



RYS. 2.1. Układ MTCSiCS – widok oraz wymiary układu scalonego [27]

Układ MAZeT MTI04 jest czterokanałowym przetwornikiem prąd – napięcie. Głównym elementem każdego kanału jest wzmacniacz operacyjny pracujący w konfiguracji pokazanej na rysunku 2.2. Wartość sygnału wyjściowego U_{OUT} powiązana jest z wartością prądu wejściowego I_{IN} następującą relacją:

$$U_{OUT} = U_{REF} - I_{IN} \cdot R_Z \quad (2.1)$$

gdzie:

U_{OUT} – wartość napięcia wyjściowego,

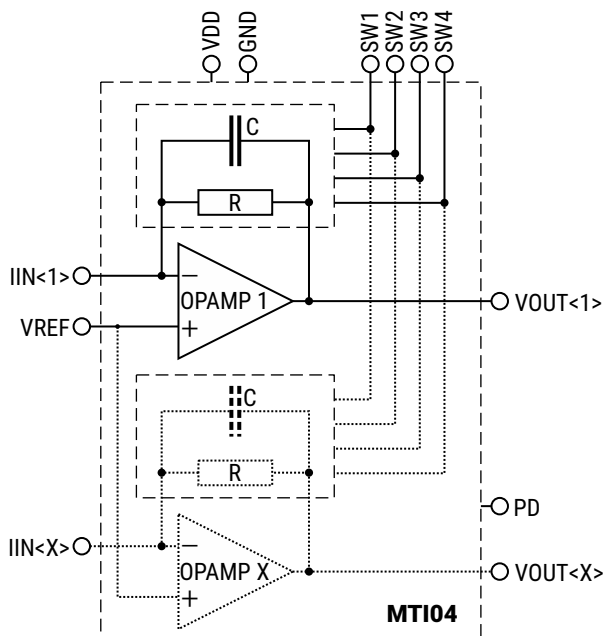
U_{REF} – wartość napięcia referencyjnego,

I_{IN} – wartość natężenia prądu wejściowego,

R_Z – wartość rezystancji wewnętrznego rezystora.

Istotną różnicą, w odniesieniu do innych układów tego typu lub przetworników zbudowanych z elementów dyskretnych, jest zastosowanie w układzie MTI04 multiplexera analogowego. W zależności od stanów logicznych panujących na wejściach cyfrowych SW1, SW2 oraz SW3, moduł ten pozwala na przełączanie wbudowanych w układ rezystorów sprzężenia zwrotnego. W ten sposób można regulować czułość całego toru pomiarowego ustalając poziom przetwarzania W_{MTI04} . Sygnały sterujące oraz wartości rezystancji sprzężenia zwrotnego przy różnych poziomach przetwarzania W_{MTI04} pokazano w tabeli 2.1.

Na podstawie sygnałów sterujących multiplexerem można zauważyć, że dopuszczalny zakres wahań rezystancji sprzężenia zwrotnego jest stosunkowo szeroki. Stworzyło to konieczność sprawdzenia tego parametru w czasie dalszych badań.



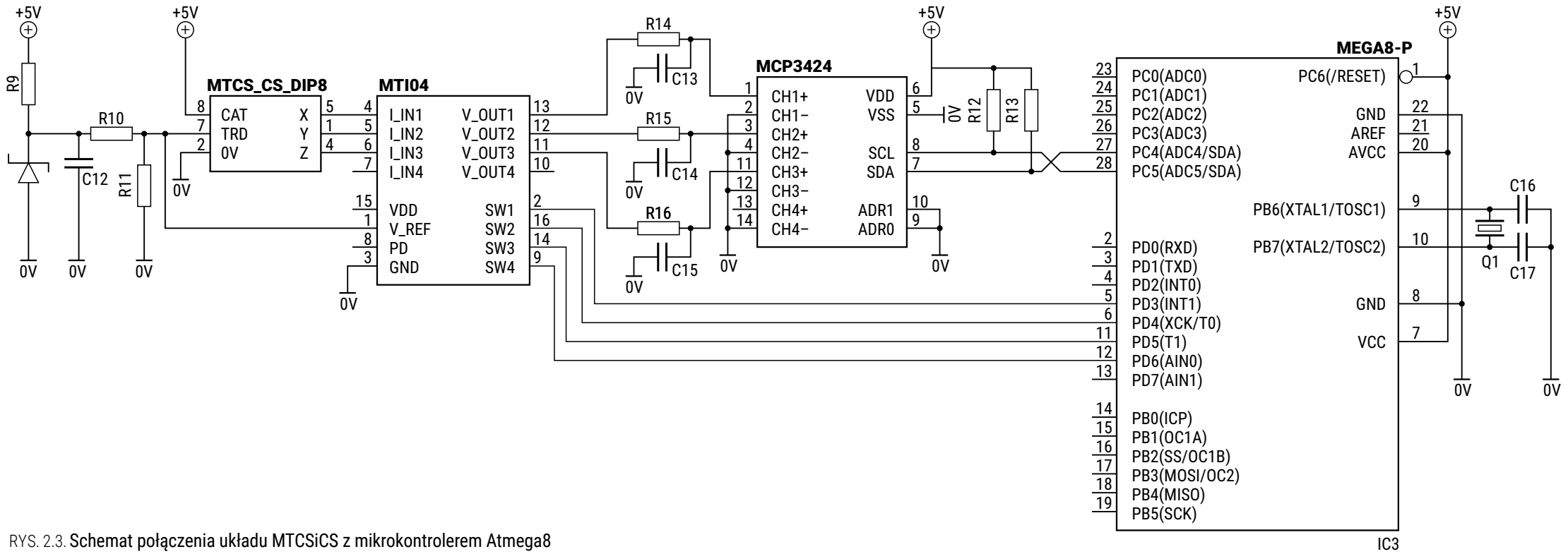
RYS. 2.2. Schematyczna budowa układu MAZeT MT104 [29]

TABELA 2.1. Sygnały sterujące multiplekserem oraz wartości rezystancji sprzężenia zwrotnego [29]

poziom przetwarzania W_{MT104}	napięcie na wejściach sterujących [V]			wartość rezystancji sprzężenia zwrotnego R_z [k Ω]		
	SW1	SW2	SW3	min.	typ.	max.
8	5	5	5	14 000	20 000	26 700
7	0	5	5	7 000	10 000	13 350
6	0	5	0	3 500	5 000	6 700
5	5	0	5	1 400	2 000	2 670
4	0	0	5	700	1 000	1 335
3	5	0	0	350	500	670
2	5	0	0	70	100	133
1	0	0	0	17	25	34

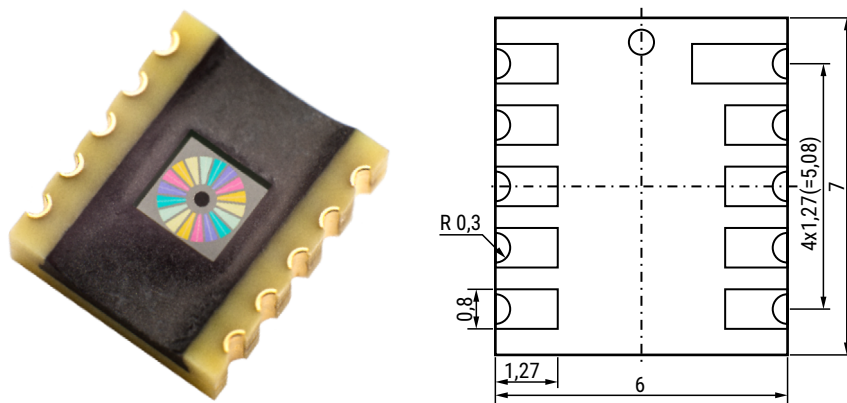
Kolejnym elementem toru pomiarowego są dolnopasmowe pasywne filtry R14C13, R15C14, R16C15 usuwające z wyjściowego sygnału napięciowego zakłócenia o wysokich częstotliwościach. Odfiltrowany w ten sposób sygnał odczytywany jest przez 18-bitowy przetwornik analogowo-cyfrowy MCP3424 [33], który z modulem sterującym komunikuje się przez magistralę I2C [32].

Schemat kompletnego układu elektronicznego niezbędnego do odczytu sygnałów z czujnika MTCSiCS pokazano na rysunku 2.3.



RYS. 2.3. Schemat połączenia układu MTCSiCS z mikrokontrolerem Atmega8

Drugim, z wyselekcjonowanych czujników koloru, jest układ MMCS6, którego zdjęcie oraz rzeczywiste wymiary pokazano na rysunku 2.4.

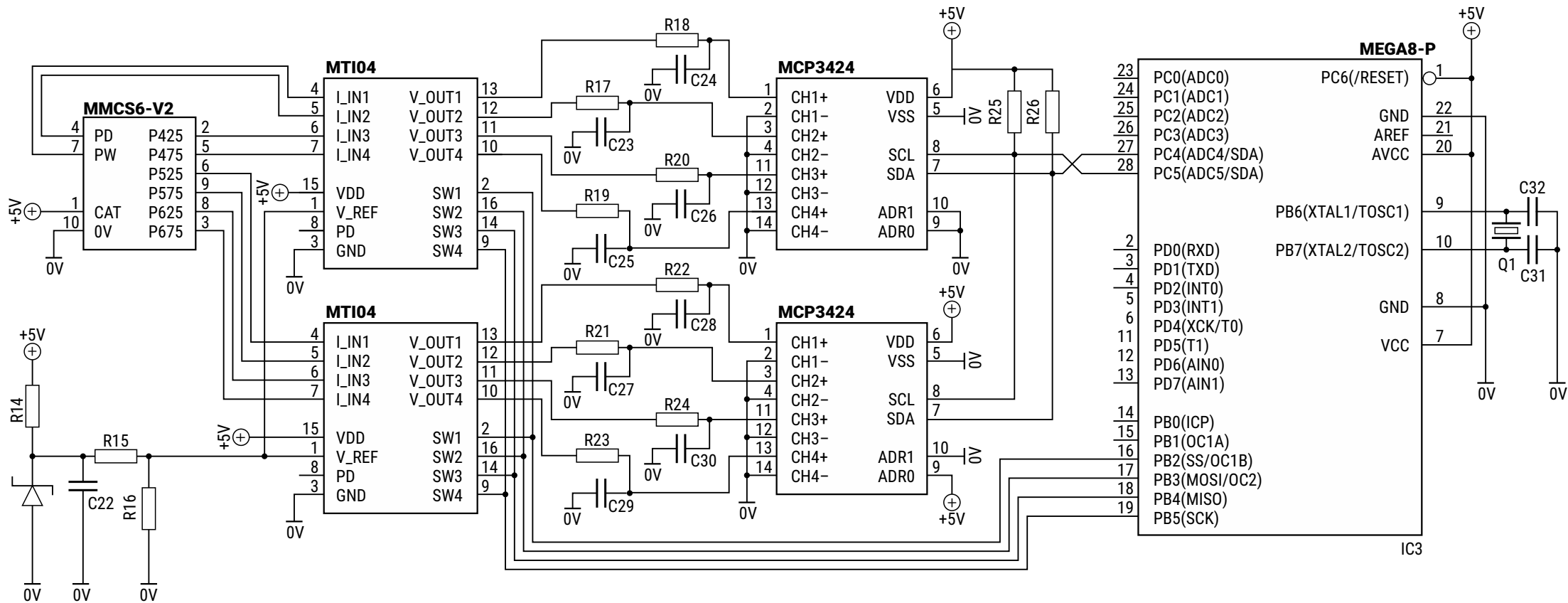


RYS. 2.4. Układ MMCS6 – widok oraz wymiary układu scalonego [28]

Jedną z charakterystycznych cech tego układu jest zastosowanie w nim matrycy detektorów rozmieszczonych na planie koła – rysunek 2.4. Jej powierzchnia została podzielona na 18 oddzielnych światłoczułych elementów, które pokryto sześcioma różnymi filtrami optycznymi. W układzie tym zastosowano dwie dodatkowe sekcje – centralne pole detektora pozostawione bez pokrycia filtrem optycznym oraz tak zwaną fotodiode „ciemną”, którą wbudowano w strukturę detektora, ale osłonięto przed dostępem promieniowania optycznego. Sygnał wyjściowy tej sekcji może być użyty do pomiaru prądu ciemnego całej matrycy bez konieczności zasłaniania powierzchni czynnej detektora. Charakterystyki czułości zastosowanych w układzie MMCS6 filtrów przeanalizowano w dalszych etapach badań.

Sygnał wyjściowy detektora MMCS6, podobnie jak układu MTCSiCS, jest sygnałem prądowym. Analogicznie jak w przypadku poprzedniego sensora, w torze pomiarowym zastosowano przetwornik prąd – napięcie. Jednak z racji większej liczby sekcji światłoczułych układu MMCS6 konieczne stało się użycie dwóch układów MTI04 – rysunek 2.2. Z wyjścia układu MTI04 analogowy sygnał napięciowy podano na pasywne filtry dolnoprzepustowe RC, a następnie na wejścia przetworników analogowo-cyfrowych MCP3424 o rozdzielczości 18 bitów. Schemat układu kondycjonowania sygnałów z detektora MMCS6 przedstawiono na rysunku 2.5.

Porównując układy elektroniczne z rysunków 2.3 oraz 2.5 można zauważyć, że układ przetwarzania sygnałów z sensora MMCS6 jest zwielokrotnieniem toru pomiarowego układu MTCSiCS. Tym samym wysnuć można wniosek, że czas pomiaru w takim układzie znacznie się wydłuży z powodu konieczności obsługi programowej dwóch przetworników analogowo-cyfrowych. Jednak w typowych warunkach pracy oba przetworniki pracują równolegle, a czas całego cyklu pomiarowego wydłuża się jedynie o czas potrzebny na wysłanie dodatkowych komend sterujących drugim przetwornikiem MCP3424, co nie przekracza 500 μ s.

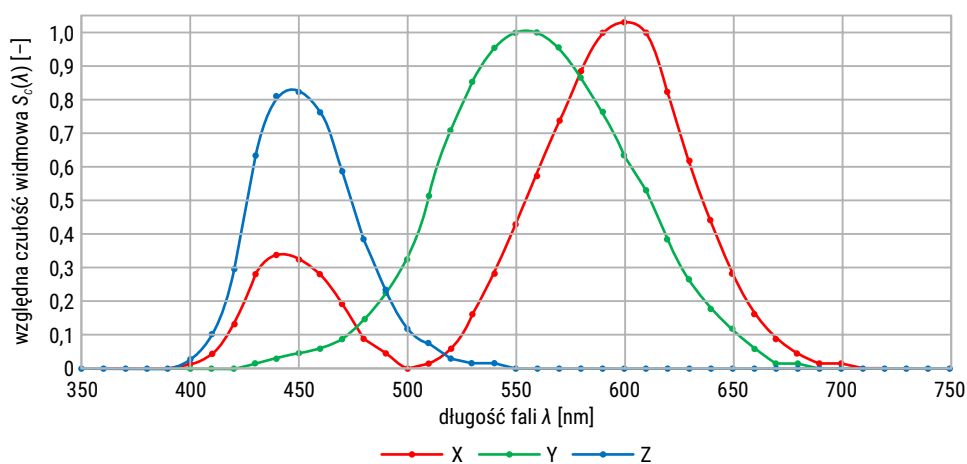


RYS. 2.5. Schemat połączenia układu MMCS6 z mikrokontrolerem Atmega8

2.1. Względna czułość widmowa detektorów

Jednym z parametrów czujnika koloru, który uwzględniano przy selekcji i wyborze danego modelu sensora, były względne charakterystyki czułości widmowej poszczególnych kanałów matrycy detektorów. Ten etap badań czujników ograniczono do analizy danych udostępnionych przez producentów w postaci dokumentacji technicznej. Na tej podstawie wyznaczono względne charakterystyki czułości widmowej poszczególnych kanałów matryc detektorów.

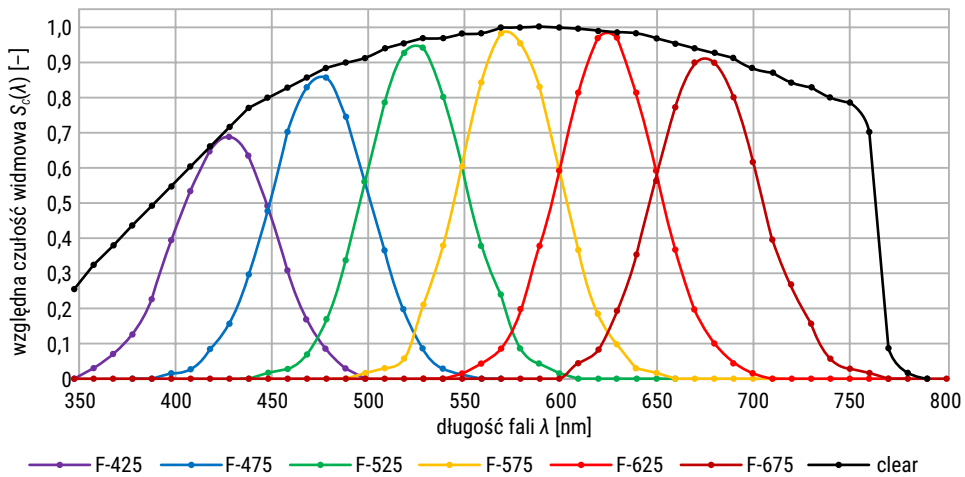
Biorąc pod uwagę ich katalogowe względne czułości widmowe, są to jedne z najciekawszych rozwiązań dostępnych na rynku. Po pierwsze czujnik MTCSiCS cechuje się czułością poszczególnych kanałów zbliżoną do krzywych opisujących składowe tróchromatyczne widmowe obserwatora normalnego w układzie kolorymetrycznym CIE XYZ 1931. W dalszej części eksperymentu zweryfikowano te właściwości przez pomiar porównawczy z kolorymetrem Minolta CL-200, choć już pewną nieścisłość można zauważyć analizując charakterystyki pokazane na rysunku 2.6. O ile krzywe czułości kanałów odpowiadających składowym X oraz Y niemal pokrywają się ze składowymi tróchromatycznymi widmowymi, to wartości toru Z są około dwukrotnie niższe niż odpowiadające im wartości składowej tróchromatycznej widmowej.



RYS. 2.6. Względna widmowa czułość kanałów układu MTCSiCS [27]

Względna widmowa czułość drugiego modelu czujnika oferowanego przez firmę MAZeT czyli układu MMCS6 przedstawiono na rysunku 2.7. Jak już wspomniano, cechą charakterystyczną tego układu jest zastosowanie sześciu różnych filtrów optycznych, którymi pokryto matrycę detektorów. Zdecydowano na zastosowanie filtrów, o maksimum czułości przy długościach fal: 425 nm, 475 nm, 525 nm, 575 nm, 625 nm oraz 675 nm. Analizując krzywe czułości widmowej można zauważyć, że maksymalna czułość oraz szerokość pasma jest różna w przypadku każdej z sekcji. Ich obecny kształt jest podyktowany kompromisem pomiędzy wysoką czułością, a zmniejszeniem pasma przepuszczania – według danych producenta dalsze zmniejszenia pasma

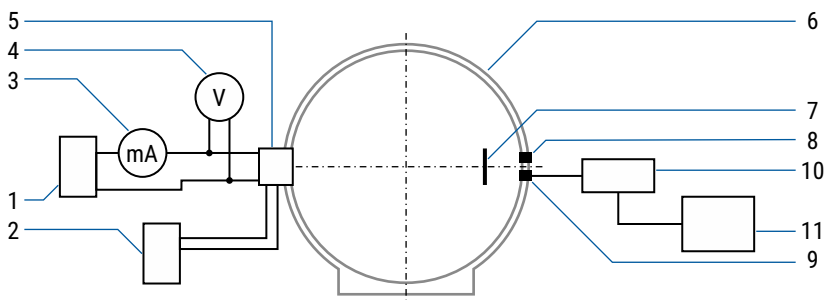
danego filtra silnie obniżało czułość danego kanału [28]. Kolejną zaletą zastosowanych filtrów jest niemal całkowite stłumienie sygnałów poza zakresem widzialnym, zarówno od strony nadfioletu, jak i podczerwieni.



RYS. 2.7. Względna widmowa czułość kanałów układu MMCS6 [28]

2.2. Liniowość charakterystyki sygnału wyjściowego oraz zakres pomiarowy

Analizę liniowości charakterystyk wyjściowych oraz zakresy pomiarowe wybranych sensorów koloru przeprowadzono na stanowisku badawczym, którego schematyczną budowę przedstawiono na rysunku 2.8. Zdjęcie gotowego systemu testowego pokazano na rysunku 2.9.



RYS. 2.8. Schemat stanowiska pomiarowego do wyznaczania charakterystyk sygnałów wyjściowych scalonych czujników barwy: 1 – zasilacz diody, 2 – zasilacz modułu chłodzącego, 3 – miliamperomierz, 4 – woltomierz, 5 – moduł chłodzący z zamontowaną diodą, 6 – kula całkująca, 7 – przesłona, 8 – głowica luxometru L-100, 9 – płytka drukowana z badanym czujnikiem koloru, 10 – układ elektroniczny, 11 – komputer PC



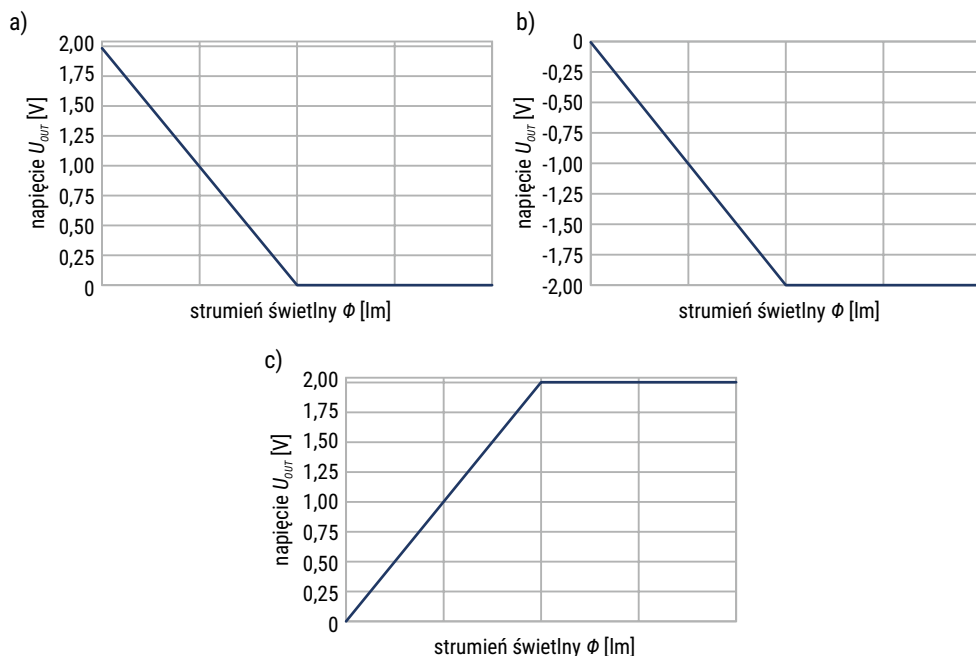
RYS. 2.9. Stanowisko pomiarowe do wyznaczania charakterystyk sygnałów wyjściowych scalonych czujników barwy

W czasie badania liniowości charakterystyk wyjściowych sensorów koloru jako źródeł światła użyto trzech diod elektroluminescencyjnych, których charakterystyki prądowo-napięciowe oraz prądowo-strumieniowe wyznaczono w czasie poprzedniego etapu badawczego:

- Cree XP-E XPEPHR – Photo Red ($x_R = 0,7206$; $y_R = 0,2789$),
- ProLight 3W Power LED PK2N-3LGE-SD – Green ($x_G = 0,2286$; $y_G = 0,7216$),
- Cree XP-C XPCBLU – Blue ($x_B = 0,1292$; $y_B = 0,0649$).

Pierwszym scalonym czujnikiem koloru, który zbadano pod względem liniowości charakterystyki wyjściowej był układ MTCSiCS. Do mikrokontrolera Atmega8 został on podłączony zgodnie ze schematem pokazanym na rysunku 2.3.

Układ MTI04 pracuje w torze pomiarowym jako przetwornik prąd – napięcie o regulowanym wzmocnieniu. Zgodnie z informacjami zawartymi w tabeli 2.1 wartość rezystorów sprzężenia zwrotnego R_z układu MTI04 zawiera się w pewnych granicach. W celu wyznaczenia rzeczywistych wartości rezystancji sprzężenia zwrotnego badania przeprowadzono przy różnych poziomach przetwarzania sygnału przez układ MTI04. Zgodnie ze wzorem (2.1) spodziewana charakterystyka wyjściowa powinna mieć przebieg zbliżony do przedstawionego na rysunku 2.10a. Jednak w celu ułatwienia analizy wyników, dane odbierane z przetwornika analogowo-cyfrowego mikrokontroler Atmega8 przetwarza do postaci pokazanej na rysunku 2.10c. Procedura ta odbywa się w dwóch krokach. Pierwszym jest odjęcie od wartości odczytanej z przetwornika MPC3424 wartości napięcia referencyjnego – w tym przypadku jest to napięcie o wartości 2,0 V – po tym etapie charakterystyka wyjściowa przyjmuje kształt przedstawiony na rysunku 2.10b. W kolejnym kroku zmieniany jest znak przetworzonych danych przez pomnożenie ich przez (-1) – rysunek 2.10c.



RYS. 2.10. Kolejne etapy procedury przekształcania charakterystyk wyjściowych układu MTCSiCS: a) rzeczywista charakterystyka wyjściowa układu MTI04, b) charakterystyka po odjęciu napięcia referencyjnego, c) charakterystyka po wymnożeniu przez (-1)

Przykłady przeliczonych w ten sposób charakterystyk wyjściowych pokazano na rysunkach 2.11–2.13. Jak można zauważyć, we wszystkich przypadkach, do momentu nasycenia detektora są one liniowe. W rozpatrywanym układzie, w przypadku nasycenia czujnika koloru, napięcie wyjściowe U_{OUT} przyjmuje maksymalną wartość 2,0 V, natomiast zakres przetwornika analogowo-cyfrowego MCP3424 jest wyższy i wynosi 2,048 V. Pozwala to na zastosowanie prostego algorytmu automatycznej zmiany czułości toru pomiarowego. W programie zaimplementowanym w układzie Atmega8 przewidziano automatyczne obniżenie poziomu wzmacnienia konwertera MTI04 przy przekroczeniu napięcia 1,950 V.

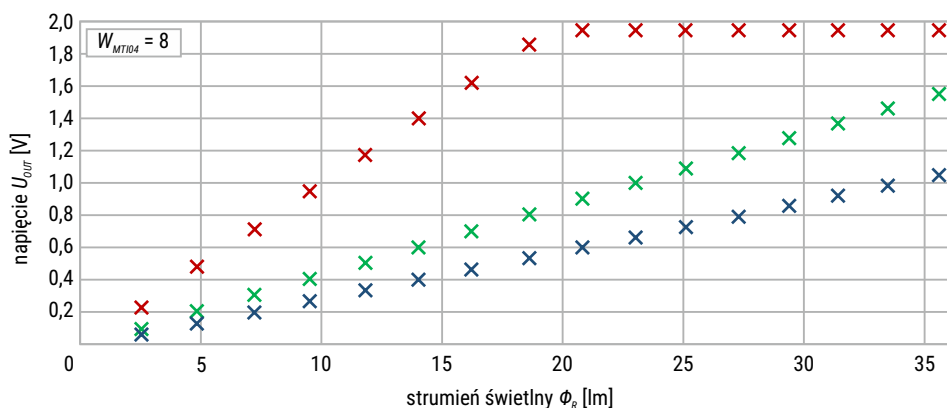
Jak już wspomniano, w czasie tego etapu badań sprawdzono również wartość rezystancji sprzężenia zwrotnego R'_z układu MTI04. W tym celu do wyjść czujnika MTCSiCS podłączono szeregowo multimetr cyfrowy SANWA P5000a pracujący jako mikroamperomierz. Kolejny multimetr P5000a (w trybie pomiaru napięcia) podłączono do wyjść układu MTI04. Na podstawie wskazań obu przyrządów określono wartość rezystancji sprzężenia zwrotnego R'_z .

Wyniki wykonanych badań zestawiono w tabeli 2.2, zaś obliczone wartości rezystancji sprzężenia zwrotnego są zbliżone do typowych wartości deklarowanych przez firmę MAZeT [29].

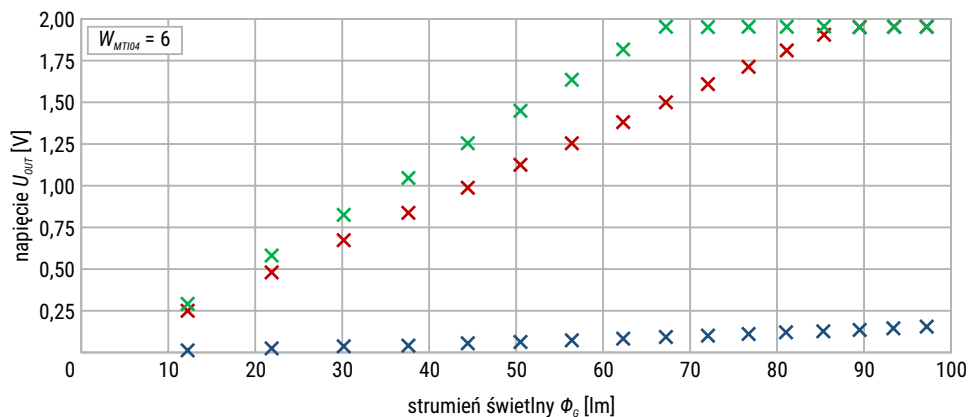
TABELA 2.2. Zadeklarowane przez producenta oraz wyznaczone eksperymentalnie wartości rezystancji sprzężenia zwrotnego konwertera MTI04

poziom przetwarzania W_{MTI04}	deklarowana wartość rezystancji sprzężenia zwrotnego R_z [k Ω]			wyznaczona wartość rezystancji sprzężenia zwrotnego R'_z [k Ω]
	min.	typ.	max.	
8	14 000	20 000	26 700	20 280 \pm 30,4
7	7 000	10 000	13 350	10 140 \pm 14,1
6	3 500	5 000	6 700	5070 \pm 8,4
5	1 400	2 000	2 670	2020 \pm 3,3
4	700	1 000	1 335	1010,3 \pm 1,2
3	350	500	670	505,0 \pm 0,4
2	70	100	133	101,4 \pm 0,2
1	17	25	34	25,6 \pm 0,3

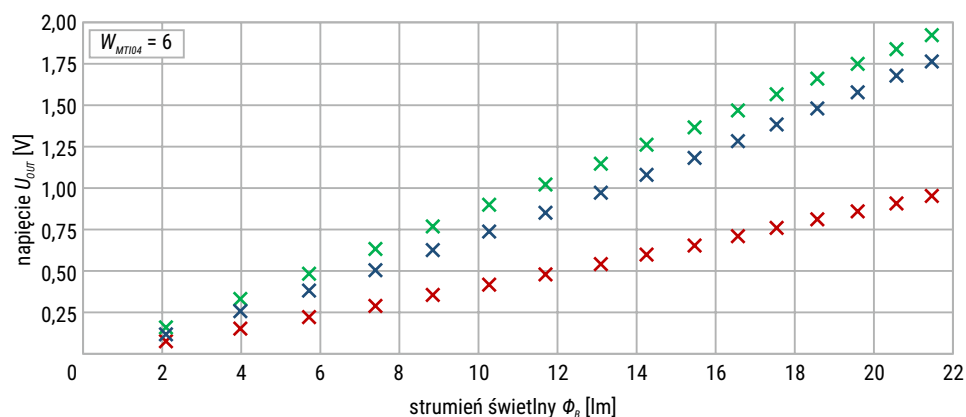
Ze względu na zastosowaną w mikrokontrolerze procedurę automatycznej zmiany stopnia konwersji układu MTI04, istotne jest również określenie proporcji wzmoceń pomiędzy kolejnymi stopniami przetwarzania. Analizę tę przeprowadzono na podstawie wskazań użytego przetwornika analogowo-cyfrowego. Polegała ona na porównaniu wskazań układu przy kolejnych stopniach przetwarzania W_{MTI04} przy oświetleniu czujnika strumieniem świetlnym o stałej wartości.



RYS. 2.11. Wartość napięcia U_{OUT} kanałów X (punkty czerwone), Y (punkty zielone), Z (punkty niebieskie) czujnika MTCSiCS przy oświetleniu diodą Cree XP-E XPEPHR – Photo Red



RYS. 2.12. Wartość napięcia U_{OUT} kanałów X (punkty czerwone), Y (punkty zielone), Z (punkty niebieskie) czujnika MTCSiCS przy oświetleniu diodą ProLight PK2N-3LGE-SD – Green



RYS. 2.13. Wartość napięcia U_{OUT} kanałów X (punkty czerwone), Y (punkty zielone), Z (punkty niebieskie) czujnika MTCSiCS przy oświetleniu diodą Cree XP-C XPCBLU – Blue

Drugim, z poddanych analizie czujników, był sześciokanałowy detektor MMCS6 firmy MAZeT [28]. Do mikrokontrolera Atmega8 został podłączony zgodnie ze schematem z rysunku 2.5. Jak już wyjaśniono, tor pomiarowy czujnika MMCS6 jest rozbudowaną wersją toru elektronicznego przetwarzającego sygnały z sensora MTCSiCS. Tym samym procedurę pomiaru liniowości układu MMCS6 przeprowadzono w analogiczny sposób jak sprawdzano czujnik MTCSiCS. Jednak biorąc pod uwagę większą liczbę kanałów czujnika w opracowaniu zamieszczono jedynie wykresy prezentujące zależności wyjściowe czujnika MMCS6 przy oświetleniu diodą Cree XP-C XPCBLU – Blue.

Przy oznaczaniu wartości napięcia zmierzonego na wyjściach poszczególnych kanałów toru pomiarowego zastosowano następujące oznaczenia:

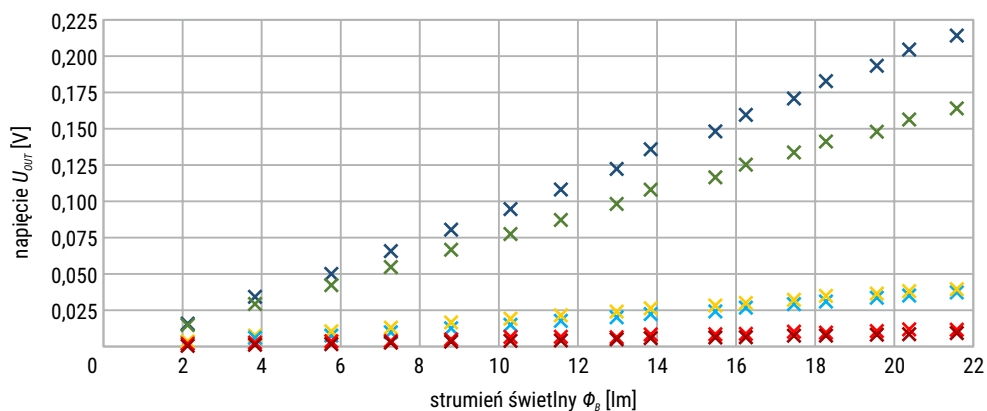
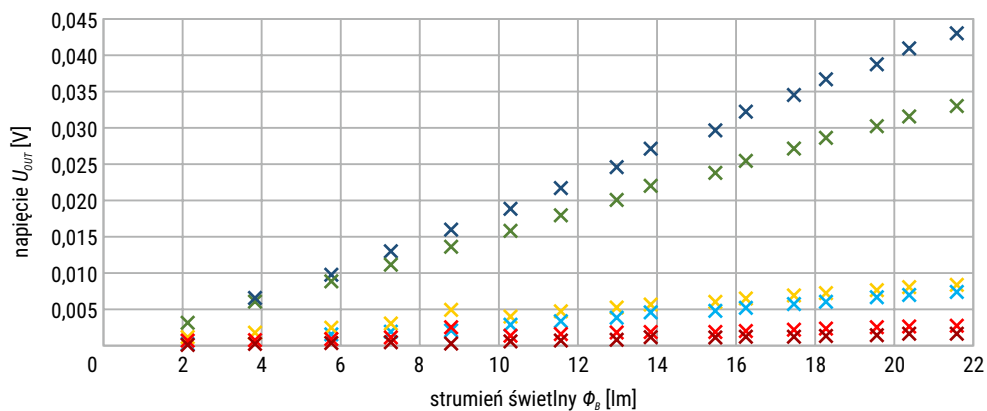
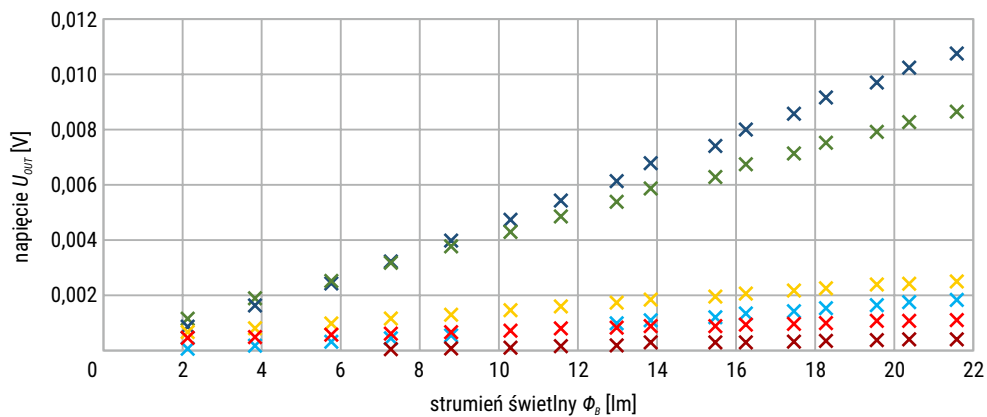
- $U_{OUT_{425}}$ – wartości napięcia kanału o maksymalnej czułości przy długości fali 425 nm,
- $U_{OUT_{475}}$ – wartości napięcia kanału o maksymalnej czułości przy długości fali 475 nm,
- $U_{OUT_{525}}$ – wartości napięcia kanału o maksymalnej czułości przy długości fali 525 nm,
- $U_{OUT_{575}}$ – wartości napięcia kanału o maksymalnej czułości przy długości fali 575 nm,
- $U_{OUT_{625}}$ – wartości napięcia kanału o maksymalnej czułości przy długości fali 625 nm,
- $U_{OUT_{675}}$ – wartości napięcia kanału o maksymalnej czułości przy długości fali 675 nm,
- U_{OUT_W} – wartości napięcia kanału bez filtrów optycznych,
- U_{OUT_PD} – wartości napięcia kanału „ciemnego”.

Otrzymane charakterystyki wyjściowe zaprezentowano na rysunkach 2.14–2.15. Podobnie, jak w przypadku czujnika MTCSiCS, układ MMCS6 cechuje się wysoką liniowością sygnału wyjściowego, czego należało się spodziewać biorąc pod uwagę tę samą technologię wykonania sensora oraz tor pomiarowy, bazujący na tych samych układach elektronicznych.

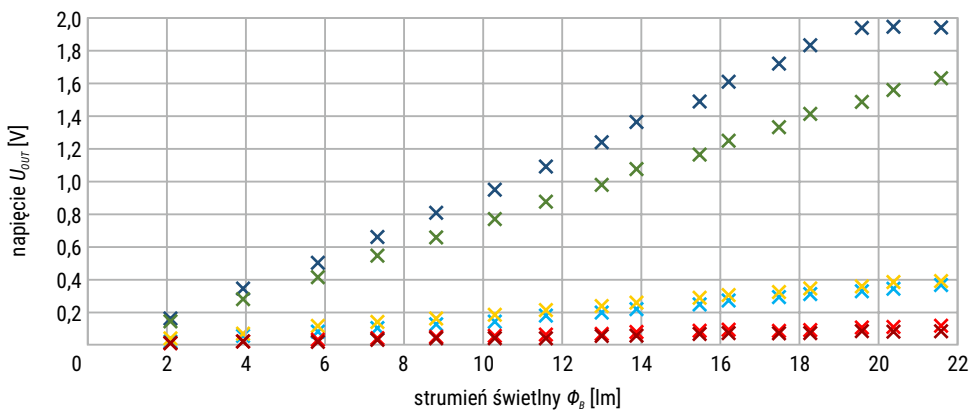
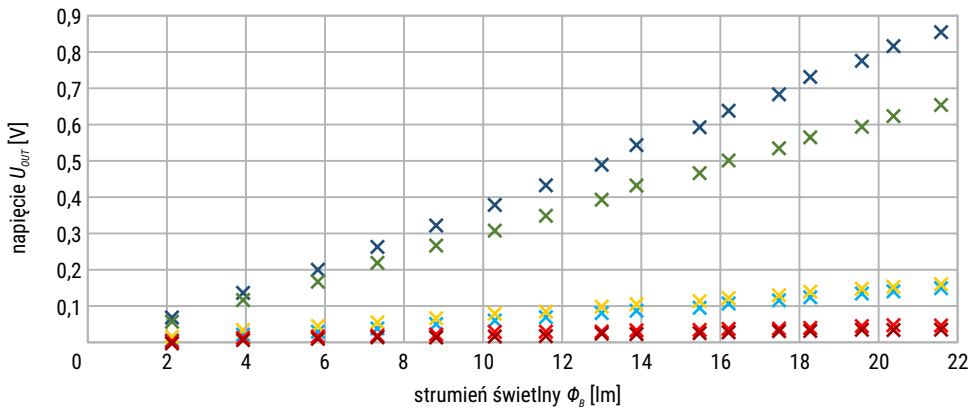
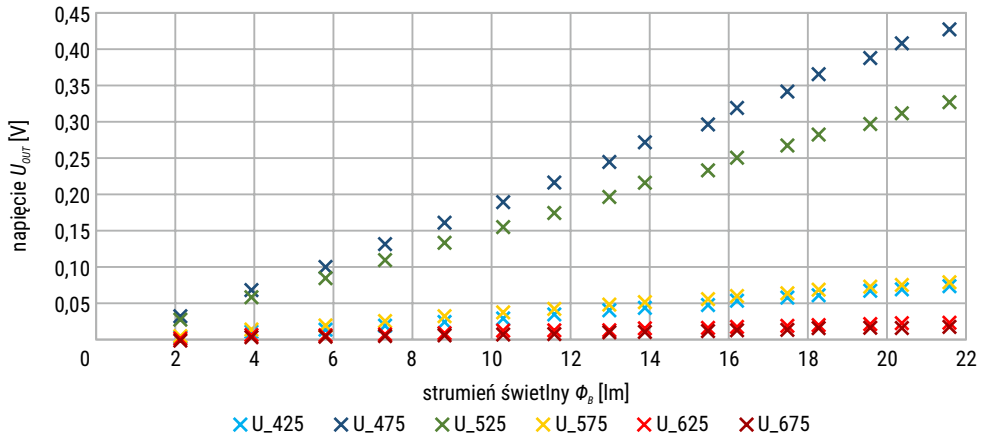
Analizując charakterystyki z rysunku 2.14 wyraźnie widoczne są wysokie wartości sygnałów z kanałów U-475 oraz U-525 – jest to prawidłowa reakcja detektora MMCS6 na promieniowanie diody Cree XP-C XPCBLU – Blue, której maksimum emisji strumienia świetlnego przypada na długość fali około 465 nm. Wyjaśnienia wymaga jednak fakt wyższych odczytów z kanału U-525 niż z kanału U-425 (choć w pierwszym przypadku różnica długości fali pomiędzy maksimum czułości kanału a maksimum emisji diody wynosi 60 nm a w drugim 40 nm). Jednak analizując względną widmową czułość poszczególnych kanałów (rysunek 2.7) wyraźnie widać, że kanał U-425 charakteryzuje się niższą czułością niż kanał U-525, więc również w tym przypadku reakcja czujnika MMCS6 jest prawidłowa.

Jak już wspomniano, czujnik MMCS6 wyposażony jest w dwie dodatkowe sekcje fotodiod – fotodioda centralna bez filtra optycznego oraz fotodioda „ciemna” całkowicie osłonięta przed dostępem promieniowania optycznego. W analizowanym układzie czujnika zbadano, czy można wykorzystać osłoniętą fotodiodę do pomiaru prądu ciemnego oraz szumów detektora.

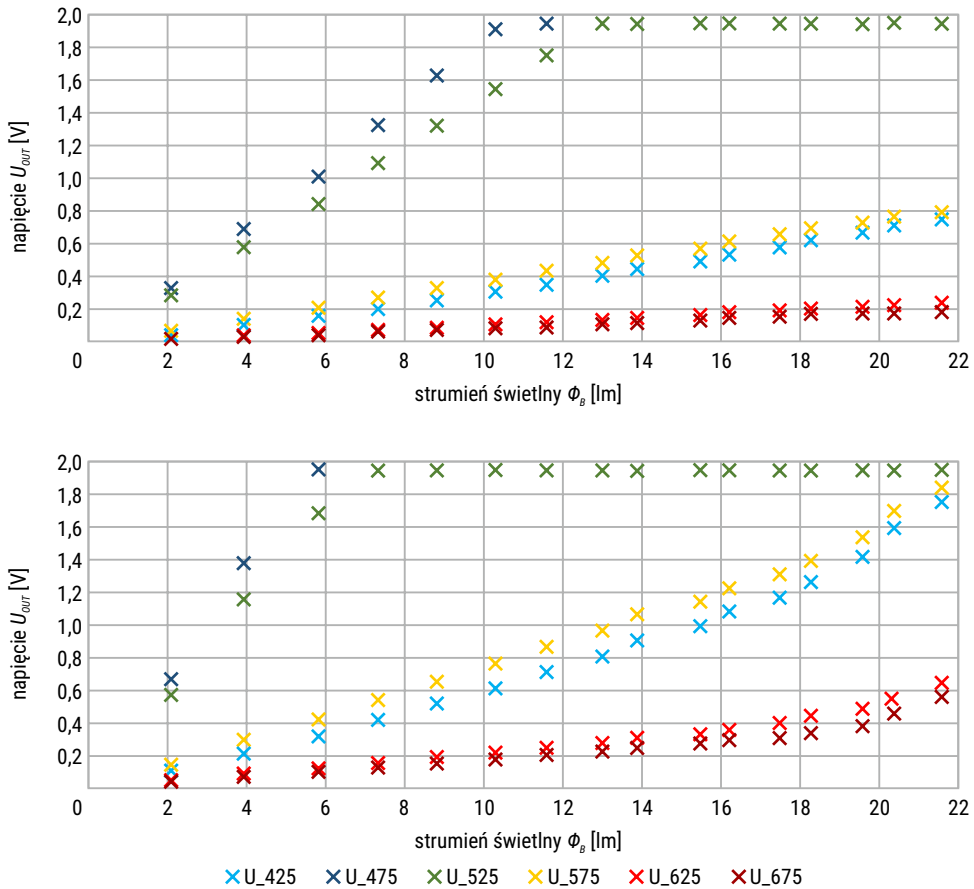
Pomiar ten podzielono na dwa etapy. W pierwszym zmierzono i porównano sygnały ciemne poszczególnych sekcji fotodiod czujnika. W drugim zbadano reakcję fotodiody „ciemnej” na oświetlenie czujnika MMCS6 promieniowaniem z zakresu widzialnego.



RYS. 2.14. Wartość napięcia U_{out} kanałów wyjściowych czujnika MMCS6 przy oświetleniu diodą Cree XP-C XPCBLU – Blue



RYS. 2.14. Wartość napięcia U_{OUT} kanałów wyjściowych czujnika MMCS6 przy oświetleniu diodą Cree XP-C XPCBLU – Blue (cd.)



RYS. 2.14. Wartość napięcia U_{OUT} kanałów wyjściowych czujnika MMCS6 przy oświetleniu diodą Cree XP-C XPCBLU – Blue (cd.)

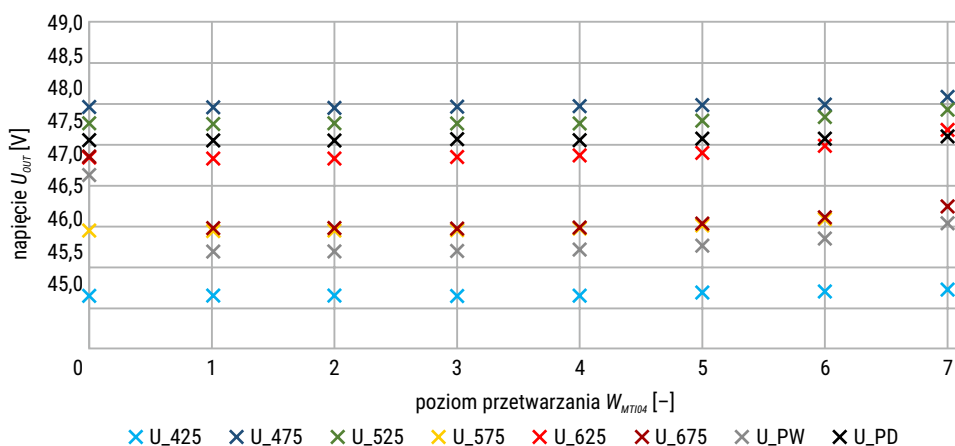
W pierwszym etapie badany detektor umieszczono w światłoszczelnej komorze i dokonano pomiaru napięcia na wyjściach układu MT104 przy różnych poziomach przetwarzania W_{MT104} . Wyniki zamieszczono w tabeli 2.3 oraz zaprezentowano na rysunku 2.15.

Ze względu na to, że pomiary napięcia były zautomatyzowane, powtórzono je 100 razy. Za wartość napięcia wyjściowego (odpowiadającego wartości prądu ciemnego fotodiod czujnika MMCS6) przyjęto średnią arytmetyczną z poszczególnych wyników. Niepewność pomiaru napięcia oszacowano metodami statystycznymi jako odchylenie standardowe średniej u_{MT104} [13], [14], [15]. W analizowanym przypadku niepewność standardowa pomiaru napięcia u_{MT104} wyniosła 3,5 mV. Biorąc pod uwagę wartość obliczonej niepewności pomiaru nie zaznaczono jej na wykresie z rysunku 2.15, aby nie zmniejszała czytelności zaprezentowanych danych.

TABELA 2.3. Wartości sygnału ciemnego poszczególnych sekcji czujnika MMCS6 przy różnych poziomach przetwarzania W_{MT104} układu MTI04

poziom przetwarzania W_{MT104}	napięcie na wyjściach konwertera MTI04 U_{OUT} [mV]							
	U_{OUT_425}	U_{OUT_475}	U_{OUT_525}	U_{OUT_575}	U_{OUT_625}	U_{OUT_675}	U_{OUT_PW}	U_{OUT_PD}
1	45,66	47,96	47,76	46,45	47,34	47,35	47,12	47,56
2	45,66	47,96	47,76	46,45	47,34	46,48	46,20	47,56
3	45,66	47,96	47,77	46,45	47,34	46,49	46,20	47,56
4	45,66	47,96	47,76	46,45	47,35	46,48	46,21	47,56
5	45,66	47,98	47,77	46,48	47,37	46,49	46,23	47,56
6	45,70	47,98	47,79	46,51	47,40	46,54	46,27	47,57
7	45,70	47,99	47,84	46,59	47,49	46,60	46,35	47,57
8	45,73	48,09	47,93	46,74	47,68	46,74	46,54	47,60

Analizując otrzymane wyniki można zaobserwować, że wartości napięć odpowiadających prądom ciemnym kolejnych sekcji fotodiód utrzymują się niemal na stałym poziomie niezależnie od poziomu przetwarzania W_{MT104} . Zauważalny jest niewielki wzrost sygnału przy zwiększaniu poziomu przetwarzania W_{MT104} . Wzrost napięcia wyjściowego, w przypadku skrajnych poziomów przetwarzania W_{MT104} , jest rzędu 5 mV i można przypuszczać, że jest spowodowany szumami własnymi przetwornika MTI04.



RYC. 2.15. Zależność sygnału ciemnego poszczególnych sekcji czujnika MMCS6 w zależności od poziomu przetwarzania W_{MT104} układu MTI04

Porównując średnią arytmetyczną ze wszystkich wykonanych pomiarów napięcia U_{MMCS6} (wynoszącą 46,99 mV) ze średnią z pomiarów z kanału fotodiody ciemnej ($U_{OUT_PD} = 47,57$ mV) można przyjąć, że w zadawalającym stopniu odzwierciedla ona wartość szumów pozostałych kanałów pomiarowych.

W czasie kolejnego etapu czujnik MMCS6 kolejno oświetlono diodami: Cree XP-E XPEPHR – Photo Red, ProLight PK2N-3LGE-SD – Green oraz Cree XP-C XPCBLU – Blue oraz wykonano serię pomiarów napięcia na wyjściach przetwornika MT104. Również w tym przypadku eksperyment powtórzono wielokrotnie – przy oświetleniu każdą diodą z osobna oraz przy różnych poziomach przetwarzania W_{MT104} . W każdej serii pomiarowej wykonano 100 pomiarów napięcia U_{OUT_PD} . Otrzymane uśrednione wyniki, uzyskane przy najwyższym poziomie przetwarzania W_{MT104} , zestawiono w tabeli 2.4 oraz zaprezentowano na rysunkach 2.16–2.18. Standardowa niepewność pomiaru napięcia u_{MT104} obliczona metodami statystycznymi, wyniosła w tym przypadku 2,9 mV.

TABELA 2.4. Napięcie U_{OUT_PD} na wyjściu układu MT104 przy oświetleniu czujnika diodami: Cree XP-E XPEPHR – Photo Red, ProLight PK2N-3LGE-SD – Green oraz Cree XP-C XPCBLU – Blue

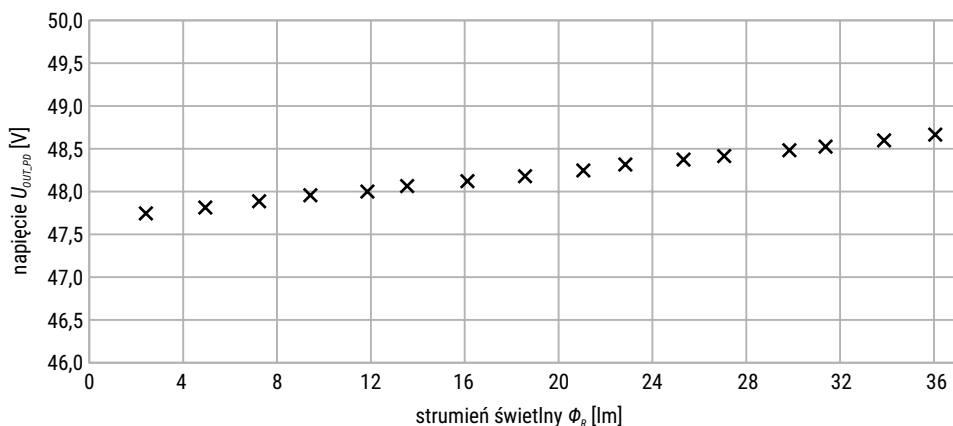
strumień świetlny Φ_R [lm]	napięcie wyjściowe U_{U_PD} [mV]	strumień świetlny Φ_G [lm]	napięcie wyjściowe U_{U_PD} [mV]	strumień świetlny Φ_B [lm]	napięcie wyjściowe U_{U_PD} [mV]
2,4	47,74	12,4	47,70	2,1	47,73
4,9	47,82	22,1	47,85	3,9	47,90
7,2	47,88	30,6	47,96	5,8	48,06
9,4	47,95	38,7	48,09	7,3	48,20
11,8	47,99	44,1	48,18	8,8	48,32
13,5	48,06	49,8	48,26	10,3	48,45
16,1	48,12	56,3	48,35	11,6	48,57
18,5	48,18	62,7	48,43	13,0	48,70
21,0	48,24	68,1	48,51	13,9	48,82
22,8	48,31	71,8	48,59	15,5	48,91
25,3	48,37	77,7	48,65	16,2	49,01
27,0	48,41	79,4	48,73	17,5	49,12
29,8	48,48	86,0	48,81	18,3	49,21
31,3	48,52	88,4	48,85	19,6	49,31
33,8	48,59	94,3	48,93	20,4	49,38
36,0	48,66	100	48,99	21,6	49,48

Zdecydowano na prezentację wyników otrzymanych przy najwyższym poziomie przetwarzania W_{MT104} , ponieważ przy niższych poziomach przetwarzania W_{MT104} sygnał U_{OUT_PD} utrzymywał niemal stałą wartość z przedziału od 47,71 mV do 48,14 mV. Niemniej jednak widoczna była niewielka tendencja wzrostowa napięcia U_{U_PD} przy zwiększaniu strumienia świetlnego poszczególnych LED-ów oświetlających czujnik MMCS6.

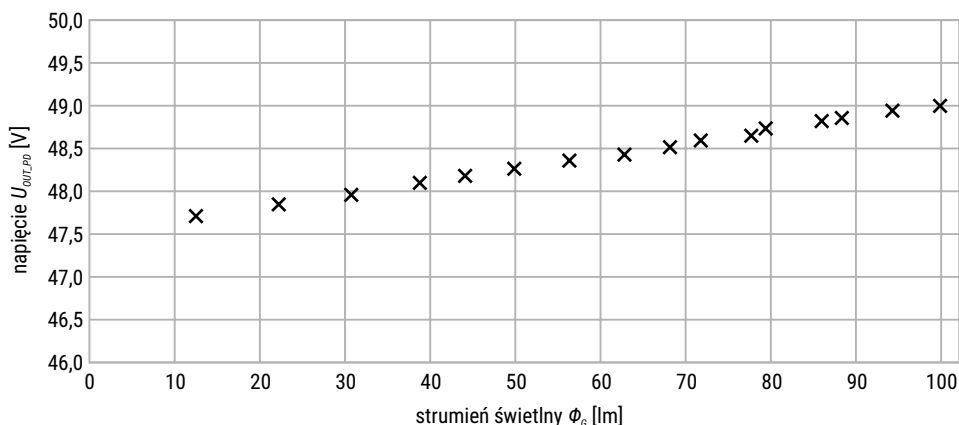
Wzrost wartości sygnału ciemnego widoczny jest przy najwyższym stopniu przetwarzania W_{MT104} , co zaprezentowano na rysunkach 2.16–2.18. Jednak w ogólnym przypadku można go zaniedbać, biorąc pod uwagę, że jest to wzrost rzędu 3 mV na tle sygnału o średniej wartości około 48 mV.

Na tej podstawie można również stwierdzić, że fotodioda „ciemna” nie jest całkowicie osłonięta przed dostępem promieniowania optycznego, bądź też prądy upływu pozostałych sekcji światłoczułych wpływają na wartość jej prądu wyjściowego.

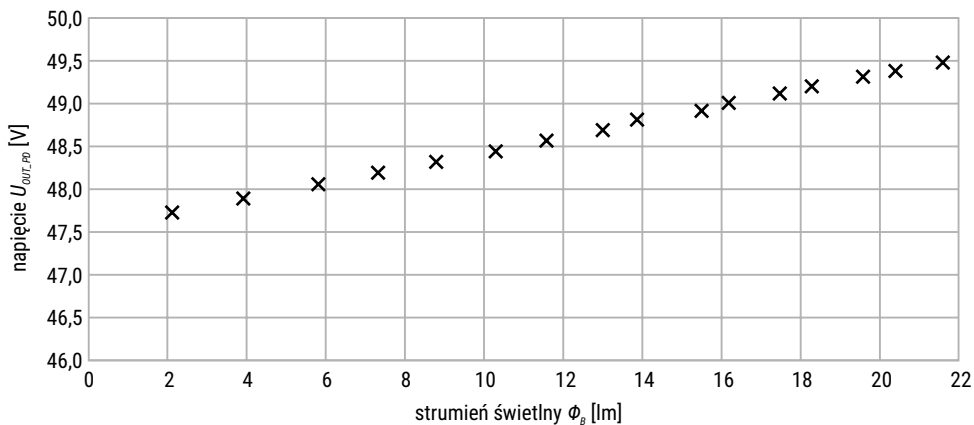
Porównując otrzymane wyniki sygnału ciemnego oraz spodziewane wartości sygnałów użytecznych (kilkunastokrotnie wyższe od sygnału ciemnego) można stwierdzić, że wyznaczanie prądu ciemnego wszystkich sekcji czujnika MMCS6 jest możliwe przez pomiar prądu ciemnego przesłoniętej fotodiody.



RYS. 2.16. Zmiana napięcia $U_{U,PD}$ przy oświetleniu czujnika MMCS6 diodą Cree XP-E XPEPHR – Photo Red przy poziomie przetwarzania $W_{MT104} = 8$



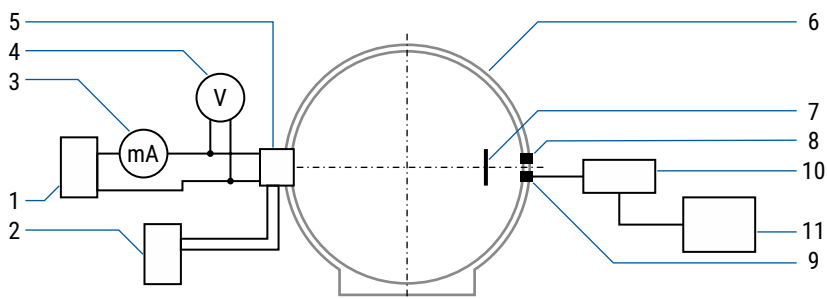
RYS. 2.17. Zmiana napięcia $U_{U,PD}$ przy oświetleniu czujnika MMCS6 diodą ProLight PK2N-3LGE-SD – Green przy poziomie przetwarzania $W_{MT104} = 8$



RYS. 2.18. Zmiana napięcia U_{OUT_PD} przy oświetleniu czujnika MMCS6 diodą Cree XP-C XPCBLU – Blue przy poziomie przetwarzania $W_{MT104} = 8$

2.3. Analiza parametrów kolorymetrycznych oraz kalibracja scalonych czujników barwy

Analizę parametrów kolorymetrycznych sensorów przeprowadzono na stanowisku badawczym, którego schematyczną budowę przedstawiono na rysunku 2.19. Zdjęcie gotowego systemu testowego pokazano na rysunku 2.20.



RYS. 2.19. Schemat stanowiska pomiarowego do testowania scalonych czujników barwy: 1 – zasilacz diody, 2 – zasilacz modułu chłodzącego, 3 – miliamperomierz, 4 – woltomierz, 5 – moduł chłodzący z zamontowaną diodą, 6 – kula całkująca, 7 – przesłona, 8 – głowica kolorimetru CL-200, 9 – płytkę drukowaną z badanym czujnikiem koloru, 10 – układ elektroniczny, 11 – komputer PC

Podstawę stanowiska pomiarowego stanowi kula całkująca, którą wykorzystano już wcześniej przy wyznaczaniu charakterystyk widmowych oraz strumienia świetlnego diod elektroluminescencyjnych.



RYS. 2.20. Stanowisko pomiarowe do testowania scalonych czujników barwy

Kolejnymi elementami stanowiska pomiarowego są, zastosowane również w poprzednim etapie badawczym, LED-y emitujące światło barwne o następujących współrzędnych trójchromatycznych:

- Cree XP-E XPEPHR – Photo Red ($x_R = 0,7206$; $y_R = 0,2789$),
- ProLight 3W Power LED PK2N-3LGE-SD – Green ($x_G = 0,2286$; $y_G = 0,7216$),
- Cree XP-C XPCBLU – Blue ($x_B = 0,1292$; $y_B = 0,0649$),
- Cree XP-G XPGBWT – Cool White ($x_W = 0,3293$; $y_W = 0,3557$).

Procedura wyznaczania parametrów kolorymetrycznych wybranych czujników barwy polegała na porównaniu ich wskazań z wynikami pomiarów kolorymetrem firmy Minolta CL-200. Analizowane czujniki koloru oraz głowicę kolorymetru CL-200 umieszczono w otworach pomiarowych kuli całkującej oraz przesłonięto przed bezpośrednim promieniowaniem pochodzącym z oświetlającego źródła – rysunek 2.19.

Pierwszym poddanym analizie scalonym czujnikiem barwy był układ MTCSiCS. W czasie badania kolejno oświetlano go wymienionymi diodami świecącymi zasilonymi prądem stałym o wartości 150 mA. Otrzymane wyniki napięcia wyjściowego u_x , u_y , u_z (po odjęciu napięcia odpowiadającego prądom ciemnym detektora) oraz wartości przyjęte za rzeczywiste składowe trójchromatyczne (odczytane z kolorymetru CL-200) zestawiono w tabeli 2.5. Pomiar napięcia ciemnego przeprowadzono przed właściwym pomiarem, przy wyłączonych diodach oraz przy całkowitym zasłonięciu czujnika MTCSiCS.

Podobnie jak w poprzednim etapie badawczym, dotyczącym liniowości charakterystyk wyjściowych, w tym również pomiary powtórzono kilkakrotnie. Jednak biorąc pod uwagę brak możliwości podłączenia kolorymetru CL-200 do komputera PC, a tym samym stworzenia automatycznego systemu pomiarowego, ograniczono się do dziesięciu pomiarów w każdej serii pomiarowej. Dane dotyczące napięć wyjściowych u_x , u_y , u_z układu MTCSiCS zawarte w tabeli 2.5, jak również wartości składowych chromatycznych (odczytanych z kolorymetru CL-200) są średnimi arytmetycznymi mierzonych wielkości. Na podstawie otrzymanych

wyników standardowa niepewność pomiaru napięć wyjściowych u_x , u_y , u_z wyniosła 2,5 mV. Natomiast niepewność pomiaru składowych trójchromatycznych oszacowano na poziomie $\pm 3,5$.

TABELA 2.5. Wyniki pomiarów parametrów kolorymetrycznych przy użyciu czujnika MTCSiCS oraz kolorymetru CL – 200

Cree XP-E XPEPHR – Photo Red ($x_R = 0,7206$; $y_R = 0,2789$)	MTCSiCS					CL-200				
	napięcie wyjściowe [V]		przyjęte składowe chromatyczne		współrzędne chromatyczne		składowe chromatyczne		współrzędne chromatyczne	
	u_x	0,33186	X	33,2	x	0,5110	X	788,7	x	0,7247
	u_y	0,17676	Y	17,7	y	0,2722	Y	299,6	y	0,2753
u_z	0,14085	Z	14,1	z	0,2169	Z	0,06	z	0,0000	
ProLight 3W Power LED PK2N-3LGE-SD – Green ($x_G = 0,2286$; $y_G = 0,7216$)	MTCSiCS					CL-200				
	napięcie wyjściowe [V]		przyjęte składowe chromatyczne		współrzędne chromatyczne		składowe chromatyczne		współrzędne chromatyczne	
	u_x	1,04031	X	104,0	x	0,4302	X	412,6	x	0,2240
	u_y	1,26544	Y	126,5	y	0,5233	Y	1222,6	y	0,7229
u_z	0,11266	Z	11,3	z	0,0466	Z	56	z	0,0531	
Cree XP-C XPCBLU – Blue ($x_B = 0,1292$; $y_B = 0,0649$)	MTCSiCS					CL-200				
	napięcie wyjściowe [V]		przyjęte składowe chromatyczne		współrzędne chromatyczne		składowe chromatyczne		współrzędne chromatyczne	
	u_x	0,42745	X	42,8	x	0,2219	X	464,2	x	0,1310
	u_y	0,84428	Y	84,4	y	0,4383	Y	213,1	y	0,0647
u_z	0,65435	Z	65,4	z	0,3397	Z	2615,9	z	0,8043	
Cree XP-G XPGBWT – Cool White ($x_W = 0,3293$; $y_W = 0,3557$)	MTCSiCS					CL-200				
	napięcie wyjściowe [V]		przyjęte składowe chromatyczne		współrzędne chromatyczne		składowe chromatyczne		współrzędne chromatyczne	
	u_x	1,61758	X	161,8	x	0,4633	X	1562	x	0,3286
	u_y	1,44237	Y	144,2	y	0,4131	Y	1679	y	0,3550
u_z	0,43132	Z	43,1	z	0,1235	Z	1118	z	0,3164	

Analizując otrzymane wyniki można zauważyć znaczne rozbieżności pomiędzy wartościami składowych oraz współrzędnych chromatycznych, obliczonych na podstawie danych z czujnika MTCSiCS, a wartościami przyjętymi za rzeczywiste.

Nie mniej jednak zachowana jest tendencja – oświetlenie czujnika światłem z zakresu czerwieni powoduje wzrost napięcia u_x , oświetlenie strumieniem świetlnym o barwie zielonej skutkuje znacznym zwiększeniem napięcia u_y , natomiast napięcie u_b osiągnęło najwyższą wartość przy oświetleniu promieniowaniem o barwie niebieskiej. Potwierdza to wcześniejsze przypuszczenia, że względne charakterystyki czułości układu MTCSiCS nie pokrywają się w pełni z przebiegiem składowych trójchromatycznych widmowych obserwatora normalnego CIE, [7], [18]. Tym samym uzyskane z czujnika MTCSiCS dane o parametrach kolorymetrycznych, przed dalszym wykorzystaniem, muszą zostać przetransformowane do jednego ze standardowych układów kolorymetrycznych zdefiniowanych przez CIE. Procedurę transformacji wyjaśniono w dalszej części monografii.

W przypadku kolejnego rozpatrywanego czujnika barwy już na wstępie można stwierdzić, że uzyskane dane wymagają transformacji do jednego z układów kolorymetrycznych CIE. Wynika to przede wszystkim z faktu, że detektor ten podaje informację o parametrach barwowych promieniowania oświetlającego czujnik w postaci sześciu sygnałów. Zgodnie z przyjętą zasadą, również w tym przypadku w każdej serii pomiarowej przeprowadzono po 10 pomiarów. Uśrednione wyniki zestawiono w tabeli 2.6. Od otrzymanych wyników napięcia wyjściowego usunięto składową wynikającą z prądu ciemnego detektora – zgodnie z opisaną wcześniej procedurą. W celu zwiększenia wskazań detektorów, diody oświetlające czujnik MMCS5 oraz kolorymetr CL-200 zasilono prądem stałym o wartości 200 mA.

Pierwszym wnioskiem, jaki nasuwa się po analizie wyników pomiarów napięcia przedstawionych w tabeli 2.6 jest fakt, że czujnik MMCS6 reaguje na oświetlenie w sposób zbliżony do zadeklarowanego przez producenta [28]. To znaczy, oświetlenie promieniowaniem z zakresu czerwieni (o maksimum emisji strumienia świetlnego przy długości fali 720 nm) znacząco zwiększa napięcia wyjściowe u_{625} i u_{675} . Promieniowanie z zakresu od 510 nm do 550 nm (odpowiadające emisji strumienia świetlnego diody ProLight PK2N-3LGE-Green) powoduje wzrost wartości napięć u_{525} oraz u_{575} . Natomiast oświetlenie detektora MMCS6 diodą Cree XP-C XPCBLU – Blue (maksimum emisji przy 465 nm) powoduje wyraźną zmianę napięcia wyjściowego u_{475} . Jednak w celu wykorzystania czujnika MMCS6 w pomiarach temperatury barwowej najbliższej źródeł światła niezbędne jest przeprowadzenie procesu kalibracji co zostanie wyjaśnione w dalszej części pracy.

Na podstawie otrzymanych dotychczas wyników pomiarów stwierdzono, że każdy z opisanych scalonych sensorów przekazuje informację o barwie światła we własnym układzie kolorymetrycznym. W celu przetworzenia tych danych na postać składowych i współrzędnych kolorymetrycznych w układzie CIE XYZ 1931 należy przeprowadzić procedurę kalibracji, w czasie której wyznaczone zostaną tak zwane macierze transformacyjne [16].

Macierze tego typu stosowane są do przeliczania parametrów kolorymetrycznych pomiędzy dowolnymi układami kolorymetrycznymi [16], [17], [18].

TABELA 2.6. Wyniki pomiarów parametrów kolorymetrycznych przy użyciu czujnika MMCS6 oraz kolorymetru CL – 200

Cree XP-E XPEPHR – Photo Red ($x_r = 0,7206; y_r = 0,2789$)	MMCS6		CL-200	
	napięcie wyjściowe u [V]		składowe i współrzędne trójchromatyczne	
	u_{425}	0,03979	X	263,1
	u_{475}	0,04487	Y	100,0
	u_{525}	0,06637	Z	0,3
	u_{575}	0,05158	x	0,7240
	u_{625}	0,48119	y	0,2752
	u_{675}	1,74447	z	0,0007
ProLight 3W Power LED PK2N-3LGE-SD – Green ($x_g = 0,2286; y_g = 0,7216$)	MMCS6		CL-200	
	napięcie wyjściowe u [V]		składowe i współrzędne trójchromatyczne	
	u_{425}	0,09125	X	32,9
	u_{475}	0,21332	Y	100,0
	u_{525}	1,62727	Z	5,3
	u_{575}	1,86441	x	0,2382
	u_{625}	0,66790	y	0,7236
	u_{675}	0,16370	z	0,0382
Cree XP-C XPCBLU – Blue ($x_b = 0,1292; y_b = 0,0649$)	MMCS6		CL-200	
	napięcie wyjściowe u [V]		składowe i współrzędne trójchromatyczne	
	u_{425}	0,15701	X	215,3
	u_{475}	0,98070	Y	100,0
	u_{525}	0,76906	Z	1254,9
	u_{575}	0,17597	x	0,1371
	u_{625}	0,04871	y	0,0637
	u_{675}	0,03977	z	0,7992

Zależność pomiędzy składowymi kolorymetrycznymi układów kolorymetrycznych będących w zależności liniowej można zapisać:

$$\begin{aligned}
 X &= m_{11} \cdot R + m_{12} \cdot G + m_{13} \cdot B \\
 Y &= m_{21} \cdot R + m_{22} \cdot G + m_{23} \cdot B \\
 Z &= m_{31} \cdot R + m_{32} \cdot G + m_{33} \cdot B
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

gdzie:

X, Y, Z – składowe trójchromatyczne docelowego układu kolorymetrycznego,
 R, G, B – składowe trójchromatyczne pierwotnego układu kolorymetrycznego,
 m – współczynniki transformacji.

W postaci macierzowej równanie to może być zapisane jako:

$$\mathbf{C} = \mathbf{M} \times \mathbf{S} \quad (2.3)$$

gdzie:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S} = \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Macierz \mathbf{M} jest nazywana macierzą transformacji, a \mathbf{S} oraz \mathbf{C} są wektorami, zawierającymi informacje o składowych chromatycznych barwy w rozpatrywanych układach kolorymetrycznych.

W praktyce, do wyznaczenia elementów macierzy \mathbf{M} , niezbędna jest znajomość składowych chromatycznych trzech różnych punktów w obu rozpatrywanych układach kolorymetrycznych. Wynika to z faktu, że równanie (2.4) ma 9 niewiadomych jakimi są elementy macierzy \mathbf{M} . W tej sytuacji utworzony zostanie układ równań w postaci:

$$\mathbf{T} = \mathbf{M} \times \mathbf{L} \quad (2.5)$$

gdzie:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{L} = \begin{bmatrix} R_1 & R_2 & R_3 \\ G_1 & G_2 & G_3 \\ B_1 & B_2 & B_3 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T} = \begin{bmatrix} X_1 & X_2 & X_3 \\ Y_1 & Y_2 & Y_3 \\ Z_1 & Z_2 & Z_3 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Macierz \mathbf{L} zawiera elementy określające składowe trójchromatyczne promienienia w lokalnym układzie kolorymetrycznym analizowanego scalonego czujnika koloru. Natomiast elementy macierzy \mathbf{T} reprezentują składowe chromatyczne źródła przyjęte za rzeczywiste odczytane z kolorymetru CL-200.

Równanie (2.5) można rozwinąć do postaci:

$$\begin{bmatrix} X_1 & X_2 & X_3 \\ Y_1 & Y_2 & Y_3 \\ Z_1 & Z_2 & Z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R_1 & R_2 & R_3 \\ G_1 & G_2 & G_3 \\ B_1 & B_2 & B_3 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Macierz transformacji \mathbf{M} można wyznaczyć z zależności:

$$\mathbf{M} = \mathbf{T} \times \mathbf{L}^{-1} \quad (2.8)$$

gdzie:

\mathbf{L}^{-1} – macierz odwrotna do macierzy \mathbf{L} .

Elementy macierzy \mathbf{M} mogą być wyznaczone wtedy, gdy znane są wszystkie wartości macierzy \mathbf{L} oraz \mathbf{T} .

Korzystając z opisanej procedury można stworzyć macierz M pozwalającą przetransformować dane odczytane z czujnika MTCSiCS do dowolnego liniowego układu kolorymetrycznego zdefiniowanego przez CIE.

W przypadku czujnika MTCSiCS przeprowadzono procedurę kalibracji, korzystając z wyników pomiarów porównawczych zestawionych w tabeli 2.6. Jej efektem jest macierz transformacyjna M , która pozwala na przeliczenie danych z czujnika MTCSiCS do składowych oraz współrzędnych chromatycznych w układzie kolorymetrycznym CIE XYZ.

Wstawiając wartości zmierzonych napięć wyjściowych czujnika do macierzy L otrzymano:

$$L = \begin{bmatrix} 0,28166 & 0,99011 & 0,37725 \\ 0,12706 & 1,21574 & 0,79458 \\ 0,09185 & 0,06366 & 0,60535 \end{bmatrix}$$

W kolejnym kroku wyznaczono macierz L^{-1} , odwrotną do macierzy L , która w rozpatrywanym przykładzie, przyjęła postać:

$$L^{-1} = \begin{bmatrix} 4,5670 & -3,8339 & 2,186205 \\ -0,0262 & 0,9053 & -1,17189 \\ -0,6902 & 0,4865 & 1,443442 \end{bmatrix}$$

W macierzy T zawarto rzeczywiste wartości składowych trójchromatycznych w układzie CIE XYZ analizowanego promieniowania źródeł LED:

$$T = \begin{bmatrix} 788,7 & 412,6 & 464,2 \\ 299,6 & 1222,6 & 213,1 \\ 0,06 & 56 & 2615,9 \end{bmatrix}$$

Następnie wykonując mnożenie macierzy T oraz L^{-1} zgodnie z zależnością (2.8) obliczono macierz transformacyjną M :

$$M = \begin{bmatrix} 3270,89 & -2424,52 & 1910,83 \\ 1189,15 & 61,81 & -470,17 \\ -1806,75 & 1323,23 & 3710,40 \end{bmatrix}$$

Wykorzystanie wyznaczonej macierzy M do obliczenia rzeczywistych wartości składowych oraz współrzędnych trójchromatycznych promieniowania zaprezentowano na następującym przykładzie.

Stworzono mieszaninę strumieni świetlnych emitowanych przez źródła LED: Cree XP-E XPEPHR – Photo Red, ProLight 3W Power LED PK2N-3LGE-SD – Green oraz Cree XP-C XPCBLU – Blue. Wszystkie diody zasilono prądem o stałej wartości 150 mA oraz umieszczono w otworze kuli całkowącej. Na podstawie pomiaru czujnikiem MMTCSiCS otrzymano następujące wyniki:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0,87087 \\ 1,12095 \\ 0,41721 \end{bmatrix}$$

Elementy wektora \mathbf{S} reprezentują wartości napięć na wyjściu toru elektronicznego czujnika MTCSiCS.

Zastępując układ MTCSiCS głowicą pomiarową kolorymetru CL-200 oraz powtarzając pomiar otrzymano rzeczywiste wartości składowych trójchromatycznych analizowanej mieszaniny strumieni świetlnych trzech źródeł LED:

$$\mathbf{C}_{CL-200} = \begin{bmatrix} 819,4 \\ 875,7 \\ 1300 \end{bmatrix}$$

Na ich podstawie obliczono współrzędne trójchromatyczne powstałej mieszaniny:

$$x_{RGB} = 0,2735$$

$$y_{RGB} = 0,2923$$

$$z_{RGB} = 0,4342$$

Następnie wykorzystując macierz transformacyjną \mathbf{M} przeprowadzono zamianę danych z czujnika MTCSiCS na postać składowych trójchromatycznych zgodnie z zależnością (2.3):

$$\mathbf{C} = \mathbf{M} \times \mathbf{S} = \begin{bmatrix} 3270,89 & -2424,52 & 1910,83 \\ 1189,15 & 61,81 & -470,17 \\ -1806,75 & 1323,23 & 3710,40 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,87087 \\ 1,12095 \\ 0,41721 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 928,0 \\ 908,7 \\ 1457,8 \end{bmatrix}$$

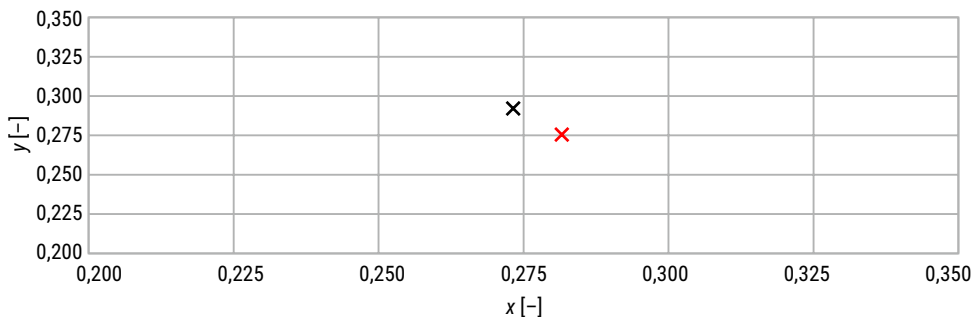
Współrzędne trójchromatyczne wyznaczone na podstawie otrzymanych wyników przyjęły wartości:

$$x'_{RGB} = 0,2817$$

$$y'_{RGB} = 0,2758$$

$$z'_{RGB} = 0,4425$$

Na rysunku 2.21 zaznaczono położenie punktów chromatyczności analizowanej mieszaniny strumieni świetlnych. Współrzędne punktu czarnego obliczono na podstawie wskazań kolorymetru CL-200. Do obliczenia współrzędnych punktu czerwonego użyto składowych trójchromatycznych wyznaczonych z pomiaru czujnikiem MTCSiCS.



RYS. 2.21. Współrzędne trójchromatyczne analizowanej mieszanki strumieni świetlnych obliczone na podstawie wskazań kolorymetru CL-200 (punkt czarny) oraz przetransformowanych wskazań czujnika MTCSiCS (punkt czerwony)

Na podstawie rysunku 2.21 widać, że obliczone punkty chromatyczności nie pokrywają się idealnie.

Na podstawie obliczonej różnicy barwy ΔE_{LAB} (w układzie kolorymetrycznym CIELAB) punktów chromatyczności o współrzędnych wyznaczonych na podstawie wskazań kolorymetru oraz danych odczytanych z czujnika MTCSiCS widać, że różnica barwy ΔE_{LAB} równa 2,96 jest dostrzegalna również przez niedoświadczonego obserwatora [19]. Z jednej strony potwierdza to możliwość konwersji parametrów kolorymetrycznych z lokalnego układu kolorymetrycznego czujnika MTCSiCS do układu CIE XYZ 1931. Jednak z drugiej strony wskazuje, że konieczna jest poprawa dokładności wskazań czujnika.

W kolejnych etapach badań dotyczących algorytmu sterującego oprawą LED, obliczone współrzędne trójchromatyczne zostaną wykorzystane do obliczenia temperatury barwowej najbliższej światła. Uzasadnione wydaje się więc zmniejszenie rozbieżności pomiędzy rzeczywistymi a obliczonymi parametrami kolorymetrycznymi. Wynika to między innymi z możliwości wystąpienia błędów zaokrągleń, mogących niekorzystnie wpłynąć na dokładność określenia temperatury barwowej najbliższej analizowanego przez czujnik promieniowania. Ponadto w pomiarach w warunkach rzeczywistych mogą wystąpić zakłócenia mierzonych wielkości, zarówno w torze elektronicznym jak również zakłócenia optyczne.

W celu ograniczenia negatywnego wpływu wymienionych czynników na dokładność pomiaru parametrów kolorymetrycznych czujnikiem MTCSiCS zaproponowano rozszerzoną procedurę wyznaczania macierzy transformacyjnej. W wersji tej, zamiast trzech źródeł światła o znanych współrzędnych trójchromatycznych, wykorzystano sześć. Dodatkowe trzy źródła światła były mieszaninami strumieni świetlnych:

- Cree XP-E XPE**PHR** – Photo Red oraz ProLight LED PK2N-3LGE-SD – Green,
- ProLight 3W PK2N-3LGE-SD – Green oraz Cree XP-C XPC**BLU** – Blue,
- Cree XP-C XPC**BLU** – Blue oraz Cree XP-E XPE**PHR** – Photo Red.

W tym przypadku procedura wyznaczania macierzy transformacyjnej jest bardziej skomplikowana i czasochłonna.

Podstawowy rachunek opisany zależnościami (2.3) oraz (2.5) również w tej wersji pozostaje bez zmian. Zmienia się natomiast sposób obliczenia macierzy transformacyjnej oznaczonej w tym przypadku jako \mathbf{K} . Przy zastosowaniu sześciu punktów kalibracyjnych macierze \mathbf{L} oraz \mathbf{T} przyjmą postaci:

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} R_1 & R_2 & R_6 \\ G_1 & G_2 & \dots & G_6 \\ B_1 & B_2 & & B_6 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T} = \begin{bmatrix} X_1 & X_2 & X_6 \\ Y_1 & Y_2 & \dots & Y_6 \\ Z_1 & Z_2 & & Z_6 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

W analizowanym przypadku niemożliwe jest wykonanie operacji (2.8), ponieważ macierz \mathbf{L} o wymiarach 3×6 nie jest odwracalna. Macierz \mathbf{K} może zostać wyznaczona na podstawie zależności:

$$\mathbf{K} = (\mathbf{T} \times \mathbf{L}^T) \times (\mathbf{L} \times \mathbf{L}^T)^{-1} \quad (2.10)$$

gdzie:

\mathbf{L}^T – macierz transponowana.

Wyznaczona w ten sposób macierz \mathbf{K} może być bezpośrednio użyta do obliczenia rzeczywistych parametrów badanego promieniowania na podstawie zależności:

$$\mathbf{C} = \mathbf{K} \times \mathbf{S} \quad (2.11)$$

W celu sprawdzenia działania rozszerzonej procedury kalibracyjnej stworzono wymienione powyżej mieszaniny strumieni świetlnych. We wszystkich trzech przypadkach składowe źródła LED zasilono prądem o stałej wartości 150 mA. Macierz \mathbf{T} , której elementy stanowią rzeczywiste wartości składowych trójkromatycznych użytych źródeł przyjęła postać:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 788,7 & 412,6 & 464,2 & 602,0 & 621 & 437,4 \\ 299,6 & 1222,6 & 213,1 & 773,6 & 257,2 & 733,7 \\ 0,06 & 56 & 2615,9 & 29,15 & 1287,5 & 1315,3 \end{bmatrix}$$

W tym samym czasie przeprowadzono pomiary czujnikiem MTCSiCS, otrzymane wyniki reprezentują elementy macierzy \mathbf{L} :

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 0,28166 & 0,99010 & 0,37725 & 0,64648 & 0,32870 & 0,69360 \\ 0,12706 & 1,21570 & 0,79458 & 0,68926 & 0,46185 & 1,02380 \\ 0,09185 & 0,06366 & 0,60535 & 0,07829 & 0,34231 & 0,32899 \end{bmatrix}$$

Na podstawie uzyskanych wyników, po wykonaniu operacji opisanej zależnością (2.10) otrzymano macierz transformacyjną \mathbf{K} :

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 3280,13 & -2425,63 & 1921,66 \\ 1186,16 & 64,26 & -471,88 \\ -1808,97 & 1321,91 & 3711,11 \end{bmatrix}$$

Podobnie, jak w przypadku podstawowej wersji kalibracji, w celu sprawdzenia poprawności procedury stworzono mieszaninę trzech strumieni świetlnych o parametrach identycznych jak w poprzednim przykładzie. Po wykonaniu pomiaru czujnikiem MTCSiCS i przeprowadzeniu procedury transformacji zgodnie z zależnością (2.11) otrzymano następujące wyniki składowych chromatycznych:

$$C = \begin{bmatrix} 801,0 \\ 868,7 \\ 1298,1 \end{bmatrix}$$

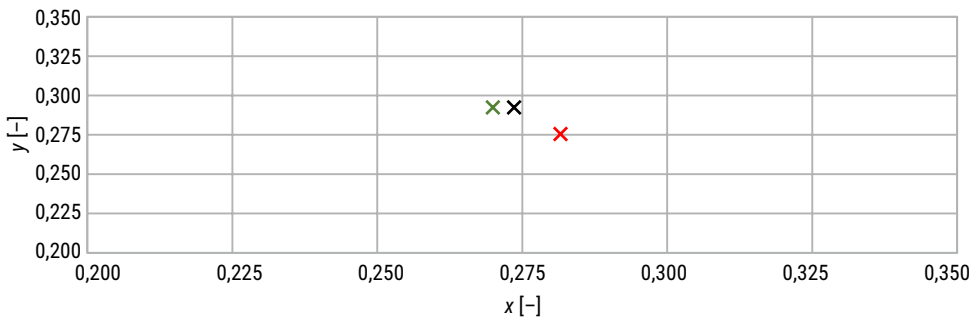
Na ich podstawie obliczono wartości współrzędnych trójchromatycznych:

$$x''_{RGB} = 0,2699$$

$$y''_{RGB} = 0,2927$$

$$z''_{RGB} = 0,4374$$

Położenie punktów chromatyczności obliczonych na podstawie rozszerzonej procedury kalibracji, jak również punktów reprezentujących rzeczywistą chromatyczność mieszaniny strumieni świetlnych pokazano na rysunku 2.22. Dodatkowo zaznaczono punkt chromatyczności obliczony na podstawie trójpunktowej wersji procedury transformacji.



RYS. 2.22. Współrzędne trójchromatyczne analizowanej mieszaniny strumieni świetlnych: punkt czarny – współrzędne przyjęte za rzeczywiste, punkt zielony – obliczone na podstawie rozszerzonej procedury kalibracji, punkt czerwony – obliczone na podstawie standardowej procedury kalibracji

Na wykresie z rysunku 2.22 wyraźnie widać, że punkt chromatyczności obliczony na podstawie rozszerzonej wersji kalibracji zbliżył się do punktu reprezentującego rzeczywiste współrzędne trójchromatyczne stworzonej mieszaniny testowej. Różnica barwy pomiędzy rozpatrywanymi punktami w układzie CIELAB wyniosła 0,6. Jest to różnica niezauważalna nawet dla doświadczonego obserwatora [19].

Otrzymany wynik ostatecznie potwierdził możliwość zastosowania czujnika MTCSiCS w pomiarach parametrów kolorymetrycznych źródeł światła.

Kolejnym czujnikiem, poddanym analizie był układ MMCS6. Ze względu na zastosowanie w nim sześciu filtrów optycznych w celu obliczenia parametrów kolorymetrycznych w układzie CIE XYZ 1931 należy wykonać operację transformacji opisaną zależnościami:

$$\begin{aligned} X &= q_{11} \cdot u_{425} + q_{12} \cdot u_{475} + q_{13} \cdot u_{525} + q_{14} \cdot u_{575} + q_{15} \cdot u_{625} + q_{16} \cdot u_{675} \\ Y &= q_{21} \cdot u_{425} + q_{22} \cdot u_{475} + q_{23} \cdot u_{525} + q_{24} \cdot u_{575} + q_{25} \cdot u_{625} + q_{26} \cdot u_{675} \\ Z &= q_{31} \cdot u_{425} + q_{32} \cdot u_{475} + q_{33} \cdot u_{525} + q_{34} \cdot u_{575} + q_{35} \cdot u_{625} + q_{36} \cdot u_{675} \end{aligned} \quad (2.12)$$

gdzie:

X, Y, Z – składowe trójkromatyczne układu kolorymetrycznego CIE XYZ 1931,
 u – napięcia wyjściowe poszczególnych kanałów czujnika MMCS6,
 q – współczynniki transformacji.

Równanie (2.12) w postaci macierzowej zapisać można jako:

$$C = Q \times S \quad (2.13)$$

gdzie:

$$C = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} & q_{15} & q_{16} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & q_{24} & q_{25} & q_{26} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & q_{34} & q_{35} & q_{36} \end{bmatrix}, \quad S = \begin{bmatrix} u_{425} \\ u_{475} \\ u_{525} \\ u_{575} \\ u_{625} \\ u_{675} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

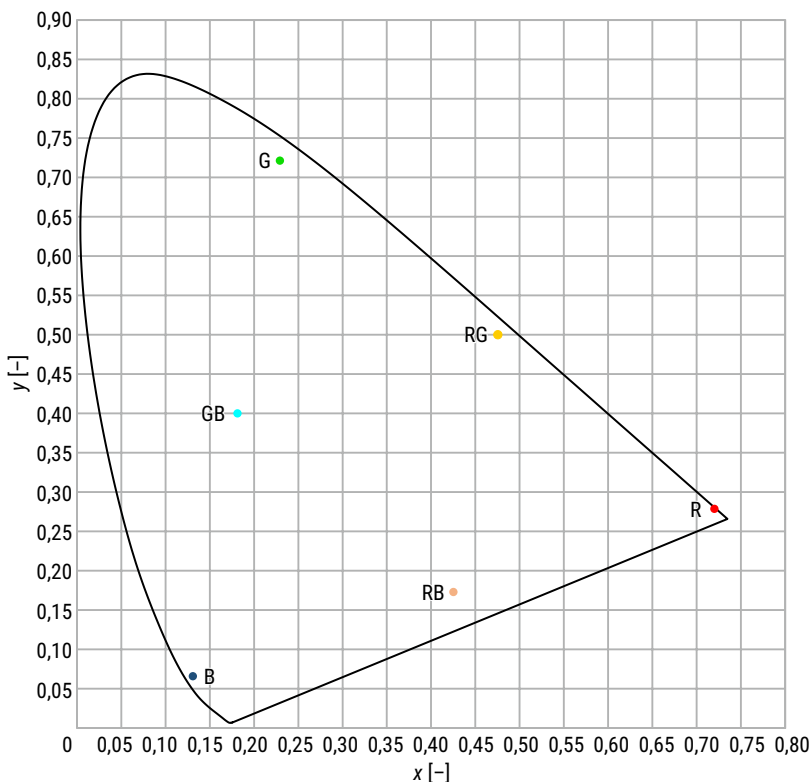
Operacja transformacji opisana równaniem (2.13) możliwa jest do wykonania w przypadku, gdy znane są elementy macierzy Q . W przypadku czujnika MMCS6 macierz transformacji Q zawiera 18 elementów. Wynika z tego, że podstawowa wersja procedury kalibracji wymaga zastosowania sześciu źródeł kalibracyjnych. Na podstawie ich rzeczywistych składowych trójkromatycznych oraz napięć odczytanych z toru pomiarowego czujnika MMCS6 stworzyć można następującą zależność:

$$\begin{aligned} T &= Q \times L \\ \begin{bmatrix} X_1 & X_2 & \dots & X_6 \\ Y_1 & Y_2 & \dots & Y_6 \\ Z_1 & Z_2 & \dots & Z_6 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} q_{11} & \dots & q_{16} \\ q_{21} & \dots & q_{26} \\ q_{31} & \dots & q_{36} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u_{1;425} & \dots & u_{6;425} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{1;675} & \dots & u_{6;675} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.15)$$

Obliczenie macierzy Q wymaga przeprowadzenia operacji opisanej równaniem:

$$Q = T \times L^{-1} \quad (2.16)$$

W rozpatrywanym przypadku jako źródeł kalibracyjnych, poza podstawowymi o barwie czerwonej, zielonej oraz niebieskiej, użyto także mieszanin ich strumieni świetlnych o współrzędnych trójkromatycznych pokazanych na rysunku 2.23.



RYS. 2.23. Położenie punktów chromatyczności źródeł użytych w podstawowej wersji procedury kalibracji czujnika MMCS6

Rzeczywiste składowe trójchromatyczne źródeł kalibracyjnych, zmierzone kolorymetrem CL-200 reprezentuje macierz T :

$$T = \begin{bmatrix} 389,4 & 160,8 & 263,0 & 517,4 & 1375,5 & 245,9 \\ 148,1 & 555,3 & 125,3 & 548,5 & 557,7 & 570,0 \\ 0,1 & 33,5 & 1410,5 & 20,0 & 1232,7 & 528,8 \end{bmatrix}$$

Odpowiadające im wartości napięć wyjściowych toru elektronicznego czujnika MMCS6 zapisano w postaci elementów macierzy L :

$$L = \begin{bmatrix} 0,01530 & 0,00896 & 0,04897 & 0,02466 & 0,09149 & 0,03315 \\ 0,01746 & 0,01837 & 0,31722 & 0,03612 & 0,38211 & 0,16672 \\ 0,02681 & 0,14273 & 0,26534 & 0,18067 & 0,34042 & 0,33669 \\ 0,01946 & 0,17331 & 0,06455 & 0,21667 & 0,11498 & 0,29391 \\ 0,17044 & 0,06579 & 0,01656 & 0,24734 & 0,49828 & 0,10647 \\ 0,62552 & 0,01674 & 0,01351 & 0,65225 & 1,84444 & 0,03042 \end{bmatrix}$$

Po odwróceniu macierzy L otrzymano:

$$L^{-1} = \begin{bmatrix} 62,38 & -99,70 & 137,52 & -144,88 & 109,92 & -28,48 \\ 1082,36 & -214,05 & 63,32 & 44,38 & -344,41 & 69,25 \\ 184,01 & -10,09 & -18,54 & -3,80 & 30,96 & -11,74 \\ -210,59 & 119,36 & -123,52 & 54,37 & 127,59 & -29,34 \\ 51,17 & -7,20 & -4,22 & 30,60 & -81,59 & 20,41 \\ -547,55 & 49,86 & 50,34 & -64,39 & 126,87 & -22,72 \end{bmatrix}$$

Korzystając z wyznaczonych macierzy T oraz L^{-1} na podstawie zależności (2.16) obliczono macierz Q :

$$Q = \begin{bmatrix} 73537,79 & -11790,39 & 1515,574 & 4101,15 & -19458,4 & 4262,15 \\ 234237,4 & -45015,95 & 11794,38 & 12889,12 & -74286,1 & 15098,06 \\ 65080,53 & -1524,31 & -5072,09 & 862,42 & 1230,68 & -1694,09 \end{bmatrix}$$

W celu sprawdzenia działania opisanej procedury stworzono testową mieszaninę strumieni świetlnych trzech LED-ów – emitujących światło czerwone, zielone oraz niebieskie. W efekcie otrzymano źródło o następujących składowych trójkromatycznych:

$$C_{CL-200} = \begin{bmatrix} 827,3 \\ 861,2 \\ 1466 \end{bmatrix}$$

Obliczone na ich podstawie współrzędne trójkromatyczne powstałej mieszaniny wyniosły:

$$\begin{aligned} x_{RGB} &= 0,2623 \\ y_{RGB} &= 0,2730 \\ z_{RGB} &= 0,4648 \end{aligned}$$

Wyniki pomiaru czujnikiem MMCS6 reprezentuje wektor S :

$$S = \begin{bmatrix} 0,08998 \\ 0,44361 \\ 0,59463 \\ 0,38867 \\ 0,29881 \\ 0,67095 \end{bmatrix}$$

Wartości w postaci wektora S poddano procedurze transformacji zgodnie z zależnością (2.13). Jej rezultatem jest wektor C :

$$C = \begin{bmatrix} 926,9 \\ 1061,9 \\ 1729,7 \end{bmatrix}$$

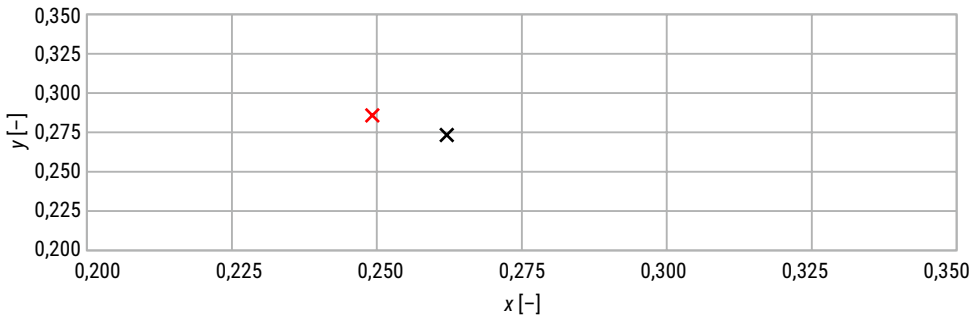
Współrzędne trójchromatyczne obliczone na podstawie wskazań czujnika MMCS6 wyniosły:

$$x'_{RGB} = 0,2493$$

$$y'_{RGB} = 0,2856$$

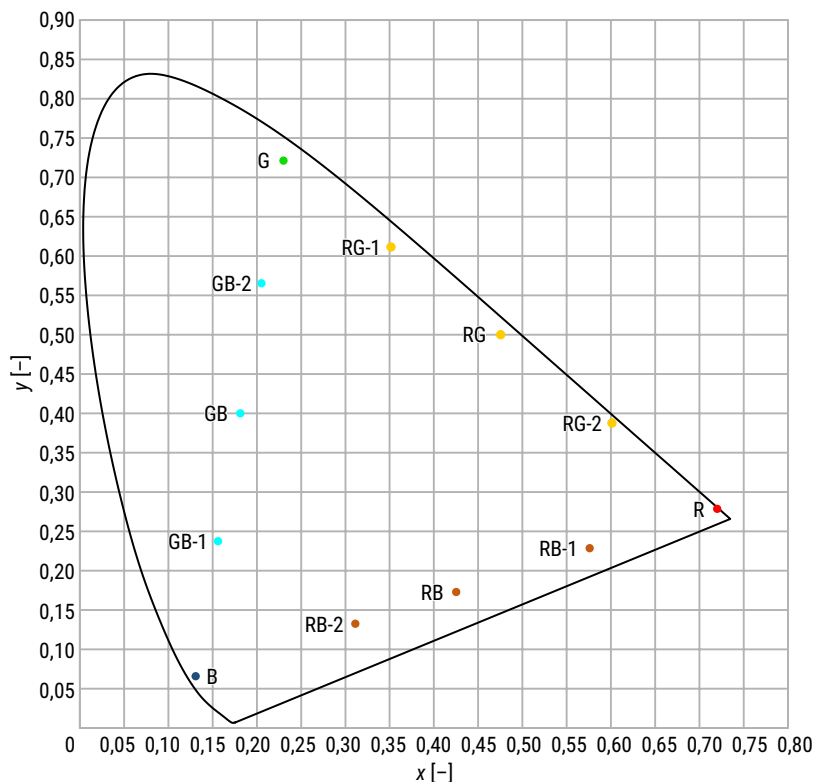
$$z'_{RGB} = 0,4525$$

Położenie obliczonych punktów współrzędnych trójchromatycznych zaznaczono na rysunku 2.24. Analogicznie, jak w przypadku czujnika MTCSiCS, analizę różnicy barwy ΔE_{LAB} przeprowadzono w układzie kolorymetrycznym CIELAB. W przytoczonym przykładzie obliczona różnica barwy ΔE_{LAB} wyniosła 3,6. Jest to wynik niezadowolający, ponieważ obserwator zauważy wyraźną różnicę pomiędzy rozpatrywanymi barwami [19].



RYS. 2.24. Współrzędne trójchromatyczne analizowanej mieszaniny strumieni świetlnych obliczone na podstawie wskazań kolorimetru CL-200 (punkt czarny) oraz przetransformowanych wskazań czujnika MMCS6 (punkt czerwony)

W kolejnym etapie badania czujnika MMCS6 przeprowadzono analizę działania rozszerzonej wersji procedury kalibracyjnej, która oparta została na 12 punktach kalibrujących. Położenie współrzędnych trójchromatycznych tych punktów pokazano na rysunku 2.25.



RYS. 2.25. Położenie punktów chromatyczności źródeł użytych w rozszerzonej wersji procedury kalibracji czujnika MMCS6

Przy tak przyjętych źródłach kalibracyjnych zależność (2.15) przekształcić należy do postaci:

$$T = Q' \times L$$

$$\begin{bmatrix} X_1 & X_2 & \dots & X_{11} & X_{12} \\ Y_1 & Y_2 & \dots & Y_{11} & Y_{12} \\ Z_1 & Z_2 & \dots & Z_{11} & Z_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{11} & \dots & q_{16} \\ q_{21} & \dots & q_{26} \\ q_{31} & \dots & q_{36} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u_{1;425} & \dots & u_{12;425} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{1;675} & \dots & u_{12;675} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

W związku z tym, że macierz L jest macierzą prostokątną, niemożliwe jest bezpośrednio wyznaczenie jej macierzy odwrotnej L^{-1} . Konieczne jest więc zastosowanie procedury kalibracyjnej analogicznej do rozszerzonej wersji kalibracji czujnika MTCSiCS opisanej zależnością (2.10).

Rzeczywiste składowe trójchromatyczne zestawione w macierzy T w analizowanym przykładzie przyjmują postać:

$$T^T = \begin{bmatrix} 389,4 & 148,1 & 0,1 \\ 160,8 & 555,3 & 33,5 \\ 263,0 & 125,3 & 1410,5 \\ 517,4 & 548,5 & 20,0 \\ 313,5 & 545,2 & 26,7 \\ 840,5 & 546,7 & 10,5 \\ 1375,5 & 557,7 & 1232,7 \\ 1383,3 & 551,2 & 517,0 \\ 1398,8 & 577,0 & 2548,2 \\ 245,9 & 570,0 & 528,8 \\ 388,7 & 566,3 & 1398,7 \\ 202,9 & 561,5 & 275,8 \end{bmatrix}$$

Odpowiadające im wartości napięć wyjściowych czujnika MMCS6 zebrane w macierzy L wynoszą:

$$L^T = \begin{bmatrix} 0,01530 & 0,01744 & 0,02681 & 0,01946 & 0,17044 & 0,62552 \\ 0,00896 & 0,01837 & 0,14273 & 0,17331 & 0,06579 & 0,01674 \\ 0,04897 & 0,31722 & 0,26534 & 0,06455 & 0,01656 & 0,01351 \\ 0,02466 & 0,03612 & 0,18067 & 0,21667 & 0,24734 & 0,65225 \\ 0,01840 & 0,03174 & 0,20583 & 0,24889 & 0,16532 & 0,29510 \\ 0,00552 & 0,01033 & 0,08948 & 0,11907 & 0,04425 & 0,01091 \\ 0,09149 & 0,38211 & 0,34042 & 0,11498 & 0,49828 & 1,84444 \\ 0,05077 & 0,16876 & 0,17785 & 0,07060 & 0,51745 & 1,94815 \\ 0,15115 & 0,74702 & 0,62214 & 0,17875 & 0,43621 & 1,53147 \\ 0,03315 & 0,16672 & 0,33669 & 0,29391 & 0,10647 & 0,03042 \\ 0,06978 & 0,40343 & 0,49317 & 0,29963 & 0,10478 & 0,03690 \\ 0,02288 & 0,09696 & 0,28578 & 0,28826 & 0,10556 & 0,02792 \end{bmatrix}$$

Obliczona, na podstawie macierzy T oraz L , macierz Q' przyjęła postać:

$$Q' = \begin{bmatrix} -71319,97 & 43179,03 & -48436,49 & 44907,50 & -15763,69 & 5788,72 \\ 22114,48 & 13946,91 & -16573,99 & 18868,19 & -9941,73 & 3104,13 \\ -8534,13 & 1964,58 & 5229,43 & -7008,28 & 8328,59 & -2108,71 \end{bmatrix}$$

Ponownie, jako źródła testowego, użyto mieszaniny strumieni świetlnych LED-ów emitujących promieniowanie o barwie czerwonej, zielonej i niebieskiej. Rzeczywiste wartości składowych oraz współrzędnych trójchromatycznych przyjęły taką samą wartość jak w poprzednim przykładzie.

Parametry kolorymetryczne obliczone na podstawie wskazań czujnika MMCS6 oraz macierzy Q' (wyznaczonej rozszerzoną wersją procedury kalibracyjnej) wynoszą:

$$C = \begin{bmatrix} 763,3 \\ 787,2 \\ 1563 \end{bmatrix}$$

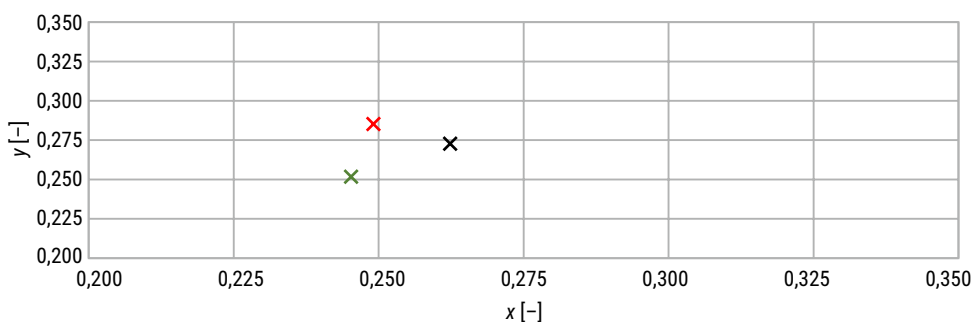
Współrzędne trójchromatyczne obliczone na podstawie uzyskanych składowych przyjmują wartości:

$$x''_{RGB} = 0,2452$$

$$y''_{RGB} = 0,2528$$

$$z''_{RGB} = 0,5020$$

Położenie punktów o współrzędnych trójchromatycznych obliczonych na podstawie macierzy Q oraz Q' pokazano na rysunku 2.26. Podobnie jak w poprzednich przykładach, różnicę barwy ΔE_{LAB} pomiędzy punktem o współrzędnych przyjętych jako rzeczywiste a punktem obliczonym na podstawie wskazań czujnika określono w układzie CIELAB. W rozpatrywanym przykładzie różnica barwy ΔE_{LAB} wyniosła 2,45. Jest to wartość niższa niż w przypadku wyników opartych na podstawowej procedurze kalibracji. Niemniej jednak można stwierdzić, że jest ona wciąż za wysoka, ponieważ zgodnie z tymi danymi, różnica ΔE_{LAB} na poziomie 2,45 jest zauważalna nawet przez niedoświadczonego obserwatora [19].



RYS. 2.26. Współrzędne trójchromatyczne analizowanej mieszaniny strumieni świetlnych: punkt czarny – współrzędne przyjęte za rzeczywiste, punkt zielony – obliczone na podstawie rozszerzonej procedury kalibracji, punkt czerwony – obliczone na podstawie standardowej procedury kalibracji

Przypuszczać można, że przyczyną tak wysokiej wartości różnicy barwy ΔE_{LAB} mogą być błędy zaokrągleń powstałe w czasie wieloetapowych operacji matematycznych. Prawdopodobnie zwiększenie zarówno liczby punktów kalibracyjnych jak też rozdzielczości obliczeń zmniejszyłoby powstałą różnicę barwy. Niestety, wiązałyby się również ze znacznym wzrostem czasu obliczeń, co mogłoby negatywnie wpłynąć na działanie całego procesu sterowania oprawą LED. Zwiększenie rozdzielczości obliczeń zapewne poprawiłoby dokładność wyznaczenia wartości elementów macierzy transformacyjnej. Jednak macierz transformacyjna o elementach obliczonych z dokładnością kilku lub kilkunastu miejsc po przecinku wymagałoby zastosowania mikrokontrolera o dużo większej mocy obliczeniowej oraz zasobach pamięci, co na tym etapie wydaje się nieopłacalne.

Podsumowanie

W rozdziale drugim opisano wyniki badań właściwości pomiarowych scalonych czujników barwy. Analizie poddano dwa czujniki firmy MAZet – układ MTCSiCS oraz MMCS6. Charakteryzowały się one wysoką linowością charakterystyk sygnałów wyjściowych, szerokim zakresem pomiarowym oraz możliwością wielopoziomowej zmiany czułości. Osiągnięte zostało to przez zastosowanie rozbudowanych torów elektronicznych składających się między innymi z konwerterów prąd – napięcie oraz przetworników analogowo-cyfrowych o wysokiej rozdzielczości.

Kolejnym etapem badań czujników barwy, było sprawdzenie ich odpowiedzi na oświetlenie promieniowaniem o znanych parametrach kolorymetrycznych. Na podstawie otrzymanych wyników, jak również na podstawie wcześniejszej analizy danych dostarczonych przez producenta, stwierdzono, że oba czujniki przekazują informację o promieniowaniu we własnych lokalnych układach kolorymetrycznych. Przeprowadzono więc procedury kalibracyjne, których efektem było wyznaczenie macierzy transformacyjnych, pozwalających na przekształcenie danych z czujników koloru firmy MAZet do składowych trójchromatycznych w układzie CIE XYZ 1931. Zaproponowano dwie wersje procedury kalibracyjnej – podstawową oraz rozszerzoną. W przypadku detektora MTCSiCS pierwsza z nich była oparta na zastosowaniu trzech źródeł kalibracyjnych o znanych parametrach kolorymetrycznych, a druga wymagała użycia sześciu źródeł. Podstawowa kalibracja układu MMCS6 wymagała zastosowania sześciu a wersja rozszerzona aż dwunastu źródeł kalibracyjnych.

Ostatecznie, na podstawie analizy wyników wszystkich przeprowadzonych badań, podjęto decyzję o zastosowaniu czujnika MTCSiCS oraz rozszerzonej wersji procedury kalibracyjnej w modelu projektowanej oprawy LED.

3. Model oprawy o regulowanych parametrach

3.1. Odczyt parametrów kolorymetrycznych na powierzchni referencyjnej

Przed przystąpieniem do realizacji właściwego algorytmu sterującego oprawą LED, układ sterujący przeprowadza pomiar parametrów fotometrycznych i kolorymetrycznych promieniowania oświetlającego powierzchnię referencyjną. Na podstawie tych pomiarów wyznaczane są średnie natężenie oświetlenia (średnia luminancja) powierzchni oraz temperatura barwowa najbliższa źródła zewnętrznego.

Zadaniem zaproponowanego modelu oprawy LED jest stabilizacja średniego natężenia oświetlenia na powierzchni referencyjnej przez doświetlanie jej strumieniem świetlnym o odpowiedniej wartości oraz temperaturze barwowej najbliższej równej temperaturze barwowej źródła zewnętrznego. Drugim zadaniem układu jest realizacja wiernego oddawania barw w doświetlanym obszarze.

3.2. Model oprawy LED o trzech barwach składowych

Na podstawie przeprowadzonych badań do wykonania modelu oprawy oświetleniowej o regulowanych trzech składowych barwnych zdecydowano się użyć następujących źródeł LED:

- Cree XP-E XPE**PHR** – Photo Red:

$$x_R = 0,7206$$

$$y_R = 0,2789$$

- ProLight 3W Power LED PK2N-3L**GE**-SD – Green:

$$x_G = 0,2286$$

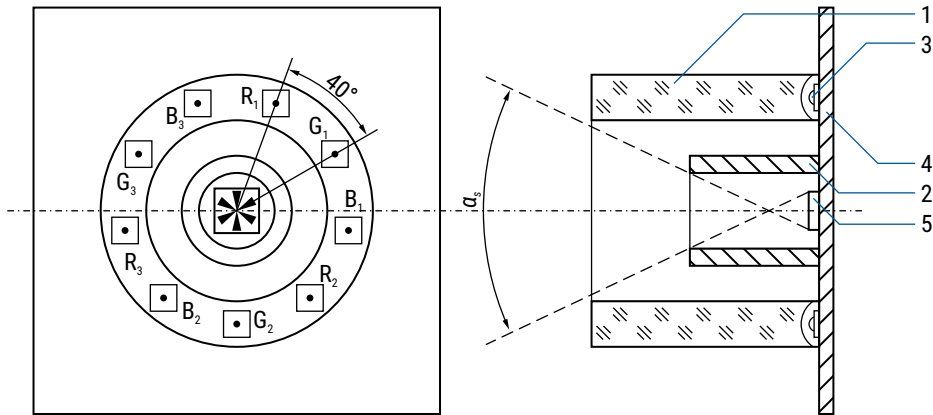
$$y_G = 0,7216$$

- Cree XP-C XPC**BLU** – Blue:

$$x_B = 0,1292$$

$$y_B = 0,0649$$

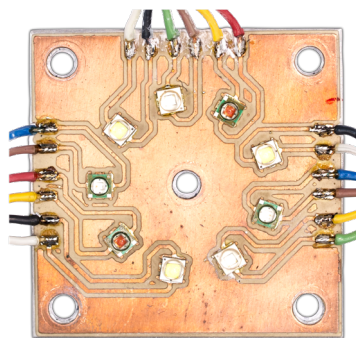
Wybrane diody elektroluminescencyjne przyłutowano do obwodu drukowanego o aluminiowym rdzeniu (MCPCB – Metal Core Printed Circuit Board). Rozmieszczenie LED-ów przedstawia rysunek 3.1.



RYS. 3.1. Rozmieszczenie LED-ów na obwodzie drukowanym MCPCB – model oprawy oparty na trzech źródłach składowych R, G, B: 1 – tuleja wykonana z PMMA, 2 – osłona czujnika koloru, 3 – LED, 4 – płytką drukowaną MCPCB, 5 – moduł z czujnikiem koloru

Jak widać na rysunku 3.1, diody elektroluminescencyjne rozmieszczone na planie okręgu o średnicy 25 mm. W celu wymieszania strumieni świetlnych emitowanych przez poszczególne LED-y, nad diodami zamontowano pierścieniowy mieszacz strumienia świetlnego. Centralnie, w płytce MCPCB, wykonano otwór, do którego mocowane są wymienne moduły z czujnikami koloru. W celu osłonięcia przed bezpośredniego promieniowania pochodzącego z LED-ów, osłonięto go nasadką cylindryczną wykonaną z materiału nieprzepuszczającego światło. Jej długość dobrano w taki sposób, aby kąt obserwacji α_s obejmował całe oświetlane przez moduł referencyjne pole robocze.

Zdjęcie skonstruowanego modułu LED pokazano na rysunku 3.2.



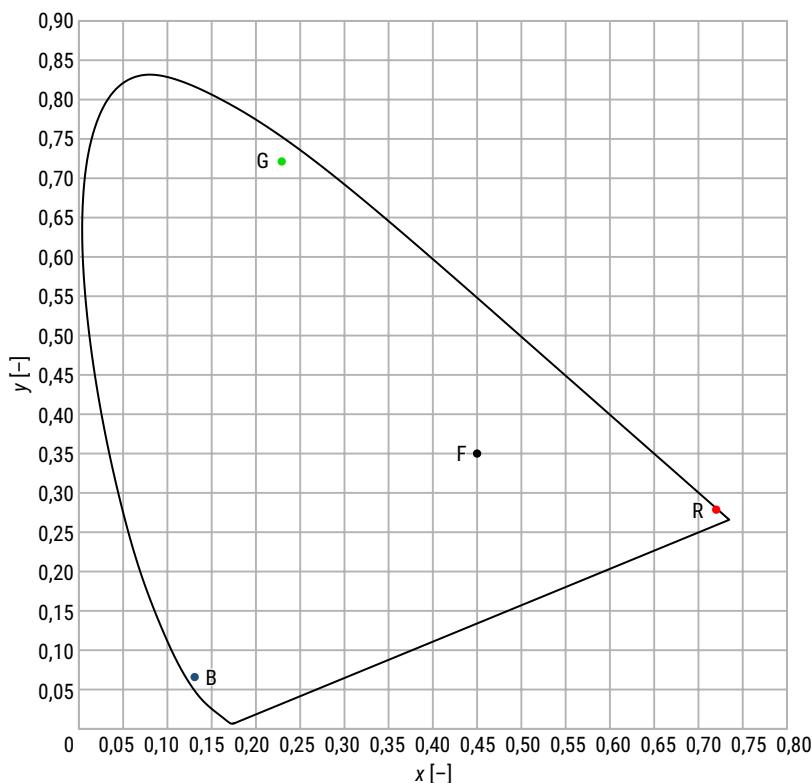
RYS. 3.2. Zdjęcie skonstruowanego modelu modułu LED

Na wykresie xy – rysunek 3.3 – przedstawiono rozmieszczenie punktów chromatyczności źródeł składowych oprawy LED oraz położenie przykładowej mieszaniny strumieni świetlnych F o współrzędnych x_F oraz y_F .

Pierwszym etapem działania algorytmu jest sprawdzenie, czy punkt chromatyczności mieszaniny F (x_F, y_F) jest możliwy do zrealizowania przez addytywne zmieszanie strumieni świetlnych pochodzących od źródeł bazowych R (x_R, y_R), G (x_G, y_G) oraz B (x_B, y_B). Polega to na sprawdzeniu, czy współrzędne trójkromatyczne x_F oraz y_F mieszaniny F leżą wewnątrz trójkąta, którego wierzchołki stanowią współrzędne źródeł składowych R, G, B.

Procedura ta rozpoczyna się od wyznaczenia trzech prostych przechodzących przez wierzchołki trójkąta RGB. Rozpatrując prostą przechodzącą przez punkty R (x_R, y_R) oraz G (x_G, y_G) można zapisać:

$$\begin{aligned} y_R &= a_{RG} \cdot x_R + b_{RG} \\ y_G &= a_{RG} \cdot x_G + b_{RG} \end{aligned} \quad (3.1)$$



RYS. 3.3. Położenie współrzędnych trójkromatycznych źródeł składowych oprawy LED RGB oraz współrzędnych przykładowej mieszaniny F

W celu wyznaczenia współczynnika kierunkowego a_{RG} oraz wartości wyrazu wolnego b_{RG} rozpatrywanej prostej, równania (3.1) można przekształcić do postaci:

$$a_{RG} = \frac{y_R - y_G}{x_R - x_G} \quad (3.2)$$

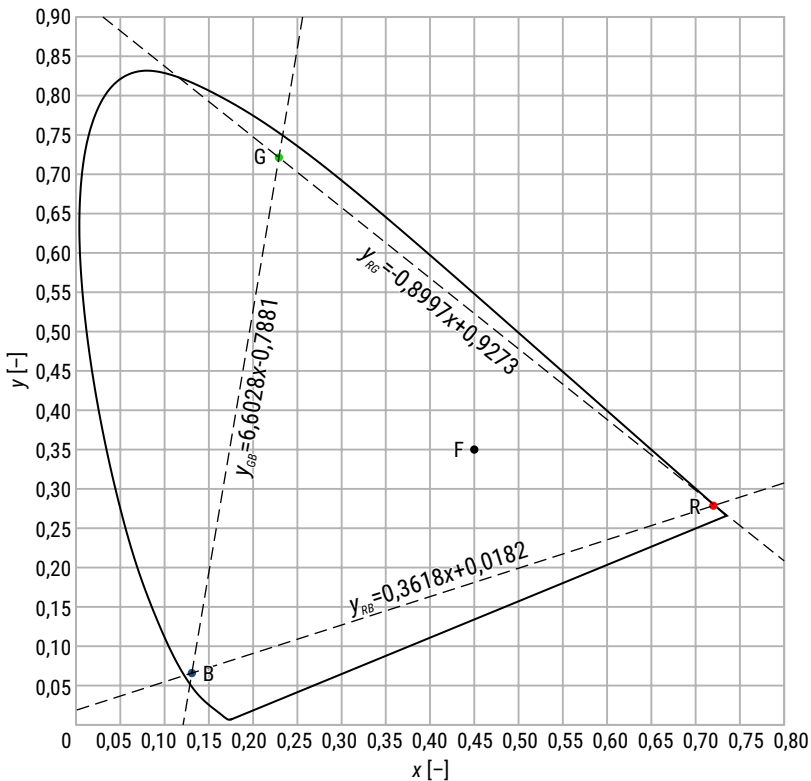
$$b_{RG} = y_R - \frac{y_R - y_G}{x_R - x_G} \cdot x_R$$

Analogiczne postąpić należy w przypadku prostych przechodzących przez punkty R (x_R, y_R) i B (x_B, y_B) oraz G (x_G, y_G) i B (x_B, y_B).

Korzystając z zależności (3.2) oraz współrzędnych chromatycznych źródeł składowych obliczono parametry prostych wyznaczających boki trójkąta:

- prosta RG: $a_{RG} = -0,8997$; $b_{RG} = 0,9273$
- prosta RB: $a_{RB} = 0,3618$; $b_{RB} = 0,0182$
- prosta GB: $a_{GB} = 6,6028$; $b_{GB} = -0,7881$

Na rysunku 3.4 przedstawiono zakres barw (gamut) jaki możliwy jest do zrealizowania przy użyciu wybranych składowych czerwonej, zielonej oraz niebieskiej.



RYC. 3.4. Zakres barw możliwych do zrealizowania przy użyciu wybranych składowych RGB

Określenie, czy współrzędne mieszaniny F znajdują się wewnątrz trójkąta polega na sprawdzeniu czy ten punkt leży nad prostą RB oraz pod prostymi RG i GB.

W celu zobrazowania opisanej procedury można posłużyć się przykładem. Na podstawie danych z rysunku 3.4 można zapisać:

$$x_F = 0,4500$$

$$y_F = 0,3500$$

oraz

$$\begin{aligned} y_{RG} &= -0,8997x + 0,9273 \\ y_{RB} &= 0,3618x + 0,0182 \\ y_{GB} &= 6,6028x - 0,7881 \end{aligned} \quad (3.3)$$

Podstawiając wartości współrzędnych chromatycznych rozpatrywanej mieszaniny F do zależności (3.3) otrzymuje się:

$$\begin{aligned} y_{RG, x=0,45} &= -0,8997 \cdot 0,4500 + 0,9273 = 0,5224 > y_F \\ y_{RB, x=0,45} &= 0,3618 \cdot 0,4500 + 0,0182 = 0,1810 < y_F \\ y_{GB, x=0,45} &= 6,6028 \cdot 0,4500 - 0,7881 = 2,1832 > y_F \end{aligned} \quad (3.4)$$

Stwierdzić tym samym można, że mieszanina strumieni świetlnych o współrzędnych chromatycznych x_F oraz y_F jest możliwa do zrealizowania przy użyciu wybranych składowych R, G oraz B.

Kolejnym etapem działania algorytmu jest rozłożenie strumienia świetlnego Φ_F mieszaniny F na strumienie świetlne poszczególnych składowych barwnych. Rozpoczyna się ona od obliczenia podziału strumienia świetlnego mieszaniny F na strumień Φ_B składowej niebieskiej oraz strumień świetlny Φ_{RG} mieszaniny składowych czerwonej oraz zielonej. W tym celu należy wyznaczyć prostą przechodzącą przez punkty chromatyczności źródła składowego B oraz mieszaniny F – rysunek 3.5.

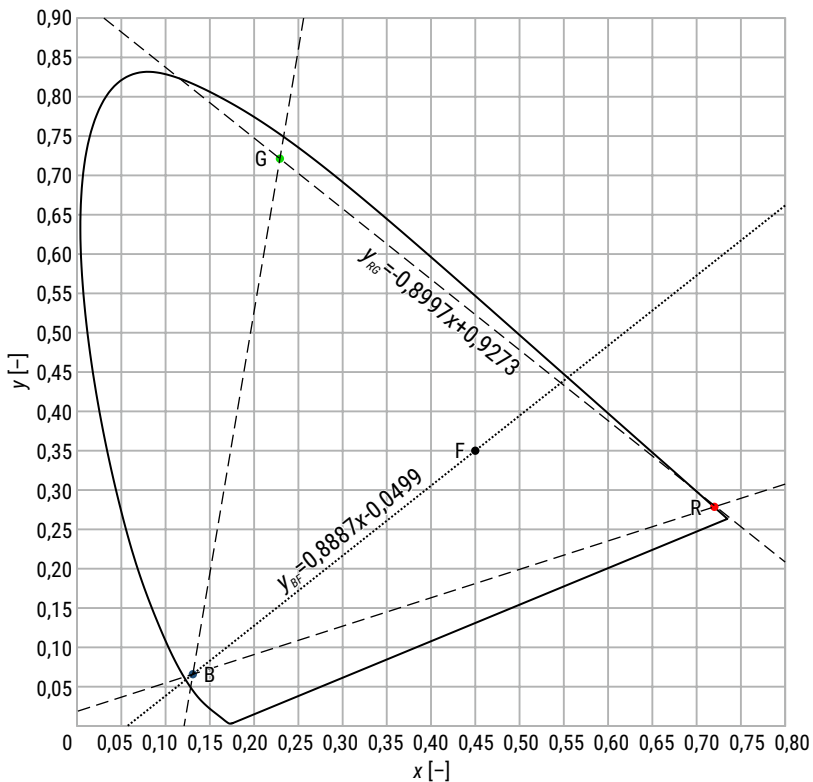
Wyznaczenie współczynników prostej przechodzącej przez punkty B oraz F oparte jest na zależności (3.2) – analogicznie jak to miało miejsce przy określaniu równań opisujących krawędzie gamutu barw:

$$\begin{aligned} a_{BF} &= \frac{y_F - y_B}{x_F - x_B} \\ b_{BF} &= y_F - \frac{y_F - y_B}{x_F - x_B} \cdot x_F \end{aligned} \quad (3.5)$$

W rozpatrywanym przykładzie równanie opisujące poszukiwaną prostą przyjmie postać:

$$y_{BF} = 0,8887x - 0,0499 \quad (3.6)$$

Następnie obliczyć należy punkt F_{RG} przecięcia prostych przechodzących przez punkty B, F oraz R, G – rysunek 3.6.



RYS. 3.5. Prosta przechodząca przez punkty B i F

Równania opisujące rozpatrywane dwie proste przyjmują postać:

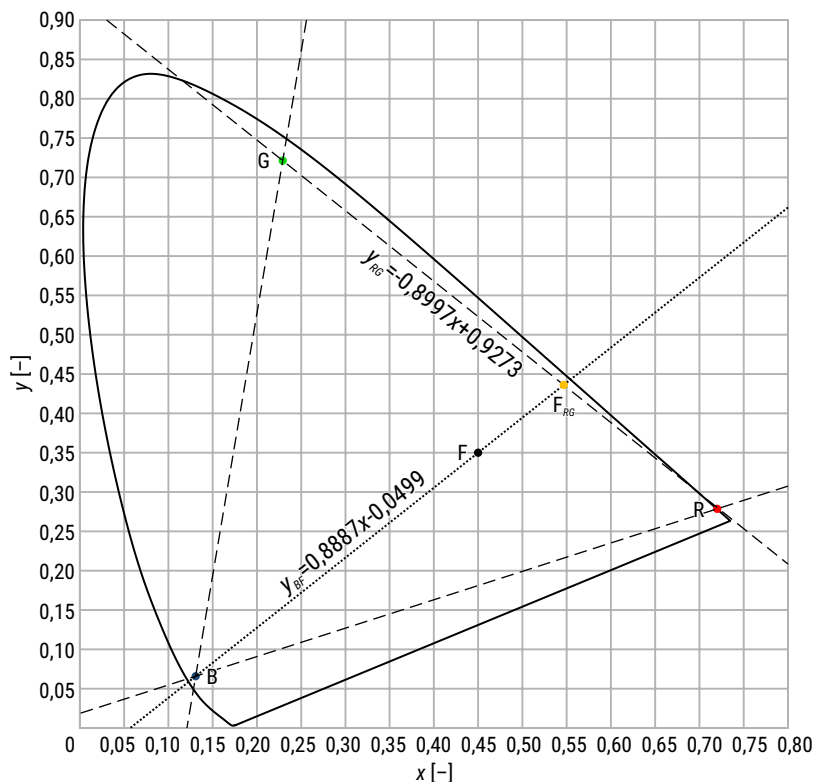
$$\begin{aligned} y_{RG} &= a_{RG} \cdot x + b_{RG} \\ y_{BF} &= a_{BF} \cdot x + b_{BF} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Wykluczyć można, że są to proste równoległe, ponieważ ich współczynniki kierunkowe są różne:

$$a_{RG} \neq a_{BF} \quad (3.8)$$

Tym samym istnieje punkt przecięcia prostych RG oraz BF, w którym zachodzi równość:

$$\begin{aligned} x_{RG} &= x_{BF} \\ y_{RG} &= y_{BF} \end{aligned} \quad (3.9)$$



RYS. 3.6. Punkt F_{RG} przecięcia prostych przechodzących przez punkty B, F oraz R, G

Podstawiając zależności (3.9) do równań (3.7) można wyprowadzić wzory pozwalające obliczyć współrzędne x_{RG} , y_{RG} przecięcia prostych RG i BF:

$$x_{RG} = x_{BF} = \frac{b_{RG} - b_{BF}}{a_{BF} - a_{RG}} \quad (3.10)$$

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

W rozpatrywanym przykładzie współrzędne punktu F_{RG} wynoszą:

$$x_{RG} = 0,5464$$

$$y_{RG} = 0,4357$$

Następnym, istotnym etapem procedury rozkładu mieszaniny na składowe barwne jest określenie tak zwanych modułów strumieni świetlnych [16], które informują o proporcjach mieszania jednostkowych strumieni świetlnych źródeł składowych, w celu uzyskania mieszaniny o wyznaczonych współrzędnych trójchromatycznych.

Moduł barwy h_B w mieszaninie z barwą o współrzędnych x_{RG}, y_{RG} , na płaszczyźnie jednostkowej xy , reprezentowany jest przez długość odcinka łączącego punkty F_{RG} oraz F:

$$h_B = \sqrt{(x_{RG} - x_F)^2 + (y_{RG} - y_F)^2} \quad (3.11)$$

Natomiast moduł h_{RG} mieszaniny F_{RG} obliczyć można na podstawie zależności:

$$h_{RG} = \sqrt{(x_B - x_F)^2 + (y_B - y_F)^2} \quad (3.12)$$

Przyjmując, że mieszanina F powstała z addytywnego sumowania strumieni świetlnych o współrzędnych w punktach B oraz F_{RG} moduł h_F jest sumą:

$$h_F = h_B + h_{RG} \quad (3.13)$$

Kolejną czynnością jest określenie wskaźników strumieni świetlnych Φ'_B oraz Φ'_{RG} zwanych „strumieniami jednostkowymi” [16]:

$$\begin{aligned} \Phi'_B &= h_B \cdot y_B \\ \Phi'_{RG} &= h_{RG} \cdot y_{RG} \end{aligned} \quad (3.14)$$

oraz wskaźnika strumienia świetlnego Φ'_F mieszaniny F:

$$\Phi'_F = h_F \cdot y_F = \Phi'_B + \Phi'_{RG} \quad (3.15)$$

Na podstawie wskaźnika strumienia świetlnego Φ'_F oraz rzeczywistego strumienia świetlnego Φ_F wyznaczyć należy współczynnik skalowania k'_ϕ :

$$k'_\phi = \frac{\Phi_F}{\Phi'_F} \quad (3.16)$$

Pozwala on obliczyć wartości rzeczywistych strumieni świetlnych Φ_B oraz Φ_{RG} :

$$\begin{aligned} \Phi_B &= k'_\phi \cdot \Phi'_B \\ \Phi_{RG} &= k'_\phi \cdot \Phi'_{RG} \end{aligned} \quad (3.17)$$

W analizowanym przykładzie przyjęto rzeczywisty strumień świetlny Φ_F mieszaniny o chromatyczności w punkcie F równy 100 lumenów. Moduły h_B oraz h_{RG} obliczone na podstawie zależności (3.11) i (3.12) wynoszą:

$$h_B = 0,12899$$

$$h_{RG} = 0,42918$$

a ich suma

$$h_F = 0,55817$$

Wskaźniki strumieni świetlnych Φ'_B , Φ'_{RG} oraz Φ'_F przyjmują wartości:

$$\Phi'_B = 0,00837$$

$$\Phi'_{RG} = 0,18699$$

$$\Phi'_F = 0,19536$$

Wyznaczone wartości parametrów Φ'_F oraz Φ'_F pozwalają na obliczenie współczynnika skalowania, który przyjmuje wartość:

$$k_\phi = 511,88$$

Podstawiając wartości wskaźników strumieni świetlnych Φ'_B oraz Φ'_{RG} oraz współczynnika skalowania do wzoru (3.17), otrzymano następujące wartości rzeczywistych strumieni świetlnych Φ_B oraz Φ_{RG} potrzebnych do uzyskania wypadkowej mieszaniny o strumieniu świetlnym o wartości 100 lumenów i współrzędnych chromatycznych $x_F = 0,45$ oraz $y_F = 0,35$:

$$\Phi_B = 4,3 \text{ [lm]}$$

$$\Phi_{RG} = 95,7 \text{ [lm]}$$

Dalsze czynności procedury pozwalają na rozkład mieszaniny o współrzędnych w punkcie F_{RG} na poszczególne strumienie świetlne źródła R o współrzędnych x_R, y_R oraz źródła G opisanego współrzędnymi x_G, y_G . W tym przypadku prosta przechodząca przez punkty R, G oraz F_{RG} zawiera jednocześnie jeden z boków gamutu. Jej równanie zostało więc określone w poprzednim etapie procedury – zależność (3.3). Kolejnym krokiem jest obliczenie modułu barwy czerwonej h_R oraz modułu barwy zielonej h_G oraz ich sumy h'_{RG} z zależności:

$$\begin{aligned} h_R &= \sqrt{(x_G - x_{RG})^2 + (y_G - y_{RG})^2} \\ h_G &= \sqrt{(x_R - x_{RG})^2 + (y_R - y_{RG})^2} \end{aligned} \quad (3.18)$$

oraz

$$h'_{RG} = h_R + h_G \quad (3.19)$$

W rozpatrywanym przykładzie przyjmują one następujące wartości:

$$h_R = 0,23435$$

$$h_G = 0,42750$$

$$h'_{RG} = 0,66185$$

Wykorzystując obliczone wartości modułów wyznaczyć należy wartości wskaźników strumieni świetlnych Φ'_R oraz Φ'_G :

$$\Phi'_R = h_R \cdot y_R \quad (3.20)$$

$$\Phi'_G = h_G \cdot y_G$$

oraz wskaźnika strumienia Φ''_{RG} mieszaniny F_{RG} :

$$\Phi''_{RG} = h'_{RG} \cdot y_{RG} = \Phi'_R + \Phi'_G \quad (3.21)$$

Na podstawie wartości wskaźnika strumienia świetlnego Φ''_{RG} obliczonego z zależności (3.21) oraz rzeczywistego strumienia świetlnego Φ_{RG} wyznaczono kolejny współczynnik skalowania k''_{ϕ} :

$$k'_{\phi} = \frac{\Phi_{RG}}{\Phi''_{RG}} \quad (3.22)$$

Wielkości opisane równaniami od (3.20) do (3.22) w analizowanym przykładzie osiągną wartość:

$$\Phi'_R = 0,11923 \text{ [lm]}$$

$$\Phi'_G = 0,16911 \text{ [lm]}$$

$$\Phi''_{RG} = 0,28834 \text{ [lm]}$$

$$k''_{\phi} = 331,95 \text{ [lm]}$$

Podstawiając otrzymane wartości do równania analogicznego do (3.17) otrzymano rzeczywiste strumienie świetlne źródeł R oraz G tworzących addytywną mieszaninę F_{RG} :

$$\Phi_R = 39,6 \text{ [lm]}$$

$$\Phi_G = 51,6 \text{ [lm]}$$

Podsumowując, w celu otrzymania mieszaniny strumieni świetlnych F o współrzędnych tróchromatycznych $x_F = 0,45$ oraz $y_F = 0,35$, należy addytywnie zmieszać strumienie świetlne źródeł: R ($x_R = 0,7206$; $y_R = 0,2789$) o wartości 39,6 lm, G ($x_G = 0,2286$; $y_G = 0,7216$) o wartości 56,1 lm oraz B ($x_B = 0,1292$; $y_B = 0,0649$) o wartości 4,3 lm.

3.3. Model oprawy LED o czterech barwach składowych

W drugim zaproponowanym modelu oprawy oświetleniowej użyto czterech regulowanych składowych źródeł LED. Do zestawu trzech składowych zastosowanych w poprzednio opisanym rozwiązaniu dodano źródło o barwie białej. Współrzędne tróchromatyczne użytych źródeł wyglądają następująco:

- Cree XP-E XPEPHR – Photo Red:

$$x_R = 0,7206; y_R = 0,2789$$

- ProLight 3W Power LED PK2N-3LGE-SD – Green:

$$x_G = 0,2286; y_G = 0,7216$$

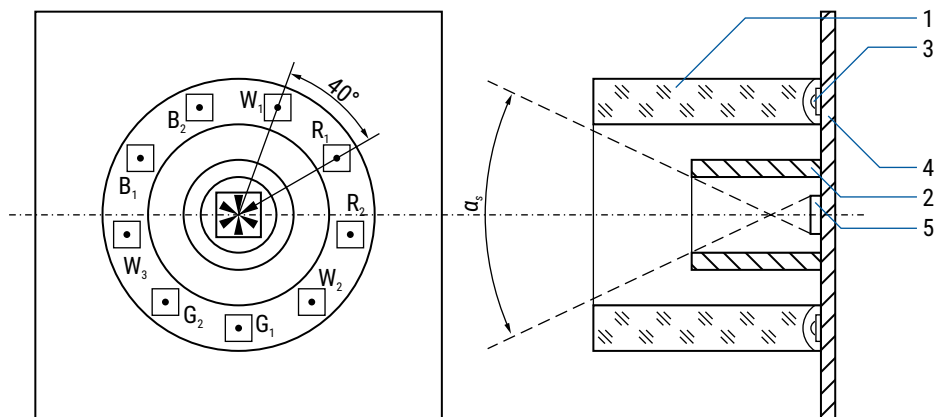
- Cree XP-C XPCBLU – Blue:

$$x_B = 0,1292; y_B = 0,0649$$

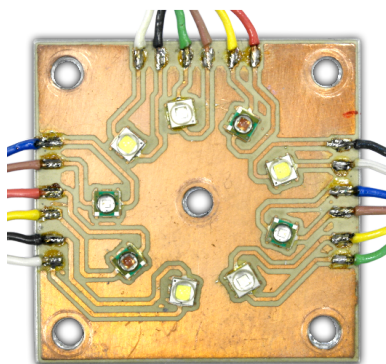
- Cree XP-G XPGBWT – Cool White:

$$x_W = 0,3293; y_W = 0,3557$$

Wybrane diody elektroluminescencyjne przylutowano do obwodu drukowanego o aluminiowym rdzeniu (MCPCB – Metal Core Printed Circuit Board). Rozmieszczenie LED-ów przedstawia rysunek 3.7. Zdjęcie skonstruowanego modułu LED pokazano na rysunku 3.8.

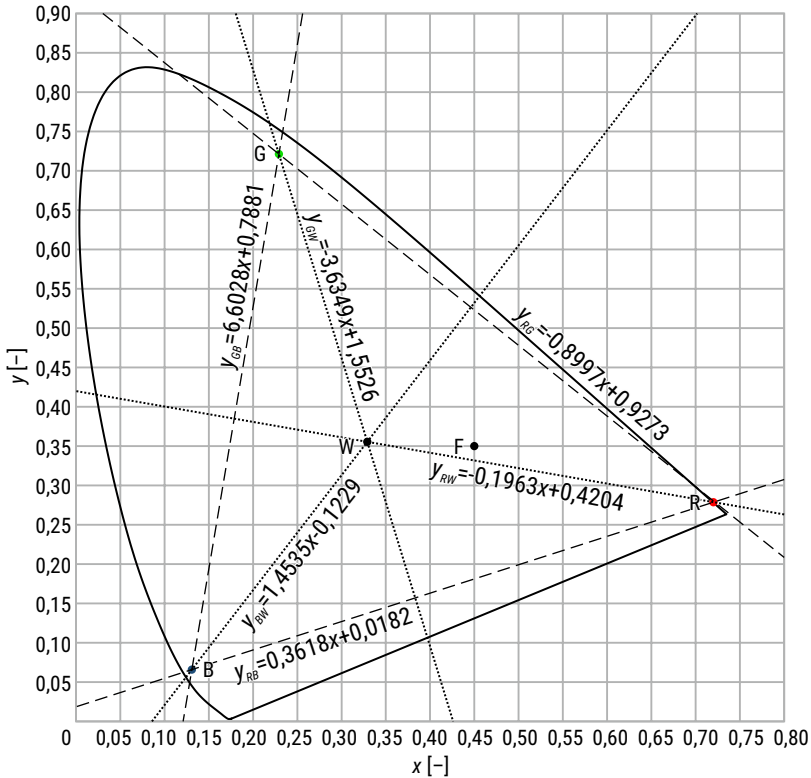


RYS. 3.7. Rozmieszczenie LED-ów na obwodzie drukowanym MCPCB – model oprawy oparty na czterech źródłach składowych R, G, B, W: 1 – tuleja wykonana z PMMA, 2 – osłona czujnika koloru, 3 – LED, 4 – płytki drukowane MCPCB, 5 – moduł z czujnikiem koloru



RYS. 3.8. Zdjęcie zmontowanego modułu LED – model oprawy o czterech składowych R, G, B, W

Położenie punktów chromatyczności wybranych źródeł składowych pokazano na rysunku 3.9. Na wykresie zaznaczono również położenie punktu chromatyczności wypadkowej mieszaniny F o współrzędnych tróchromatycznych x_F, y_F . Działanie algorytmu sterującego, wykorzystującego cztery składowe, wyjaśniono na podstawie addytywnego mieszania strumieni świetlnych źródeł R (x_R, y_R), G (x_G, y_G), B (x_B, y_B) oraz W (x_W, y_W) w celu uzyskania mieszaniny F (x_F, y_F) o strumieniu świetlnym Φ_F równym 100 lumenów.



RYS. 3.9. Zakres barw możliwych do zrealizowania przy użyciu wybranych składowych RGBW

Zgodnie z ideą wykorzystania czterech źródeł składowych, w celu poprawy ogólnego wskaźnika oddawania barw R_a , każda wypadkowa mieszanina F, której punkt chromatyczności leży wewnątrz trójkąta RGB musi być zrealizowana przez addytywne zmieszanie strumieni świetlnych wszystkich czterech źródeł. Jest to o tyle istotne, że wprowadzenie źródła achromatycznego W spowodowało podzielenie trójkąta RGB na trzy części – rysunek 3.9. Zgodnie z prawami addytywnego mieszania barw [16], [17] do stworzenia dowolnej mieszaniny leżącej w każdym z wewnętrznych trójkątów RGW, RBW lub GBW niezbędne są jedynie trzy składowe. Jako przykład rozpatrzeć można mieszaninę F z rysunku 3.9, która może być zrealizowana jako addytywna mieszanina strumieni świetlnych źródeł R, G oraz W, bez udziału składowej B.

Idea opracowanego algorytmu zakłada wykorzystanie trzech pośrednich źródeł składowych, będących w rzeczywistości addytywną mieszaniną strumienia światelnego źródła achromatycznego i strumieniami świetlnych dwóch źródeł monochromatycznych.

Pierwszym krokiem działania algorytmu jest sprawdzenie czy punkt chromatyczności mieszaniny F leży wewnątrz gamutu o wierzchołkach w punktach R (x_R, y_R), G (x_G, y_G) oraz B (x_B, y_B). Procedura ta realizowana jest analogicznie do opisanej w podrozdziale 3.2, w związku z tym ponowny opis tego procesu zostanie pominięty.

Kolejny etap rozpoczyna rozkład mieszaniny F (x_F, y_F) na pośrednie źródła składowe. Pierwszą operacją jaką należy wykonać jest wyznaczenie trzech prostych prostopadłych do krawędzi trójkąta RGB i przechodzących przez chromatyczności mieszaniny F (x_F, y_F).

Współczynnik kierunkowy $a_{P, RG}$ oraz wyraz wolny $b_{P, RG}$ prostej prostopadłej do boku RG oraz przechodzącej przez punkt F (x_F, y_F) mogą zostać wyznaczone na podstawie zależności:

$$\begin{aligned} a_{P, RG} &= -\frac{1}{a_{RG}} \\ b_{P, RG} &= y_F + \frac{x_F}{a_{RG}} \end{aligned} \quad (3.23)$$

gdzie:

$a_{P, RG}$ – współczynnik kierunkowy poszukiwanej prostej prostopadłej do boku RG,

$b_{P, RG}$ – wyraz wolny poszukiwanej prostej.

Ostatecznie, po wykonaniu operacji (3.23) dla wszystkich trzech boków trójkąta RGB, zależności opisujące poszukiwane proste przyjmą postać:

$$\begin{aligned} y_{P, RG} &= 1,1115x - 0,1502 \\ y_{P, RB} &= -2,1276x + 1,3074 \\ y_{P, GB} &= -0,1516x + 0,4182 \end{aligned} \quad (3.24)$$

gdzie:

$y_{P, RG}$ – prosta prostopadła do boku RG przechodząca przez punkt F,

$y_{P, RB}$ – prosta prostopadła do boku RB przechodząca przez punkt F,

$y_{P, GB}$ – prosta prostopadła do boku GB przechodząca przez punkt F.

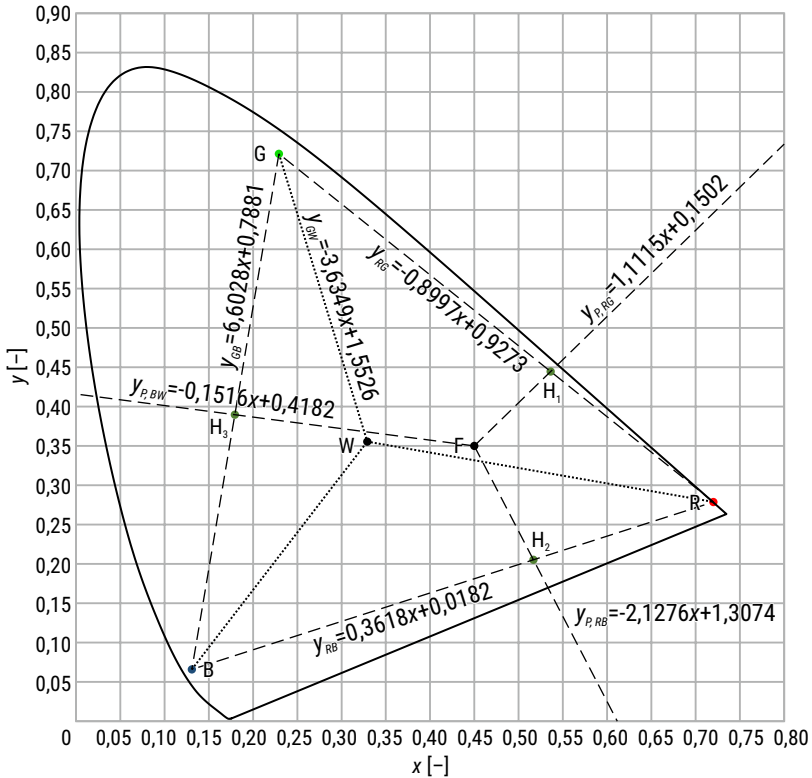
Graficznie pokazane zostało to na rysunku 3.10. Zgodnie z przyjętą koncepcją na tych prostych leżą punkty chromatyczności pośrednich źródeł składowych. Zwiększenie odległości pomiędzy punktami chromatyczności źródeł pośrednich a punktem o współrzędnych mieszaniny F poprawia stabilność parametrów

kolorymetrycznych uzyskanej mieszaniny. Na tej podstawie można uznać, że celowe jest zastosowanie źródeł pośrednich o współrzędnych w punktach $H_1 (x_{H1}, y_{H1})$, $H_2 (x_{H2}, y_{H2})$, $H_3 (x_{H3}, y_{H3})$, które w analizowanym przykładzie wynoszą:

$$x_{H1} = 0,5357; y_{H1} = 0,4453$$

$$x_{H2} = 0,5179; y_{H2} = 0,2056$$

$$x_{H3} = 0,1786; y_{H3} = 0,3911$$



RYS. 3.10. Proste prostopadłe do boków trójkąta RGB i przechodzących przez punkt F

Punkty te odpowiadają miejscom przecięcia boków trójkąta RGB z prostymi prostopadłymi $y_{P,RG}$, $y_{P,RB}$, $y_{P,GB}$. Jednak takie ustawienie spowoduje, że do stworzenia źródeł pośrednich nie zostanie użyte źródło achromatyczne W (x_W, y_W). Konieczne jest wprowadzenie dodatkowego kryterium, wymuszającego zastosowanie źródła W.

W rozpatrywanym przypadku kryterium tym jest sztuczne zmniejszenie gamutu barw – rysunek 3.11. Linie proste wyznaczające granice nowego gamutu barw są prostymi równoległymi oddalonymi o wartość $d_R = 0,05$ od pierwotnych boków trójkąta RGB. Parametry opisujące prostą równoległą od boku RG wyznaczono na podstawie zależności:

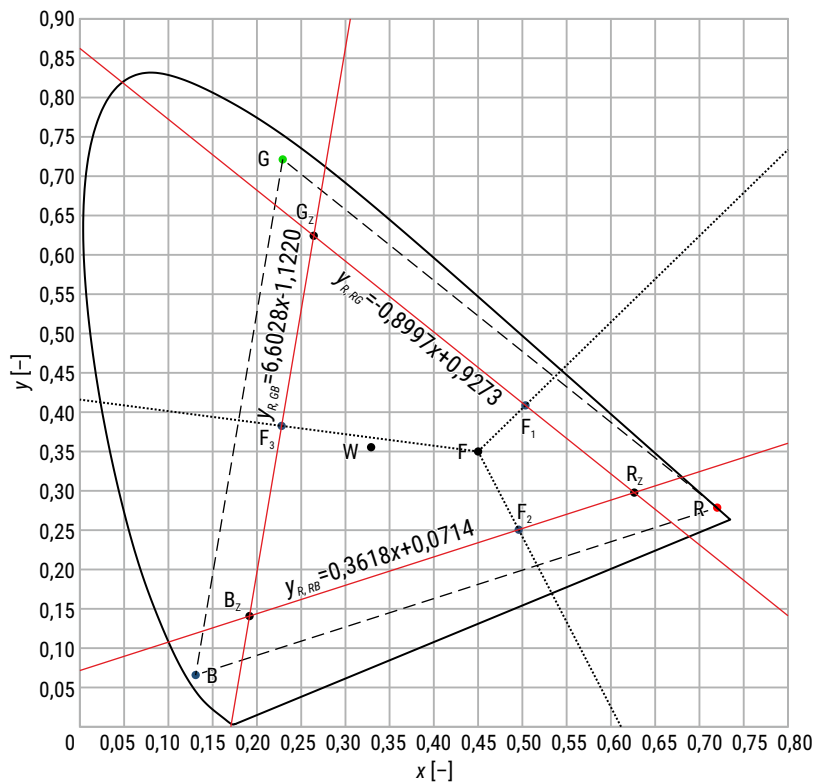
$$\begin{aligned} a_{R, RG} &= a_{RG} \\ b_{R, RG} &= b_{RG} - d_R \sqrt{1 + a_{RG}^2} \end{aligned} \quad (3.25)$$

gdzie:

$a_{R, RG}$ – współczynnik kierunkowy prostej równoległej do boku RG,

$b_{R, RG}$ – wyraz wolny prostej równoległej do boku RG,

d_R – odległość pomiędzy prostymi.



RYS. 3.11. Proste wyznaczające zmniejszony gamut oraz położenie punktów chromatyczności pośrednich źródeł składowych F_1 , F_2 oraz F_3

Obliczając współczynniki prostych równoległych do boków trójkąta otrzymano następujące równania opisujące te proste:

$$\begin{aligned} y_{R, RG} &= -0,8997x + 0,8608 \\ y_{R, RB} &= 0,3618x + 0,0714 \\ y_{R, GB} &= 6,6028x - 1,1220 \end{aligned} \quad (3.26)$$

gdzie:

$y_{R, RG}$ – prosta równoległa do boku RG,
 $y_{R, RB}$ – prosta równoległa do boku RB,
 $y_{R, GB}$ – prosta równoległa do boku GB.

Punkty przecięcia R_z , G_z oraz B_z wyznaczonych prostych stanowią wierzchołki zawężonego trójkąta barw:

$$\begin{aligned} x_{RZ} &= 0,6258; y_{RZ} = 0,2978 \\ x_{GZ} &= 0,1912; y_{GZ} = 0,1406 \\ x_{BZ} &= 0,2643; y_{BZ} = 0,6230 \end{aligned}$$

Punkty F_1 , F_2 oraz F_3 , stanowiące miejsca przecięć prostych prostopadłych oraz równoległych do odpowiednich boków trójkąta RGB, określają punkty chromatyczności pośrednich źródeł składowych. W analizowanym przykładzie przyjmują one następujące wartości:

$$\begin{aligned} x_{F1} &= 0,5027; y_{F1} = 0,4085 \\ x_{F2} &= 0,4965; y_{F2} = 0,2510 \\ x_{F3} &= 0,2280; y_{F3} = 0,3836 \end{aligned}$$

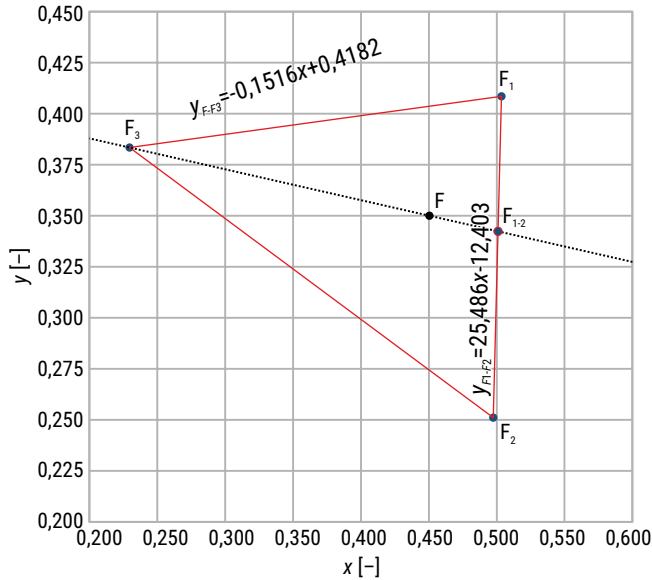
Współrzędne punktów przecięcia wszystkich rozpatrywanych prostych wyznaczono na podstawie zależności analogicznych do równań (3.10).

Bazując na trzech pośrednich źródłach składowych F_1 , F_2 oraz F_3 , dalsza procedura jest zbliżona do algorytmu opartego na źródłach R, G oraz B. Położenie obliczonych punktów chromatyczności F_1 , F_2 , F_3 pokazano na rysunku 3.12. Rozkład mieszaniny F na składowe pośrednie rozpoczyna wyznaczenie prostej y_{F-F3} przechodzącej przez punkty F oraz F_3 na podstawie zależności:

$$\begin{aligned} a_{F-F3} &= \frac{y_F - y_{F3}}{x_F - x_{F3}} \\ b_{F-F3} &= y_F - \frac{y_F - y_{F3}}{x_F - x_{F3}} \cdot x_F \end{aligned} \quad (3.27)$$

gdzie:

a_{F-F3} – współczynnik kierunkowy prostej y_{F-F3} ,
 b_{F-F3} – wyraz wolny prostej y_{F-F3} .



RYS. 3.12. Położenie punktów chromatyczności mieszaniny F oraz pośrednich źródeł składowych F_1, F_2, F_3

Następnie należy wykonać analogiczną operację, której efektem jest wyznaczenie prostej y_{F1-F2} przechodzącej przez punkty F_1 oraz F_2 . W analizowanym przypadku równania obu prostych y_{F-F3} oraz y_{F1-F2} przyjmą postać:

$$\begin{aligned} y_{F-F3} &= -0,1516x + 0,4182 \\ y_{F1-F2} &= 25,486x - 12,4030 \end{aligned} \quad (3.28)$$

W kolejnym kroku, bazując na równaniach (3.28), obliczane są współrzędne punktu F_{1-2} stanowiącego punkt przecięcia prostej y_{F-F3} z prostą y_{F1-F2} z zależności:

$$\begin{aligned} x_{F1-2} &= \frac{b_{F-F3} - b_{F1-F2}}{a_{F1-F2} - a_{F-F3}} \\ y_{F1-2} &= \frac{a_{F1-F2} \cdot b_{F-F3} - a_{F-F3} \cdot b_{F1-F2}}{a_{F1-F2} - a_{F-F3}} \end{aligned} \quad (3.29)$$

W rozpatrywanym przykładzie współrzędne punktu F_{1-2} wyniosły:

$$\begin{aligned} x_{F1-2} &= 0,5001 \\ y_{F1-2} &= 0,3424 \end{aligned}$$

Po wyznaczeniu położenia punktu F_{1-2} obliczyć należy moduły barw źródła F_3 oraz źródła o współrzędnych F_{1-2} :

$$\begin{aligned} h_{F_3} &= \sqrt{(x_{F_{1-2}} - x_F)^2 + (y_{F_{1-2}} - y_F)^2} \\ h_{F_{1-2}} &= \sqrt{(x_{F_3} - x_F)^2 + (y_{F_3} - y_F)^2} \end{aligned} \quad (3.30)$$

W przykładzie moduły h_{F_3} oraz $h_{F_{1-2}}$ wynoszą:

$$h_{F_3} = 0,0507$$

$$h_{F_{1-2}} = 0,2245$$

Natomiast ich suma:

$$h_F = 0,2752$$

Kolejnym krokiem jest określenie pośrednich strumieni świetlnych Φ'_{F_3} , $\Phi'_{F_{1-2}}$ oraz wskaźnika strumienia świetlnego Φ'_F mieszaniny F:

$$\begin{aligned} \Phi'_{F_3} &= h_{F_3} \cdot y_{F_3} \\ \Phi'_{F_{1-2}} &= h_{F_{1-2}} \cdot y_{F_{1-2}} \\ \Phi'_F &= h_F \cdot y_F = h_{F_3} + h_{F_{1-2}} \end{aligned} \quad (3.31)$$

W przedstawionym przykładzie wielkości te przyjęły wartości:

$$\Phi'_{F_3} = 0,0194$$

$$\Phi'_{F_{1-2}} = 0,0769$$

$$\Phi'_F = 0,0963$$

Na podstawie wartości wskaźnika strumienia świetlnego Φ'_F oraz wartości rzeczywistego strumienia świetlnego Φ_F obliczyć należy współczynnik skalowania k'_ϕ z zależności (3.16), w tym przypadku przyjmie on wartość:

$$k'_\phi = 1038,31$$

Parametr k'_ϕ w kolejnym kroku wykorzystano do wyznaczenia rzeczywistych strumieni świetlnych Φ_{F_3} oraz $\Phi_{F_{1-2}}$ na podstawie zależności analogicznych do równań (3.17). Ostatecznie strumienie świetlne Φ_{F_3} oraz $\Phi_{F_{1-2}}$ wyniosły:

$$\Phi_{F_3} = 20,2 \text{ [lm]}$$

$$\Phi_{F_{1-2}} = 79,8 \text{ [lm]}$$

Opisane powyżej operacje określania modułów barwy, pośrednich strumieni świetlnych oraz współczynnika skalowania należy powtórzyć przy rozkładzie na składowe F_1 oraz F_2 mieszaniny F_{1-2} . W tym przypadku moduły h_{F_1} i h_{F_2} przyjmą wartości:

$$\begin{aligned} h_{F_1} &= 0,0914 \\ h_{F_2} &= 0,0662 \end{aligned} \quad (3.32)$$

Natomiast ich suma:

$$h'_{F_{1-2}} = 0,1576 \quad (3.33)$$

Wartości pośrednich strumieni świetlnych wynoszą:

$$\begin{aligned} \Phi'_{F_2} &= 0,0166 \\ \Phi''_F &= 0,0540 \end{aligned}$$

Współczynnik skalujący k''_ϕ osiągnął:

$$k''_\phi = 1478,90$$

Rzeczywiste strumienie świetlne Φ_{F_1} oraz Φ_{F_2} przyjmują wartości:

$$\begin{aligned} \Phi_{F_1} &= 55,2 \text{ [lm]} \\ \Phi_{F_2} &= 24,6 \text{ [lm]} \end{aligned}$$

Ostatecznie można stwierdzić, że do stworzenia mieszaniny strumieni świetlnych o współrzędnych chromatycznych w punkcie F (x_F, y_F) i wypadkowym strumieniu świetlnym o wartości 100 lumenów należy addytywnie zmieszać strumienie świetlne pośrednich źródeł składowych: F_1 ($x_{F_1} = 0,5027; y_{F_1} = 0,4085$) o wartości $\Phi_{F_1} = 55,2$ lm, F_2 ($x_{F_2} = 0,4965; y_{F_2} = 0,2510$) o wartości $\Phi_{F_2} = 24,6$ lm oraz F_3 ($x_{F_3} = 0,2280; y_{F_3} = 0,3836$) o wartości $\Phi_{F_3} = 20,2$ lm.

W kolejnym etapie procedury każde z pośrednich źródeł składowych F_1, F_2 oraz F_3 rozkładane jest na strumienie świetlne użytych źródeł barwnych R (x_R, y_R), G (x_G, y_G), B (x_B, y_B) oraz źródła achromatycznego W (x_W, y_W). Odbywa się to zgodnie z procesem opartym na trzech źródłach barwnych. Jako przykład przedstawiono rozkład źródła F_1 na składowe R (x_R, y_R), G (x_G, y_G), oraz W (x_W, y_W). Położenie punktów chromatyczności rozpatrywanych źródeł pokazano na rysunku 3.13.

Prosta y_{W-F_1} przechodząca przez punkty chromatyczności źródła W (x_W, y_W) oraz źródła F_1 przecina prostą y_{RG} w punkcie F_{RG} . Współrzędne punktu F_{RG} obliczono na podstawie zależności analogicznej do równania (3.10), wyniosły one:

$$\begin{aligned} x_{RG} &= 0,5579 \\ y_{RG} &= 0,4254 \end{aligned}$$

Moduły barw h_W oraz h_{FRG} wyznaczone na podstawie długości odcinków F_1F_{RG} oraz F_1W wyniosły:

$$h_W = 0,0577$$

$$h_{FRG} = 0,1814$$

Suma modułów h_W oraz h_{FRG} :

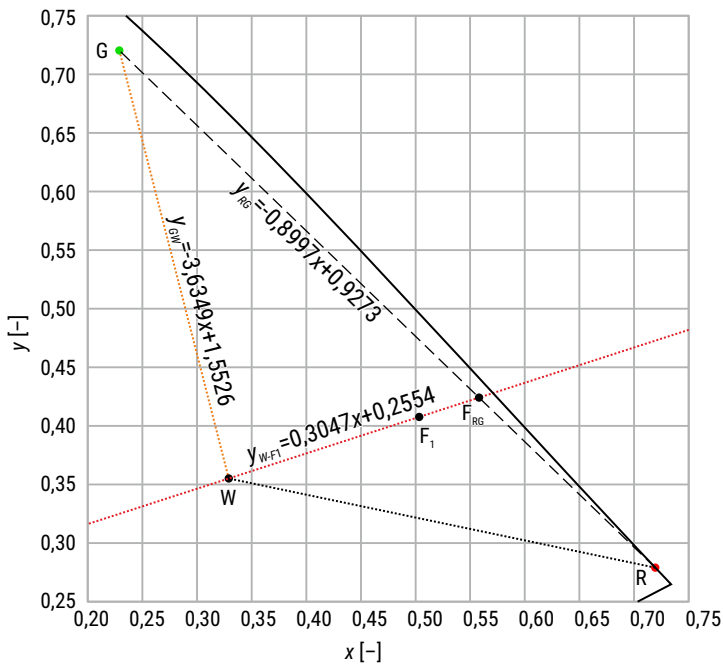
$$h'_{W-FRG} = 0,2390$$

Obliczone na tej podstawie wartości wskaźników strumieni świetlnych osiągnęły:

$$\Phi'_W = 0,0205$$

$$\Phi'_{FRG} = 0,0771$$

$$\Phi'_{F_1} = 0,0976$$



RYS. 3.13. Punkt F_{RG} w miejscu przecięcia prostych y_{W-F_1} oraz y_{RG}

Współczynnik skalujący k''_ϕ wynosi:

$$k''_\phi = 565,45$$

zaś rzeczywiste strumienie świetlne Φ_W oraz Φ_{FRG} :

$$\Phi_W = 11,6 \text{ [lm]}$$

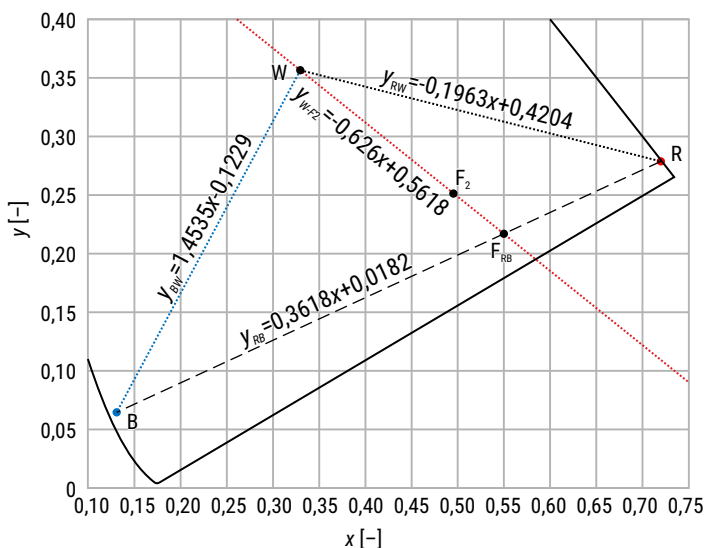
$$\Phi_{FRG} = 43,6 \text{ [lm]}$$

Rozkład mieszaniny o chromatyczności w punkcie F_{RG} na rzeczywiste strumienie świetlne Φ_R, Φ_G , składowych źródeł $R(x_R, y_R), G(x_G, y_G)$ daje wynik:

$$\Phi_R = 19,1 \text{ [lm]}$$

$$\Phi_G = 24,5 \text{ [lm]}$$

Opisana procedura powtarzana jest w przypadku pośredniego źródła składowego F_2 będącego mieszaniną źródeł $R(x_R, y_R), B(x_B, y_B)$ i $W(x_W, y_W)$ – rysunek 3.14 oraz źródła F_3 stanowiącego mieszaninę strumieni świetlnych źródeł $G(x_G, y_G), B(x_B, y_B)$ i $W(x_W, y_W)$ – rysunek 3.15.



RYS. 3.14. Punkt F_{RB} w miejscu przecięcia prostych y_{W-F_2} oraz y_{RB}

Współrzędne punktu F_{RB} wyniosły:

$$x_{RB} = 0,5503$$

$$y_{RB} = 0,2173$$

Moduły barw h_W oraz h_{FRB} oraz wartości pośrednich strumieni świetlnych osiągnęły:

$$h_W = 0,0635$$

$$h_{FRB} = 0,1973$$

$$h_{F_2} = 0,2608$$

$$\Phi_W = 0,0226$$

$$\Phi'_{FRB} = 0,0429$$

$$\Phi'_{F_2} = 0,0655$$

Współczynnik skalujący przyjął wartość:

$$k'_\phi = 375,83$$

Natomiast rzeczywiste strumienie świetlne Φ_W oraz Φ_{FRB} :

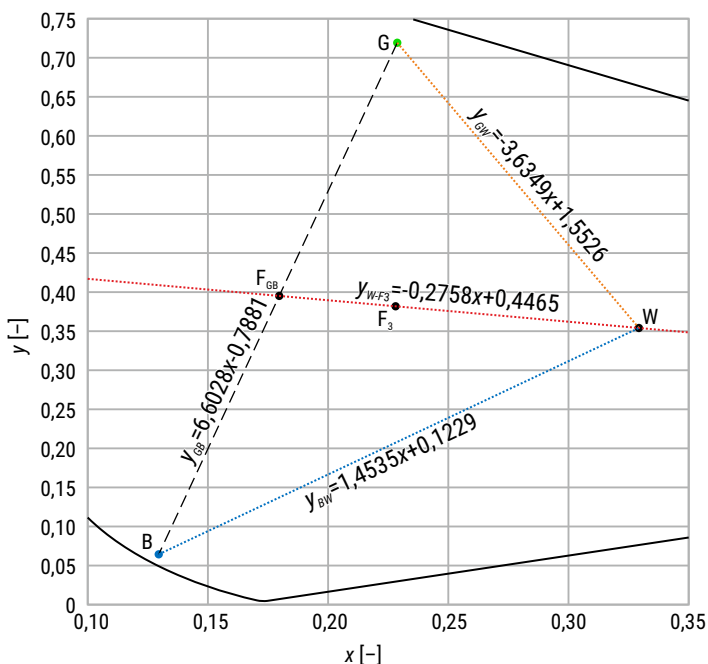
$$\Phi_W = 8,5 \text{ [lm]}$$

$$\Phi_{FRG} = 16,1 \text{ [lm]}$$

Strumienie świetlne Φ_R i Φ_B wchodzące w skład mieszaniny o strumieniu Φ_{FRB} wyniosły:

$$\Phi_R = 14,7 \text{ [lm]}$$

$$\Phi_B = 1,4 \text{ [lm]}$$



RYS. 3.15. Punkt F_{GB} w miejscu przecięcia prostych y_{W-F3} oraz y_{GB}

Współrzędne punktu F_{GB} wyniosły:

$$x_{GB} = 0,1795$$

$$y_{GB} = 0,3970$$

Moduły barw h_W oraz h_{FGB} oraz wartości pośrednich strumieni świetlnych osiągnęły:

$$h_W = 0,0504$$

$$h_{FGB} = 0,1554$$

$$h_{F3} = 0,2058$$

$$\Phi'_W = 0,0179$$

$$\Phi'_{FGB} = 0,0617$$

$$\Phi'_{F3} = 0,0791$$

Współczynnik skalujący przyjął wartość:

$$k'_\phi = 253,75$$

Natomiast rzeczywiste strumienie świetlne Φ_W oraz Φ_{FRB} :

$$\Phi_W = 4,5 \text{ [lm]}$$

$$\Phi_{FGB} = 15,7 \text{ [lm]}$$

Strumienie świetlne Φ_G i Φ_B wchodzące w skład mieszaniny o strumieniu Φ_{FGB} wyniosły:

$$\Phi_G = 14,4 \text{ [lm]}$$

$$\Phi_B = 1,3 \text{ [lm]}$$

Podsumowanie

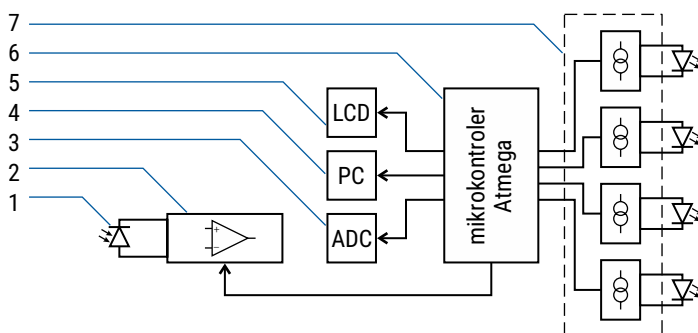
W rozdziale trzecim opisano algorytmy addytywnego mieszania strumieni świetlnych emitowanych przez różne źródła LED. W obu opisanych przypadkach celem było uzyskanie mieszaniny o zadanym wypadkowym strumieniu świetlnym Φ_F oraz określonych współrzędnych trójchromatycznych (x_F , y_F). Pierwszy z zaproponowanych algorytmów bazuje na trzech barwnych źródłach składowych: o barwie czerwonej R, zielonej G oraz niebieskiej B, wybranych na podstawie wyników z poprzedniego etapu prac. Źródłami tymi są diody świecące: Cree XP-E XPEPHR – Photo Red, ProLight 3W Power LED PK2N-3LGE-SD – Green oraz Cree XP-C XPCBLU – Blue. W przypadku drugiego rozwiązania model oprawy LED poza wymienionymi źródłami emitującymi promieniowanie barwne, wyposażono dodatkowo w źródło achromatyczne, którym była dioda Cree XP-G XPGBWT – Cool White. Wprowadzenie dodatkowego źródła emitującego światło białe miało na celu poprawę ogólnego wskaźnika oddawania barw R_a mieszaniny wypadkowej, co zostało zweryfikowane w czasie badań laboratoryjnych opisanych w kolejnym rozdziale pracy.

Opracowane algorytmy addytywnego mieszania barw zaprezentowano w sposób graficzny na płaszczyźnie jednostkowej układu kolorymetrycznego CIE XYZ 1931 oraz w sposób analityczny.

4. Badania opracowanych modeli oprawy LED

4.1. Układy sterowania modelu oprawy LED

W celu sprawdzenia poprawności działania modeli oprawy LED opracowano elektroniczny układ sterujący Jego uproszczony schemat pokazano na rysunku 4.1.

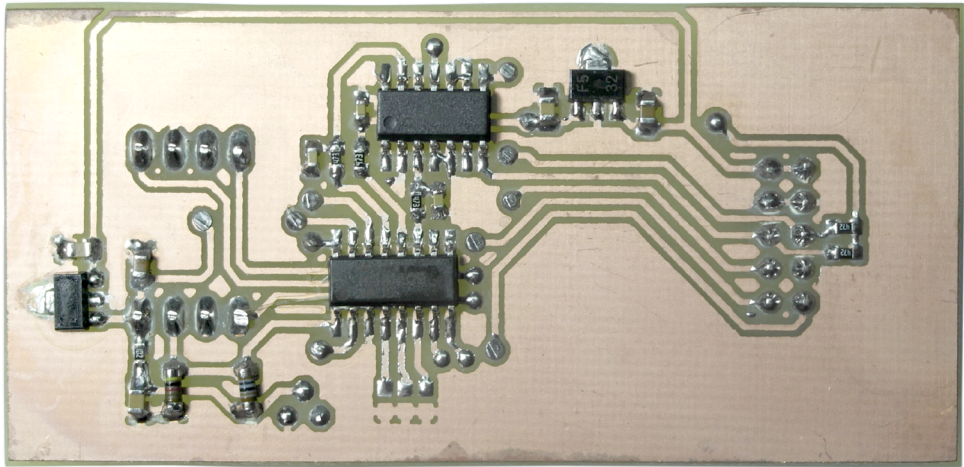


RYS. 4.1. Uproszczony schemat układu elektronicznego sterującego modelem oprawy LED: 1 – układ MTCSiCS, 2 – blok wzmacniaczy transimpedancyjnych, 3 – przetwornik analogowo-cyfrowy, 4 – komputer PC, 5 – wyświetlacz LCD, 6 – układ sterujący, 7 – moduł źródeł prądowych z podłączonymi diodami elektroluminescencyjnymi

W układzie tym zastosowano ośmiobitowy mikrokontroler AVR Atmega8 produkcji firmy Atmel [30]. Zaimplementowano w nim procedury konwersji danych ze scalonego czujnika koloru MTCiCS [27] oraz algorytmy sterowania poszczególnymi źródłami składowymi LED przy użyciu impulsowych źródeł prądowych MBI6651 [31].

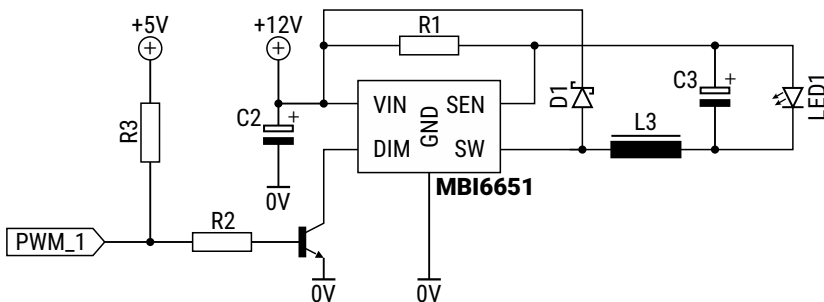
Sygnały z czujnika koloru po przejściu przez wzmacniacze transimpedancyjne MTI04 [29] przetwarzane są w 18-bitowym przetworniku analogowo-cyfrowym MCP3424 [33], połączonym magistralą I²C [32], z mikrokontrolerem – rysunek 4.2. Maksymalny zakres pomiarowy zastosowanego przetwornika to 2,048 V. Mikrokontroler automatycznie zmniejsza poziom wzmocnienia układu MTI04 w momencie, gdy zmierzone napięcie przekroczy poziom 2,000 V. Zapobiega to przesterowaniu całego toru pomiarowego.

Zdjęcie opracowanego modułu toru pomiarowego przedstawiono na rysunku 4.3.



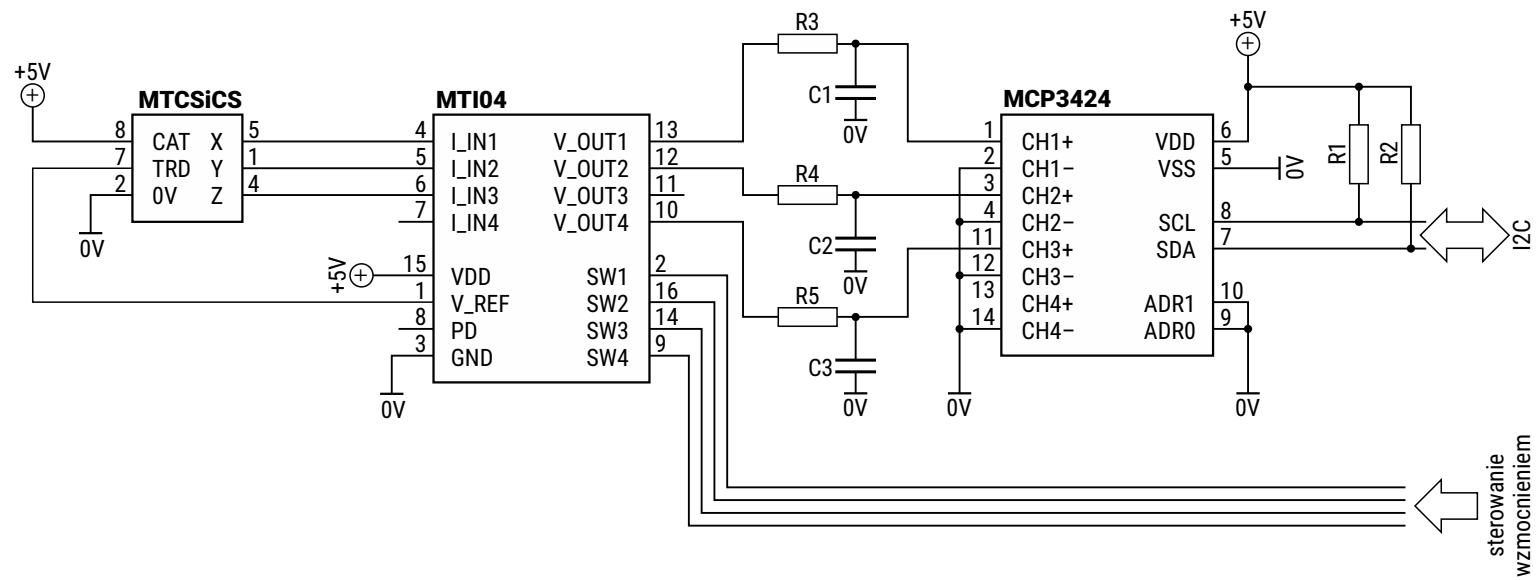
RYS. 4.3. Zdjęcie skonstruowanego toru pomiarowego czujnika MTCSiCS

W zaproponowanym rozwiązaniu modelu oprawy LED, elementami sterującymi źródłami składowymi LED są impulsowe źródła prądowe bazujące na układach MBI6651 [31] produkcji firmy Macroblock. Schemat pojedynczego źródła prądowego pokazano na rysunku 4.4.

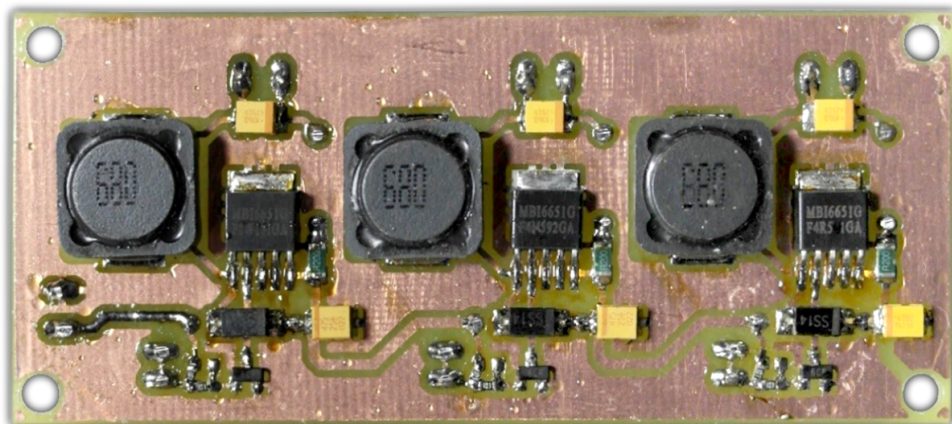


RYS. 4.4. Schemat pojedynczego źródła prądowego zastosowanego w modelu oprawy LED

W zależności od liczby składowych w opracowanych modelach wykorzystywano trzy (model oparty na składowych RGB) lub cztery (model oparty na składowych RGBW) niezależnie sterowane źródła prądowe. Zdjęcia zmontowanych źródeł prądowych pokazano na rysunku 4.5.

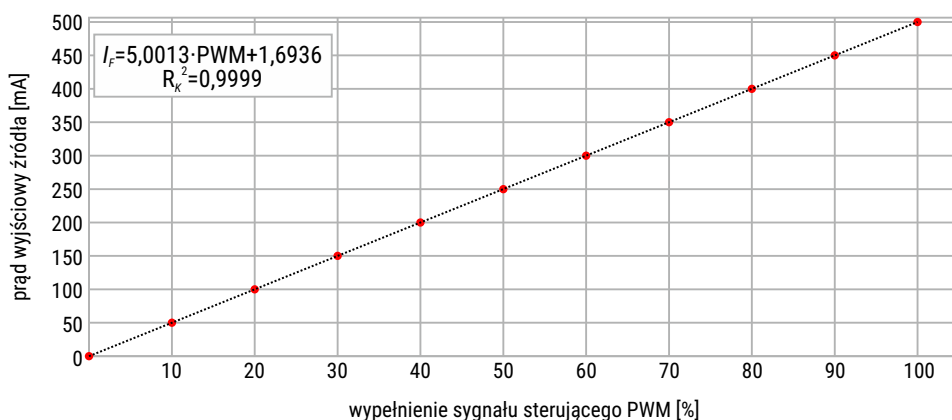


RYS. 4.2. Schemat połączenia toru pomiarowego czujnika MTCiCS mikrokontrolerem sterującym modelem oprawy LED



RYS. 4.5. Zdjęcie zaprojektowanych źródeł prądowych wykorzystanych w modelu oprawy LED

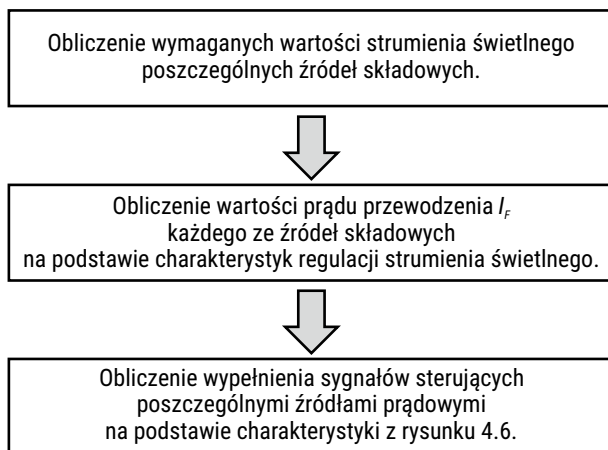
Jak widać na schemacie (rysunek 4.4) układ MBI6651 sterowany jest sygnałem prostokątnym o regulowanym wypełnieniu (PWM – Pulse-Width Modulation). Zgodnie z danymi producenta [31] oraz przeprowadzonymi testami prąd wyjściowy źródła zmienia się liniowo w zależności od stopnia wypełnienia sygnału sterującego. Wyznaczoną charakterystykę pojedynczego źródła prądowego pokazano na wykresie na rysunku 4.6.



RYS. 4.6. Charakterystyka wyjściowa pojedynczego źródła MBI6651 o maksymalnym prądzie wyjściowym 500 mA

Biorąc pod uwagę, że wynikiem opisanych w poprzednim rozdziale algorytmów sterowania modelem oprawy LED są wartości strumienia świetlnego Φ poszczególnych źródeł składowych, a zastosowane źródła prądowe sterowane są sygnałem PWM, należy powiązać ze sobą powyższe parametry. Do tego celu wykorzystano, opisane

w pierwszym rozdziale, zależności strumienia świetlnego poszczególnych LED-ów w funkcji prądu zasilającego oraz wyznaczoną charakterystykę wyjściową źródła MBI6651. Algorytm działania pokazano na rysunku 4.7.



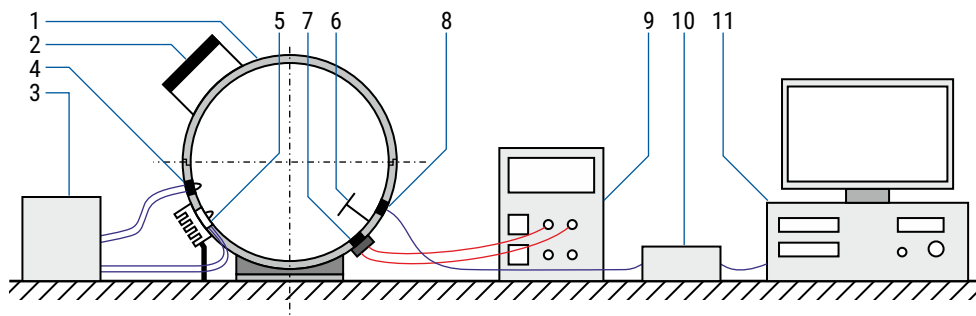
RYS. 4.7. Algorytm obliczania wypełnienia sygnałów sterujących źródłami prądowymi w zależności od strumienia świetlnego źródeł składowych

Przygotowany w ten sposób model oprawy wyposażony w elektroniczny układ sterujący z zaimplementowanymi procedurami określania temperatury barwowej najbliższej T_{bn} analizowanego promieniowania oraz zaadaptowanymi algorytmami obliczania sygnałów sterujących poszczególnymi źródłami składowymi poddano badaniom w warunkach laboratoryjnych. Otrzymane wyniki przedstawiono w kolejnych częściach pracy.

4.2. Badania oprawy z modułem RGB

Badania opracowanych modeli opraw oświetleniowych ze źródłami półprzewodnikowymi przeprowadzono wykorzystując stanowisko pomiarowe, którego schematyczną budowę pokazano na rysunku 4.8.

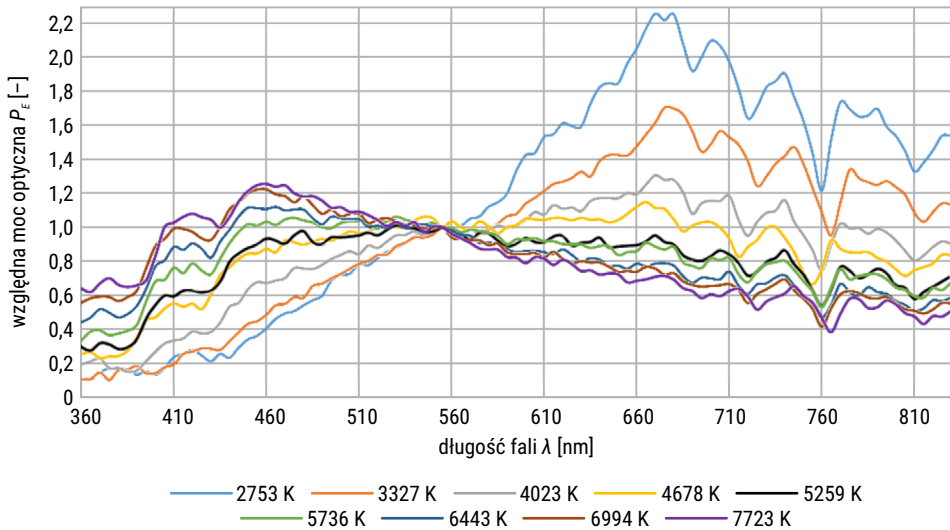
Badania podzielono na dwie części. Pierwsza polegała na sprawdzeniu stabilizacji poziomu natężenia oświetlenia E na powierzchni referencyjnej stanowiącej wewnętrzną powierzchnię kuli całkującej przy stałej wartości temperatury barwowej światła dziennego. Natomiast w drugiej części badań sprawdzono reakcję układu na zmianę temperatury barwowej światła dziennego przy stałej wartości natężenia oświetlenia wywołanego światłem dziennym.



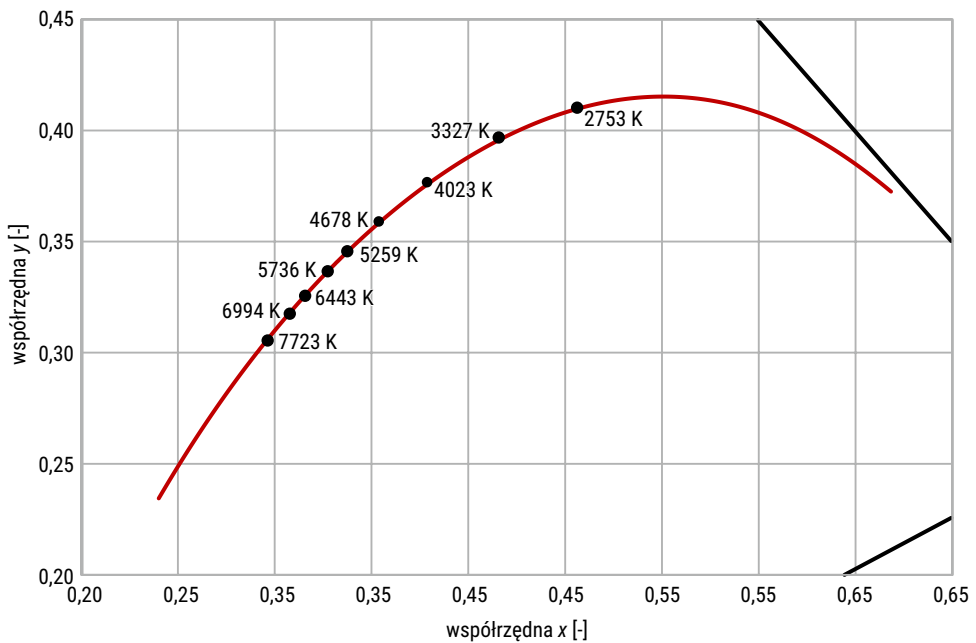
RYS. 4.8. Schematyczna budowa stanowiska pomiarowego wykorzystanego do badań opracowanego modelu oprawy LED: 1 – kula całkująca, 2 – regulowana przesłona, 3 – układ elektroniczny, 4 – czujnik MTCSiCS, 5 – moduł LED, 6 – przesłona, 7 – głowica luksomierza L-100, 8 – światłowód z nasadką kosinusową, 9 – luksomierz, 10 – spektrometr CCD, 11 – komputer PC

Zgodnie z założeniami pracy, zaprojektowany model oprawy LED miał za zadanie doświetlać powierzchnię referencyjną wstępnie oświetloną światłem dziennym. Z tego też powodu opracowane stanowisko testowe umieszczono przy oknie w jednej z pracowni Wydziału Elektrycznego Politechniki Białostockiej. Jak przedstawiono na rysunku 4.8, jeden z otworów kuli całkującej służył do wprowadzania strumienia świetlnego światła dziennego do jej wnętrza. Regulowana przesłona umieszczona przed otworem pozwalała na zmianę jego wartości, a tym samym zmianę wartości natężenia oświetlenia E na wewnętrznej powierzchni kuli całkującej. Pomiar natężenia oświetlenia realizowany był przy użyciu zastosowanego czujnika koloru MTCSiCS na podstawie wartości sygnału z kanału Y (po przeprowadzeniu transformacji zgodnie z procedurą opisaną w drugim rozdziale, dotyczącym scalonych czujników barwy).

W celu sprawdzenia jakości stabilizacji natężenia oświetlenia E przy różnych temperaturach barwowych światła dziennego pomiary wykonano o różnych porach roku oraz o różnych godzinach. Na rysunku 4.9 przedstawiono względne charakterystyki widmowe promieniowania dziennego, przy którym przeprowadzono badania skonstruowanych modeli opraw oświetleniowych LED. Na podstawie otrzymanych względnych rozkładów spektralnych obliczono współrzędne trójchromatyczne promieniowania oraz wartości temperatury barwowej T_b . Otrzymane wyniki pokazano na rysunku 4.10. Pomiary charakterystyk widmowych wykonano przy użyciu spektrometru StellarNET Black-Comet, a otrzymane wyniki przemnożono przez współczynnik kalibracyjny $k(\lambda)$, analogicznie jak to miało miejsce przy wyznaczaniu względnych charakterystyk widmowych promieniowania emitowanego przez wybrane LED-y.



RYS. 4.9. Względne charakterystyki widmowe promieniowania dziennego, przy którym przeprowadzono badania skonstruowanych modeli opraw LED



RYS. 4.10. Współrzędne trójchromatyczne promieniowania przy którym przeprowadzono badania opracowanych modeli opraw oświetleniowych

Pierwszym modelem oprawy LED, który poddano testom był układ bazujący na trzech barwnych źródłach składowych. Wyniki pomiarów z pierwszej części badań, dotyczącej stabilizacji natężenia oświetlenia E na powierzchni roboczej, zestawiono w tabeli 4.1. Zadaniem układu było utrzymanie wartości natężenia oświetlenia na wewnętrznej powierzchni kuli całkującej na poziomie 300 lx. Wartość natężenia oświetlenia mierzono przy użyciu luksomierza L-100, natomiast bazowe natężenie oświetlenia E_b wywołane światłem dziennym regulowano poprzez zmianę szerokość przesłony (element 2 – rysunek 4.8) w zakresie od 50 lx do 250 lx.

TABELA 4.1. Wyniki pomiarów stabilizacji natężenia oświetlenia E przy różnych wartościach temperatury barwowej T_b światła dziennego

bazowe natężenie oświetlenia E_b [lx]	temperatura barwowa światła dziennego T_b [K]								
	2753	3327	4023	4678	5259	5736	6443	6994	7723
	natężenie oświetlenia E [lx]								
50	287,0	291,0	310,1	303,2	315,1	314,5	307,2	310,5	303,5
100	298,5	296,1	304,5	313,5	306,5	312,0	304,5	312,5	308,0
150	303,5	310,5	307,5	315,5	304,1	308,5	30,12	311,5	305,5
200	310,5	309,0	304,5	315,5	311,9	316,2	309,5	317,1	314,5
250	321,0	324,5	316,0	314,5	325,1	324,2	317,5	319,5	324,5

Wyniki przedstawione w tabeli 4.1 są średnimi arytmetycznymi z serii 10 pomiarów. Analizując otrzymane wyniki można zauważyć, że niemal we wszystkich przypadkach zadana wartość 300 lx została przekroczona. Jedyne przy temperaturze barwowej 2753 K oraz 3327 K układ nie był w stanie odpowiednio wysterować modelu oprawy. Dalsza analiza pracy sterownika wyjaśniła co było tego przyczyną. W przypadku niskich wartości temperatury barwowej T_b w wyjściowym strumieniu świetlnym oprawy Φ_{out} znaczną część stanowi strumień świetlny emitowany przez diody Cree XP-E Photo Red. Jak przedstawiono na rysunku 1.49 strumień świetlny tego modelu diody przy nominalnym prądzie przewodzenia I_F równym 350 mA wynosi jedynie 31 lm. Jest to zbyt niska wartość, aby uzyskać, w użytym stanowisku badawczym, wymagany poziom natężenia oświetlenia. W pozostałych przypadkach przekroczono zadany próg, jednak w najgorszym przypadku powierzchnia została prześwietlona jedynie o 25,1 lx, co stanowi 8,3% zadanej wartości.

W tabeli 4.2 przedstawiono wartości strumienia świetlnego Φ_{out} emitowanego przez model oprawy oświetleniowej LED niezbędnego do osiągnięcia wymaganego poziomu natężenia oświetlenia E .

TABELA 4.2. Wartość wyjściowego strumienia świetlnego Φ_{out} emitowanego przez model oprawy LED RGB przy różnych wartościach temperatury barwowej T_b światła dziennego

bazowe natężenie oświetlenia E_b [lx]	temperatura barwowa światła dziennego T_b [K]								
	2753	3327	4023	4678	5259	5736	6443	6994	7723
	wyjściowy strumień świetlny oprawy LED Φ_{out} [lm]								
50	84,6	86,1	92,9	90,4	94,6	94,5	91,8	93,0	90,5
100	70,9	70,0	73,0	76,3	73,8	75,7	73,0	75,9	74,3
150	54,8	57,3	56,3	59,1	55,0	56,6	54,3	57,7	55,5
200	39,5	38,9	37,3	41,3	40,0	41,4	39,1	41,8	40,9
250	25,4	26,6	23,6	23,0	26,8	26,4	24,1	24,8	26,6

Wyniki z tabeli 4.2 pokazują, że układ sterujący modelem oprawy LED zmniejsza wyjściowy strumień świetlny wraz ze wzrostem wartości bazowego natężenia oświetlenia E_b – zachowuje się więc zgodnie z założeniami projektu. Analizując wyniki uzyskane przy stałym natężeniu oświetlenia E_b oraz różnych wartościach temperatury barwowej T_b , można zauważyć, że nie wpływa ona znacząco na wynik pomiaru natężenia oświetlenia. Tym samym można stwierdzić, że układ w zadowalającym stopniu spełnia wymagania dotyczące stabilizacji natężenia oświetlenia na powierzchni roboczej.

W czasie badań laboratoryjnych przeprowadzano również pomiar napięcia przewodzenia U_F oraz prądu przewodzenia I_F poszczególnych diod. Na podstawie tych wielkości określono moc modułu LED. Otrzymane wyniki zestawiono w tabeli 4.3.

TABELA 4.3. Moc modułu LED P [W] w zależności od poziomu bazowego natężenia oświetlenia E_b oraz temperatury barwowej T_b światła dziennego

bazowe natężenie oświetlenia E_b [lx]	temperatura barwowa światła dziennego T_b [K]								
	2753	3327	4023	4678	5259	5736	6443	6994	7723
	moc modułu LED P [W]								
50	1,18	1,2	1,34	1,31	1,41	1,42	1,39	1,43	1,41
100	0,95	0,92	0,98	1,05	1,02	1,06	1,03	1,09	1,09
150	0,69	0,72	0,7	0,76	0,7	0,73	0,71	0,77	0,75
200	0,47	0,45	0,43	0,49	0,48	0,5	0,47	0,52	0,51
250	0,28	0,29	0,25	0,25	0,3	0,29	0,27	0,28	0,31

Obliczone wartości mocy P modułu LED oraz wartości wyjściowego strumienia świetlnego Φ_{out} emitowanego przez model oprawy oświetleniowej LED, wykorzystano do określenia skuteczności świetlnej η samego modułu LED. Wyniki przedstawiono w tabeli 4.4. W opracowanym modelu o trzech barwach składowych najniższą

skuteczność świetlną ($\eta=64,2$ lm/W) uzyskano w przypadku T_{bn} wynoszącej 7723 K oraz strumieniu świetlnym 90,5 lm. Wartość maksymalną ($\eta=94,3$ lm/W) osiągnięto przy $T_{bn}=4023$ K i strumieniu świetlnym $\Phi_{out}=23,6$ lm.

TABELA 4.4. Wartość skuteczności świetlnej modułu LED η [lm/W]

bazowe natężenie oświetlenia E_b [lx]	temperatura barwowa światła dziennego T_b [K]								
	2753	3327	4023	4678	5259	5736	6443	6994	7723
	skuteczność świetlna modułu LED η [lm/W]								
50	71,7	71,7	69,3	69,0	67,1	66,5	66,0	65,1	64,2
100	74,6	76,1	74,5	72,6	72,3	71,4	70,9	69,6	68,2
150	79,5	79,6	80,4	77,8	78,6	77,5	76,5	74,9	74,0
200	84,0	86,5	86,8	84,2	83,3	82,9	83,2	80,4	80,2
250	90,6	91,7	94,3	92,1	89,3	91,1	89,3	88,6	85,8

Dalsza analiza wyników skuteczności świetlnej η pozwala zauważyć, że jej wartość wzrasta wraz ze zmniejszaniem wartości mocy elektrycznej dostarczanej do modułu LED. Wyjaśnieniem tego zjawiska jest fakt, że zmniejszanie mocy elektrycznej P powoduje obniżenie temperatury złącza pn diody, co przekłada się na wzrost sprawności [20], [21] całego modułu.

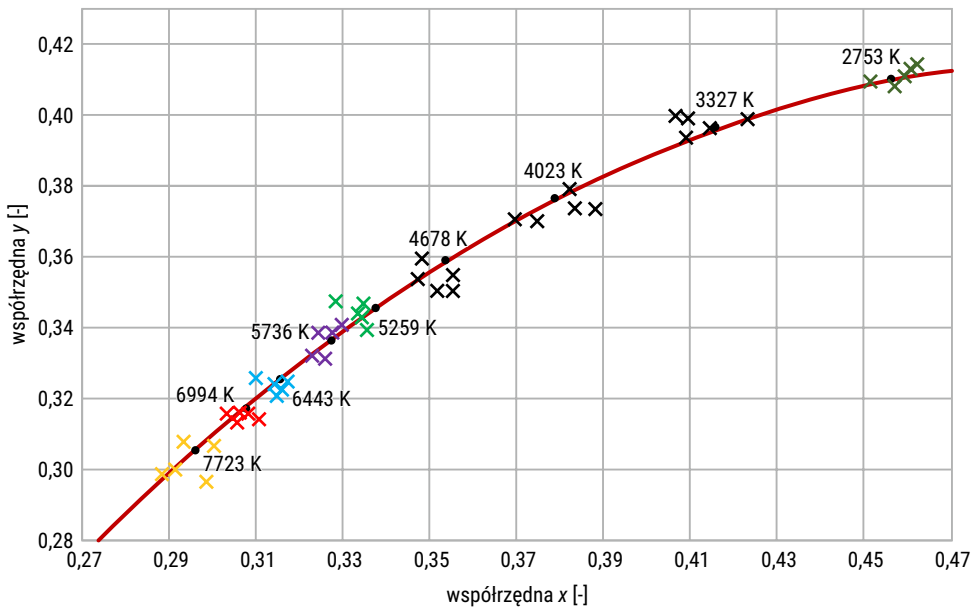
TABELA 4.5. Temperatura barwowa najbliższa promieniowania emitowanego przez model oprawy LED przy różnych wartościach bazowego natężenia oświetlenia E_b

temperatura barwowa światła dziennego T_b [K]	bazowe natężenie oświetlenia E_b [lx]				
	50	100	150	200	250
	wyniki pomiarów temperatury barwowej najbliższej T_{bn} [K]				
2753	2723	2698	2810	2707	2701
3327	3444	3540	3351	3203	3473
4023	4106	4268	3764	3969	3892
4678	4743	4601	4919	4924	4632
5259	5414	5450	5395	5666	5357
5736	5715	5602	5941	5809	5864
6443	6279	6455	6360	6438	6664
6994	6885	7063	7194	6733	6997
7723	7548	8425	8048	7911	8710

Porównując wyznaczone wartości skuteczności świetlnej zaprojektowanego modułu LED z wartościami skuteczności świetlnej η innych nowoczesnych źródeł półprzewodnikowych emitujących światło białe można stwierdzić, że uzyskane wartości

nie są wysokie. Na względzie należy mieć jednak fakt, że standardowe źródła LED nie mają możliwości zmiany temperatury barwowej najbliższej T_{bn} emitowanego promieniowania.

Druga część badań dotyczyła sprawdzenia reakcji układu na zmianę temperatury barwowej światła dziennego T_b przy stałej wartości natężenia oświetlenia wywołanego światłem dziennym E_b . Wartość bazowego natężenia oświetlenia E_b regulowano szerokością przesłony na wejściu kuli całkującej (element 2 – rysunek 4.8). Otrzymane wyniki pomiarów zebrano w tabeli 4.5 oraz przedstawiono w postaci graficznej na rysunku 4.11.



RYS. 4.11. Współrzędne trójchromatyczne promieniowania emitowanego przez opracowany model oprawy LED z trzema barwami składowymi

Porównując otrzymane wyniki ze zmierzoną wartością temperatury barwowej światła dziennego T_b widać, że układ reaguje na jej zmiany zgodnie z założeniami projektu. Niemniej jednak widoczne są różnice pomiędzy wartością docelową a wartością temperatury barwowej najbliższej T_{bn} emitowanej przez sam model oprawy. Spowodowane jest to kilkoma czynnikami. Po pierwsze, zastosowany w układzie scalony czujnik barwy MTCSiCS oraz jego tor pomiarowy charakteryzują się określoną dokładnością. Odebrane przez mikrokontroler sterujący dane są następnie wykorzystywane do obliczenia parametrów mieszaniny wyjściowej, które obarczone są błędem wynikającym z zaokrągleń wyników obliczeń. Po drugie, źródła prądowe sterowane są sygnałem o regulowanej szerokości impulsu PWM o rozdzielczości ośmiu bitów, co daje regulację wartości prądu I_F z krokiem około 2 mA. Przekłada się to następnie na rozdzielczość, z jaką można regulować strumień świetlny Φ_i poszczególnych diod

świejących. Wszystkie wymienione czynniki powodują, że współrzędne trójchromatyczne wyjściowego strumienia świetlnego Φ_{out} modelu oprawy LED nie pokrywają się idealnie ze współrzędnymi promieniowania dziennego.

W celu określenia czy zaprojektowany układ spełnił postawione przed nim zadanie dotyczące regulacji temperatury barwowej najbliższej T_{bn} oparto się na wytycznych normy ANSI C78.377-2011 [10]. Zawarto w niej, między innymi informacje mówiące o dopuszczalnej tolerancji temperatury barwowej najbliższej emitowanego przez diody promieniowania, tak aby móc je sklasyfikować do odpowiedniej grupy źródeł. Wymagania te przedstawiono w tabeli 4.6.

TABELA 4.6. Tolerancja określania temperatury barwowej najbliższej T_{bn} zgodnie z wytycznymi normy ANSI C78.377-2011 [10]

temperatura barwowa najbliższa T_{bn} [K]	dopuszczalna tolerancja [K]
2700	±145 K
3000	±175 K
3500	±245 K
4000	±275 K
4500	±243 K
5000	±283 K
5700	±355 K
6500	±510 K

Na podstawie informacji zawartych w tabeli 4.6 można zauważyć, że wraz ze wzrostem wartości temperatury barwowej najbliższej T_{bn} rozszerza się próg tolerancji. Różnice pomiędzy temperaturą barwową promieniowania dziennego T_b a temperaturą barwową najbliższą T_{bn} promieniowania emitowanego przez model oprawy LED zestawiono w tabeli 4.7. W większości wariantów warunki tolerancji przedstawione w tabeli 4.6 zostały spełnione. Jednak w ostatnim przypadku, dotyczącym temperatury barwowej T_b równej 7723 K widoczne są znaczne różnice pomiędzy wartością wymaganą a uzyskaną. W normie [10] nie ujęto tak wysokiej temperatury barwowej, jednak przyjmując trend zwiększania tolerancji wraz ze wzrostem temperatury barwowej można przyjąć, że i w tym przypadku mieści się on w granicach tolerancji.

W czasie tego etapu badań wyznaczono również wartość ogólnego wskaźnika oddawania barw R_a we wszystkich analizowanych wariantach warunków oświetleniowych. Otrzymane wyniki zebrano w tabeli 4.8. Ich analiza pozwala stwierdzić, że we wszystkich rozpatrywanych przypadkach wartość wskaźnika R_a osiągnęła niezadowalającą wartość. Przyjmując, że praca dotyczy oprawy wewnętrznej ogólny wskaźnik oddawania barw R_a nie może być niższy niż 80. W analizowanym modelu bazującym na trzech barwach składowych najwyższa uzyskana wartość to jedynie 65. W przypadku zmieszania strumienia świetlnego modułu LED z strumieniem świetlnym promieniowania dziennego ogólny wskaźnik R_a osiąga wartość ponad 80, jednak wynika

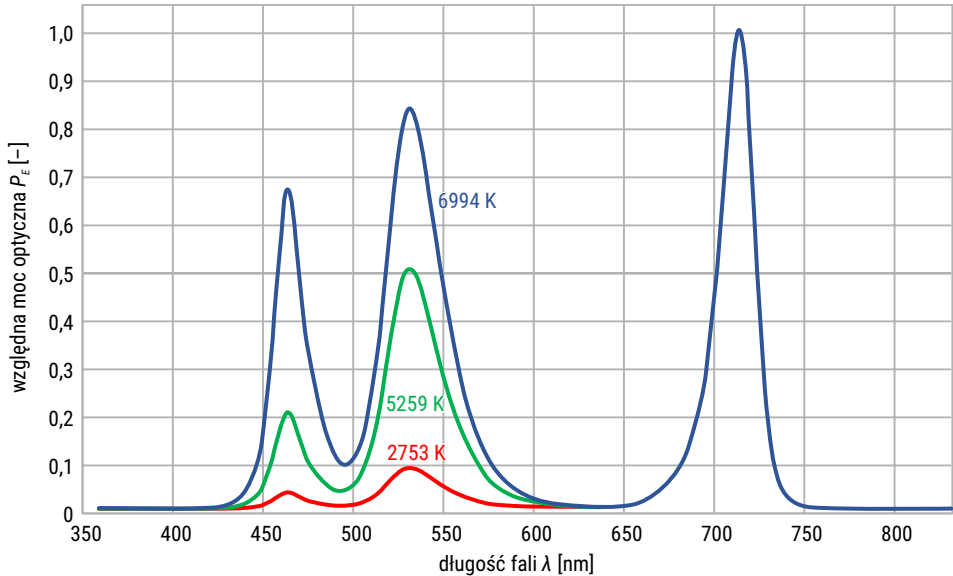
to z udziału światła dziennego w wypadkowej mieszaninie. Po zmroku warunek ten nie zostanie spełniony, co dyskwalifikuje użycie oprawy tego typu do oświetlenia pomieszczeń, gdzie stale przebywają ludzie. Charakterystyczne są również ujemne wartości wskaźnika R_a przy T_b równej 2753 K. Wyjaśnieniem tego rezultatu jest fakt, że przy tej temperaturze barwowej T_b w wyjściowym strumieniu świetlnym modułu LED znaczący udział stanowi promieniowanie źródła XP-E XPEPHR – Photo Red, przy jednoczesnym niewielkim udziale strumienia świetlnego emitowanego przez pozostałe źródła składowe – rysunek 4.12.

TABELA 4.7. Różnice pomiędzy temperaturą barwową promieniowania dziennego T_b a temperaturą barwową najbliższą T_{bn} promieniowania emitowanego przez model oprawy LED

temperatura barwowa światła dziennego T_b [K]	bazowe natężenie oświetlenia E_b [lx]				
	50	100	150	200	250
	różnica $T_b - T_{bn}$ [K]				
2753	30	55	-57	46	52
3327	-117	-213	-24	124	-146
4023	-83	-245	259	54	131
4678	-65	77	-241	-246	46
5259	-155	-191	-136	-207	-98
5736	21	134	-205	-73	-128
6443	164	-12	83	5	-221
6994	109	-69	-200	261	-3
7723	175	-702	-325	-188	-987

TABELA 4.8. Wartość ogólnego wskaźnika oddawania barw R_a przy różnych wartościach temperatury barwowej T_b światła dziennego i bazowego natężenia oświetlenia E_b

temperatura barwowa światła dziennego T_b [K]	bazowe natężenie oświetlenia E_b [lx]				
	50	100	150	200	250
	ogólny wskaźnik oddawania barw R_a [-]				
2753	-8	-12	-7	-10	-8
3327	11	13	10	12	11
4023	30	32	33	34	36
4678	46	46	48	47	49
5259	54	56	54	55	54
5736	63	65	65	64	62
6443	55	55	54	55	56
6994	28	30	28	29	31
7723	17	21	17	15	12



RYS. 4.12. Przykładowe widmo promieniowania emitowanego przez model oprawy o trzech barwach składowych

Analiza przedstawionych na rysunku 4.12 względnych charakterystyk spektralnych promieniowania emitowanego przez model oprawy LED RGB pozwala wyjaśnić niską wartość ogólnego wskaźnika oddawania barw R_a . Niezależnie od wartości temperatury barwowej najbliższej T_{bn} w zakresie długości fali λ od 600 nm do 650 nm poziom emitowanego promieniowania jest bardzo mały. Powoduje to obniżenie wartości wszystkich szczególnych wskaźników R_p , a ostatecznie również wskaźnika ogólnego R_a . Problem ten można rozwiązać uzupełniając widmo z tego zakresu na przykład stosując dodatkowe źródło achromatyczne.

4.3. Badania oprawy z modułem RGBW

Drugim modelem oprawy poddanym badaniom był model bazujący na źródłach:

- Cree XP-E XPEPHR – Photo Red,
- ProLight 3W Power LED PK2N-3LGE-SD – Green
- Cree XP-C XPCBLU – Blue,
- Cree XP-G XPGBWT – Cool White.

Jak pokazały wyniki pomiarów modułu bazującego jedynie na trzech składowych, w celu podniesienia wartości ogólnego wskaźnika oddawania barw R_a niezbędne jest zastosowanie dodatkowej składowej achromatycznej.

Przed przystąpieniem do zbadania względnych charakterystyk spektralnych moduł LED RGBW sprawdzono pod względem stabilizacji natężenia oświetlenia na powierzchni roboczej. Stanowisko badawcze oraz procedura pomiarowa były analogiczne jak w przypadku modułu LED RGB. Wyniki pomiarów natężenia oświetlenia E przy różnych wartościach temperatury barwowej T_b światła dziennego zestawiono w tabeli 4.9.

TABELA 4.9. Wyniki pomiarów stabilizacji natężenia oświetlenia E przy różnych wartościach temperatury barwowej T_b światła dziennego

bazowe natężenie oświetlenia E_b [lx]	temperatura barwowa światła dziennego T_b [K]								
	2753	3327	4023	4678	5259	5736	6443	6994	7723
	natężenie oświetlenia E [lx]								
50	302,2	306	310,7	303,4	315,1	314,5	307,8	310,5	303,5
100	303,5	306,4	304,5	306,7	305,8	306,3	310,3	302,9	309,1
150	306,3	312,5	311,3	314,8	317,1	305,3	318,1	317,4	315,5
200	316,3	313,8	318,4	316,7	309,9	311,4	319,8	314,7	318,8
250	317,5	324,5	316,7	314,5	319,5	324,3	317,5	319,5	324,5

Uzyskane wyniki świadczą o poprawnej pracy opracowanego modelu oprawy LED RGBW oraz elektronicznego układu sterującego. Dzięki zastosowaniu dodatkowego źródła achromatycznego we wszystkich wariantach osiągnięto wymagany poziom natężenia oświetlenia E na powierzchni roboczej. Największy poziom prześwietlenia wystąpił w wariacie, gdy bazowe natężenie oświetlenia wyniosło 250 lx. Analogicznie jak w przypadku modułu RGB, przyczyną tego efektu jest problem z ustawieniem niskiej wartości wyjściowego strumienia świetlnego Φ_{out} wynikający z ośmiobitowej rozdzielczości sygnału sterującego źródłami prądowymi. Przyczyna leży również po stronie samych zastosowanych źródeł prądowych, które w przypadku niewielkiej wartości wypełnienia sygnału sterującego pracują niepoprawnie. Rozwiązanie tej niedogodności może stanowić zmiana modelu źródeł prądowych. Jednak biorąc pod uwagę, że powierzchnia została maksymalnie prześwietlona o 24,5 lx (co stanowi około 8% wartości docelowej) na tym etapie badań zrezygnowano z ich wymiany. Wartości wyjściowego strumienia świetlnego Φ_{out} oraz mocy elektrycznej P modułu LED RGBW obliczone dla rozpatrywanych wariantów przedstawiono w tabelach 4.10 oraz 4.11.

Parametry, których wartości zebrano w tabelach 4.10 oraz 4.11 użyto do obliczenia skuteczności świetlnej η modułu LED RGBW. Otrzymane wyniki zestawiono w tabeli 4.12.

TABELA 4.10. Wartość wyjściowego strumienia świetlnego Φ_{out} emitowanego przez model oprawy LED RGBW przy różnych wartościach temperatury barwowej T_b światła dziennego

bazowe natężenie oświetlenia E_b [lx]	temperatura barwowa światła dziennego T_b [K]								
	2753	3327	4023	4678	5259	5736	6443	6994	7723
	wyjściowy strumień świetlny oprawy LED Φ_{out} [lm]								
50	90,1	91,4	93,1	90,5	94,7	94,5	92,1	93,0	90,5
100	72,7	73,7	73,0	73,8	73,5	73,7	75,1	72,5	74,7
150	55,8	58,0	57,6	58,9	59,7	55,5	60,8	59,8	59,1
200	41,5	40,6	42,3	41,7	39,3	39,8	42,8	41,0	43,5
250	25,5	26,6	23,8	23,0	27,0	26,5	24,1	24,8	26,6

TABELA 4.11. Moc modułu LED RGBW P [W] w zależności od poziomu bazowego natężenia oświetlenia E_b oraz temperatury barwowej T_b światła dziennego

bazowe natężenie oświetlenia E_b [lx]	temperatura barwowa światła dziennego T_b [K]								
	2753	3327	4023	4678	5259	5736	6443	6994	7723
	moc modułu LED P [W]								
50	1,19	1,35	1,57	1,69	1,93	2,03	2,09	2,21	2,27
100	0,94	1,06	1,19	1,33	1,41	1,49	1,61	1,6	1,77
150	0,66	0,78	0,87	0,99	1,07	1,02	1,21	1,23	1,28
200	0,44	0,48	0,58	0,62	0,61	0,65	0,75	0,73	0,84
250	0,23	0,25	0,24	0,25	0,35	0,35	0,32	0,35	0,41

TABELA 4.12. Wartość skuteczności świetlnej modułu LED RGBW η [lm/W]

bazowe natężenie oświetlenia E_b [lx]	temperatura barwowa światła dziennego T_b [K]								
	2753	3327	4023	4678	5259	5736	6443	6994	7723
	skuteczność świetlna modułu LED η [lm/W]								
50	75,7	67,7	59,3	53,6	49,1	46,5	44,1	42,1	39,9
100	77,3	69,5	61,4	55,5	52,1	49,4	46,7	45,3	42,2
150	84,6	74,4	66,2	59,5	55,8	54,4	50,2	48,6	46,2
200	94,4	84,7	72,9	67,2	64,3	61,2	57,0	56,1	51,8
250	111,0	106,4	99,3	92,1	77,0	75,8	75,3	70,9	64,9

Analizując wyniki przedstawione w tabeli 4.12 zauważyć można, że wraz ze zmniejszaniem wartości strumienia świetlnego Φ_{out} modułu LED RGBW wzrasta jego skuteczność świetlna. Analogiczne jak to miało miejsce w przypadku modułu LED RGB, wynika to z obniżenia temperatury złącza *pn* diod świecących. W przeważającej części badanych wariantów uzyskane wartości skuteczności świetlnej są porównywalne

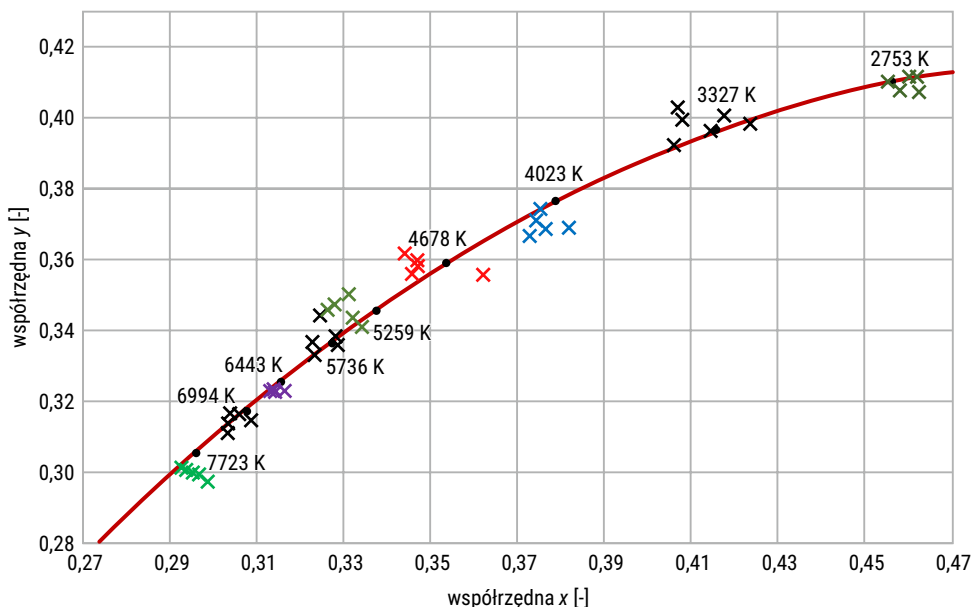
ze skutecznością świetlną klasycznych źródeł stosownych w oświetleniu wewnętrznym. Jednak zauważalnie niższą wartością charakteryzują się wyniki uzyskane przy temperaturze barwowej światła dziennego równej 7723 K. Wynikało to z faktu, że w tych przypadkach znaczący udział w wyjściowym strumieniu świetlnym Φ_{out} modułu LED RGBW stanowił strumień świetlny źródła Cree XP-C XPCBLU – Blue, które cechowało się skutecznością świetlną rzędu 30 lm/W.

W czasie kolejnego etapu badań sprawdzono regulację temperatury barwowej najbliższej T_{bn} emitowanego przez moduł LED RGBW strumienia świetlnego w zależności od temperatury barwowej T_b światła dziennego oraz wartości bazowego natężenia oświetlenia E_b . Otrzymane wyniki zebrano w tabeli 4.13 oraz przedstawiono na wykresie jednostkowym xy układu kolorymetrycznego CIE XYZ 1931 na rysunku 4.13.

TABELA 4.13. Temperatura barwowa najbliższa promieniowania emitowanego przez model oprawy LED RGBW przy różnych wartościach bazowego natężenia oświetlenia E_b

temperatura barwowa światła dziennego T_b [K]	bazowe natężenie oświetlenia E_b [lx]				
	50	100	150	200	250
	wyniki pomiarów temperatury barwowej najbliższej T_{bn} [K]				
2753	2701	2678	2759	2635	2703
3327	3325	3184	3505	3495	3558
4023	4147	4050	4126	4133	3899
4678	4945	4963	5063	4404	4981
5259	5507	5415	5556	5693	5766
5736	5676	5692	5844	5925	6192
6443	6522	6488	6353	6485	6454
6994	7158	7278	7038	6873	7226
7723	7911	8035	8253	8302	8123

Porównując uzyskane wyniki z danymi otrzymanymi z pomiarów modułu LED RGB można stwierdzić, że w przypadku modułu LED RGBW są one bardziej skupione wokół punktów chromatyczności odpowiadającym docelowym temperaturom barwowym T_b światła dziennego. Ponownie w celu określenia jakości regulacji temperatury barwowej najbliższej oparto się na zaleceniach normy ANSI C78.377-2011 [10]. Różnice pomiędzy docelową temperaturą barwową T_b światła dziennego a temperaturą barwowa najbliższą strumienia świetlnego emitowanego przez model oprawy LED zestawiono w tabeli 4.14.



RYS. 4.13. Współrzędne trójchromatyczne promieniowania emitowanego przez opracowany model oprawy LED z czterema barwami składowymi

TABELA 4.14. Różnice pomiędzy temperaturą barwową promieniowania dziennego T_b a temperaturą barwową najbliższą T_{bn} promieniowania emitowanego przez model oprawy LED RGBW

temperatura barwowa światła dziennego T_b [K]	bazowe natężenie oświetlenia E_b [lx]				
	50	100	150	200	250
	różnica $T_b - T_{bn}$ [K]				
2753	52	75	-6	118	50
3327	2	143	-178	-168	-231
4023	-124	-27	-103	-110	124
4678	-267	-285	-385	274	-303
5259	-248	-156	-297	-434	-507
5736	60	44	-108	-189	-456
6443	-79	-45	90	-42	-11
6994	-164	-284	-44	121	-232
7723	-188	-312	-530	-579	-400

Dane z tabeli 4.14 pokazują, że wymagania zawarte w [10] w większości analizowanych wariantów zostały spełnione. Podobnie, jak to miało miejsce w przypadku modelu o trzech barwach składowych wysokie różnice widoczne są przy temperaturze barwowej T_b równej 7723 K oraz w przypadku, gdy wyjściowy strumień

światlny modelu oprawy przyjmuje niską wartość. Przy tak wysokiej temperaturze barwowej T_b różnice te są do zaakceptowania. Natomiast wartości uzyskane przy bazowym natężeniu oświetlenia E_b wynoszącym 250 lx były spowodowane niepoprawną pracą impulsowych źródeł prądowych przy niskich poziomach wysterowania.

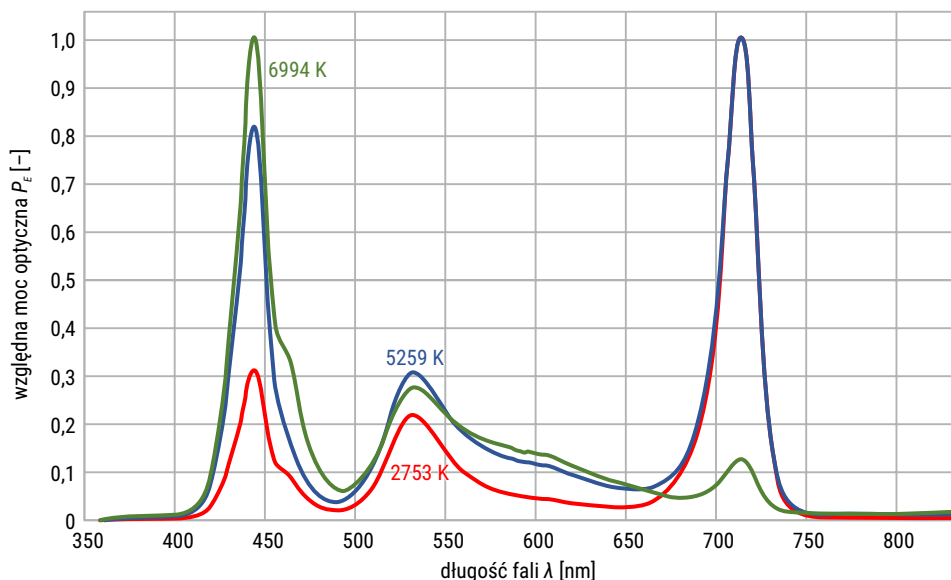
Podczas tego etapu badań, na podstawie względnych rozkładów widmowych promieniowania emitowanego przez moduł LED RGBW, obliczono wartości ogólnego wskaźnika oddawania barw R_a . Wyniki przedstawia tabela 4.15.

TABELA 4.15. Wartość ogólnego wskaźnika oddawania barw R_a przy różnych wartościach temperatury barwowej T_b światła dziennego i bazowego natężenia oświetlenia E_b

temperatura barwowa światła dziennego T_b [K]	bazowe natężenie oświetlenia E_b [lx]				
	50	100	150	200	250
	ogólny wskaźnik oddawania barw R_a [-]				
2753	68	68	66	65	62
3327	75	76	72	74	75
4023	82	83	79	83	79
4678	84	82	83	83	82
5259	83	84	82	83	82
5736	80	82	82	81	81
6443	76	78	76	77	79
6994	66	64	65	64	62
7723	54	55	51	49	46

W porównaniu z modelem bazującym na trzech barwach składowych, model z dodatkowym źródłem achromatycznym cechuje się wyższą wartością ogólnego wskaźnika oddawania barw R_a . W przypadku temperatur barwowych najbliższych T_{bn} , od 4000 K do 6000 K uzyskano wynik powyżej 80. Oznacza to, że oprawy oświetleniowe oparte na zaproponowanym rozwiązaniu mogą być używane również do samodzielnego oświetlenia wnętrz, w których stale przebywają ludzie. Niezadowolająca wartość ogólnego wskaźnika barw R_a , w przypadku temperatury barwowej poniżej poziomu 3300 K, wskazuje na konieczność kontynuowania prac w tym zakresie.

Stosunkowo niewielka wartość wskaźnika R_a poza zakresem temperatur barwowych najbliższych od 4000 K do 6000 K wynika z niskiego poziomu promieniowania w zakresie długości fali od 475 nm do 500 nm oraz 625 nm do 675 nm, co pokazano na rysunku 4.14. Oczywistym rozwiązaniem tego problemu jest dodanie kolejnych źródeł składowych emitujących promieniowanie z tych zakresów widmowych.



RYS. 4.14. Przykładowe widmo promieniowania emitowanego przez model oprawy o czterech barwach składowych

Podsumowanie

W rozdziale trzecim omówiono opracowane układy elektroniczne odpowiedzialne za sterowanie zaprojektowanymi modelami opraw oświetleniowych wykorzystujących półprzewodnikowe źródła promieniowania. Przedstawiono w nim również wyniki badań laboratoryjnych opracowanych modułów oświetleniowych LED bazujących na trzech oraz czterech barwach składowych. Zbadano jakość stabilizacji natężenia oświetlenia E powierzchni roboczej w zależności od temperatury barwowej światła dziennego T_b oraz wartości bazowego natężenia oświetlenia E_b wywołanego promieniowaniem dziennym. Otrzymane wyniki potwierdziły poprawne działanie opracowanych układów oraz algorytmów sterujących. Zauważono jednak, problemy z uzyskaniem niskich wartości wyjściowego strumienia świetlnego modułu LED. Analiza działania układów sterujących pozwoliła stwierdzić, że przyczyną tego zjawiska była niska rozdzielczość sygnału sterującego wyjściowymi źródłami prądowymi. Zwiększenie rozdzielczości sygnału nie rozwiązywało tego problemu, ponieważ zastosowane impulsowe źródła prądowe MBI6651 nie reagowały na tak niewielkie zmiany wypełnienia sygnału sterującego.

W drugim etapie badań sprawdzono regulację temperatury barwowej najbliższej T_{bn} emitowanego przez moduły LED strumienia świetlnego w zależności od temperatury barwowej T_b światła dziennego oraz wartości bazowego natężenia oświetlenia

E_b . Bazując na wytycznych normy ANSI C78.377-2011 [10] oraz zebranych wynikach stwierdzono, że oba zaproponowane rozwiązania w zadowalającym stopniu realizują to zadanie.

Ponadto, podczas realizacji tego etapu wyznaczono wartości ogólnego wskaźnika oddawania R_a . Uzyskane wyniki pokazały, że model oprawy o trzech barwnych źródłach składowych charakteryzuje się wskaźnikiem R_a poniżej 80. Nie może więc być używany do samodzielnego oświetlenia wnętrz, gdzie stale przebywają ludzie. W przypadku modelu oprawy o trzech źródłach barwnych i źródle achromatycznym w zakresie temperatur barwowych najbliższych, jakie często występują w przypadku oświetlenia wnętrzowego (od 4000 K do 6000 K) model oprawy LED RGBW cechuje się ogólnym wskaźnikiem oddawania barw R_a większym niż 80. Na tej podstawie można stwierdzić, że oprawa tego typu mogłaby służyć do oświetlenia pomieszczeń, w których stale przebywają ludzie.

Podsumowanie

Głównym celem zrealizowanych badań i prac projektowych było opracowanie metody modelowania rozkładu parametrów fotometrycznych i kolorymetrycznych modułów oświetleniowych ze źródłami półprzewodnikowymi. Opracowana metoda pozwala na stabilizację natężenia oświetlenia oraz uzyskanie zamierzonej temperatury barwowej najbliższej na powierzchni referencyjnej.

Pierwszym etapem badań było przeprowadzenie analizy parametrów spektrofotometrycznych ogólnie dostępnych półprzewodnikowych źródeł promieniowania z zakresu widzialnego. Biorąc pod uwagę cel niniejszej pracy, niezbędnymi parametrami były współrzędne trójchromatyczne x , y emitowanego przez diody światła oraz charakterystyki regulacji ich wyjściowego strumienia świetlnego Φ . Zaprojektowano oraz skonstruowano stanowiska pomiarowe służące do wyznaczenia wymienionych parametrów. Na podstawie wyników przeprowadzonych badań wybrano cztery modele diod elektroluminescencyjnych, które wykorzystano w konstrukcjach modeli opraw LED:

- Cree XP-E XPE**PHR** – Photo Red,
- ProLight 3W PK2N-3LGE-SD – Green,
- Cree XP-C XPC**BLU** – Blue,
- Cree XP-G XPG**BWT** – Cool White.

O wyborze wymienionych modeli LED-ów zadecydowało kilka czynników. Po pierwsze, punkty chromatyczności (w układzie CIE XYZ 1931) wybranych diod emitujących promieniowanie barwne znajdowały się w pobliżu krzywej barw widmowych. Wybór takich składowych pozwalał uzyskać wypadkową mieszaninę ich strumieni świetlnych z niemal całego pola trójkąta jednostkowego xy . Po drugie, w przypadku tworzenia mieszaniny z obszaru barw achromatycznych zwiększała stabilność jej punktu chromatyczności. Ponadto, wyselekcjonowane diody elektroluminescencyjne charakteryzowały się najwyższą wartością strumienia świetlnego spośród wszystkich poddanych badaniom. Wybór diody Cree XP-G XPG**BWT**, jako źródła achromatycznego, podyktowany był faktem, że jej punkt chromatyczności leży w pobliżu środka ciężkości płaszczyzny jednostkowej ($x = 0,33$; $y = 0,33$), tym samym pola trójkątów RGW, RBW oraz GBW były zbliżone.

Zgodnie z założeniami pracy skonstruowany model oprawy LED wyposażono w scalony czujnik koloru, pozwalający na pomiar parametrów fotometrycznych na powierzchni roboczej. Wykorzystując opracowany przez autora układ pomiarowy zbadano dostępne handlowo scalone czujniki koloru:

- MTCSiCS (MAZeT GmbH),
- MMCS6CS (MAZeT GmbH).

Wybrane układy charakteryzowały się wysoką liniowością sygnału wyjściowego, niezależnie od względnego rozkładu spektralnego promieniowania, jakim je oświetlono. Ponadto, opracowano tory pomiarowe ze wzmacniaczami transimpedancyjnymi o regulowanym wzmocnieniu, co pozwoliło na uzyskanie szerokiego zakresu pomiarowego obu detektorów.

W monografii przedstawiono także metodę kalibracji wymienionych czujników koloru oraz wyznaczono macierze transformacji pomiędzy lokalnymi układami kolorymetrycznymi czujników a układem kolorymetrycznym CIE XYZ 1931. Różnica barwy ΔE_{LAB} pomiędzy danymi z sensora MTCSiCS a wskazaniem profesjonalnego kolorymetru Minolta CL-200 wyniosła 0,6, natomiast układ MMCS6 cechował się różnicą $\Delta E_{LAB} = 2,45$. Na tej podstawie ostatecznie zdecydowano o zastosowaniu czujnika MTCSiCS w konstrukcji modelu oprawy LED.

W pracy opisano podstawy matematyczne opracowanych algorytmów sterowania modelami opraw LED. Pierwszy z nich dotyczył modelu oprawy LED z trzema barwnymi źródłami składowymi. Drugi model bazował na trzech źródłach barwnych oraz jednym źródle achromatycznym. Zadaniem obu algorytmów sterujących było uzyskanie addytywnej mieszaniny strumieni świetlnych emitowanych przez poszczególne źródła bazowe, o zadanym wyjściowym strumieniu świetlnym Φ oraz określonej temperaturze barwowej najbliższej T_{bn} , zgodnej z temperaturą barwową światła dziennego. Opracowane algorytmy sterowania zaimplementowano w ośmiobitowym mikrokontrolerze AVR Atmega8, który został użyty do kontroli parametrów fotometrycznych i kolorymetrycznych opracowanych modeli opraw oświetleniowych ze źródłami LED.

Wyniki przeprowadzonych badań laboratoryjnych potwierdziły, że możliwe jest wytworzenie zamierzonego rozkładu przestrzennego strumienia świetlnego i uzyskanie zamierzonej temperatury barwowej oraz wskaźnika oddawania barw na powierzchni odniesieniowej, przez modelowanie emisji światła z oprawy wykorzystującej półprzewodnikowe źródła LED i pomiar parametrów spektrofotometrycznych scalonym przetwornikiem barwy. W większości analizowanych przypadków układ poprawnie stabilizował wartość natężenia oświetlenia na powierzchni roboczej – występujące prześwietlenia powierzchni w żadnym wariacie nie przekroczyły 8,5% wartości docelowej. Jednak przy temperaturze barwowej światła dziennego równej 2753 K oraz 3327 K kontroler nie był w stanie odpowiednioysterować modelu oprawy o trzech źródłach składowych – wynikało to z niskiego strumienia świetlnego czerwonych diod Cree XP-E XPEPHR.

W czasie badań laboratoryjnych przetestowano działanie opracowanego modelu modułu oświetleniowego LED w 45 wybranych sytuacjach oświetleniowych – przy pięciu poziomach bazowego natężenia oświetlenia E_b oraz dziewięciu wariantach temperatury barwowej światła dziennego T_b . We wszystkich analizowanych przypadkach układ reagował na zmianę temperatury barwowej światła dziennego T_b . Jednak analizując uzyskane wyniki stwierdzono, że w 10 przypadkach układ nie był w stanie utrzymać temperatury barwowej najbliższej T_{bn} w granicach tolerancji opisanych w wytycznych normy ANSI C78.377-2011 *Specifications for the Chromaticity of Solid State Lighting*.

Pomiar wartości ogólnego wskaźnika oddawania barw R_a pokazał, że model oprawy bazujący na trzech barwach składowych nie spełnia wymagań dotyczących minimalnej wartości tego parametru w przypadku źródeł stosowanych do oświetlenia pomieszczeń, w których stale przebywają ludzie – w żadnym z rozpatrywanych przypadków wskaźnik R_a nie przekroczył wartości 65.

W porównaniu z modelem bazującym na trzech barwach składowych, model z dodatkowym źródłem achromatycznym cechował się wyższą wartością ogólnego wskaźnika oddawania barw R_a . W przypadku temperatur barwowych najbliższych T_{bn} , z zakresu od 4000 K do 6000 K uzyskano wynik powyżej 80. Oznacza to, że oprawy oświetleniowe oparte na zaproponowanym rozwiązaniu mogą być używane również do samodzielnego oświetlenia wnętrz, w których stale przebywają ludzie. W przypadku niższych wartości temperatury barwowej w zakresie od 2700 K do 3300 K nie uzyskano zadowalających wyników ogólnego wskaźnika oddawania barw R_a .

Autor planuje kontynuować prace nad konstrukcjami oraz algorytmami sterowania oprawami oświetleniowymi bazującymi na wielu źródłach składowych emitujących promieniowanie barwne oraz achromatyczne m. in. w celu zwiększenia wartości ogólnego wskaźnika oddawania barw.

Należy mieć na względzie, że wielu producentów detektorów promieniowania widzialnego w najbliższych kilku latach planuje wprowadzić do dystrybucji nowoczesne kompaktowe sensory. Rozszerzy to możliwości aplikacyjne opracowanych przez autora metod sterowania do kontroli adaptacyjnych systemów oświetlenia wnętrza.

Opracowane w ramach pracy konstrukcje elektronicznych układów sterujących oraz modele modułów oświetleniowych bazujące na półprzewodnikowych źródłach światła opisano w zgłoszeniu patentowym nr P.416671, znak: RO-185.412/03/2016, *System oświetleniowy LED oraz oprawa oświetleniowa LED*.

Literatura

1. Schubert F. E.: *Light-Emitting Diodes. Second edition*, Cambridge University Press, Cambridge 2006.
2. Ohno Y., Hardis J. E.: *Four-Color Matrix Method for Correction of Tristimulus Colorimeters*, IS&T Fifth Color Imaging Conference, Scottsdale 1997.
3. Tabaka P.: *Ocena przydatności farby przewidzianej do pomalowania wnętrza kuli Ulbrichta*, „Zeszyty Naukowe Instytutu Elektrotechniki” 2012, z. 256.
4. Dybczyński W.: *Miernictwo promieniowania optycznego*, Wydawnictwa Politechniki Białostockiej, Białystok 1996.
5. Helbig E.: *Podstawy fotometrii*, WNT, Warszawa 1975.
6. CIE Technical Note 001:2014, *Chromaticity Difference Specification for Light Sources*, CIE, 2014.
7. CIE Technical Report 15:2004, *Colorimetry*, CIE, 2004.
8. Ohno Y.: *Practical Use and Calculation of CCT and Duv*, LEUKOS, „The Journal of the Illuminating Engineering Society of North America” 2014, nr 10, s. 47–55.
9. CIE Technical Report 13.3-1995, *Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources*, CIE, 1995.
10. American National Standard for Electric Lamps, ANSI C78.377-2011. *Specifications for the Chromaticity of Solid State Lighting*, National Electrical Manufacturers Association, 2011.
11. Budzyński Ł., Zajkowski M.: *Automatic measurement system for long term LED parameters*, Proceedings of SPIE 2015, t. 9662.
12. Budzyński Ł., Zajkowski M., Tyniecki D.: *Analysis of metrological properties of integrated color sensors*, „Optical Fibers and Their Applications, Proceedings of SPIE” 2017, t. 10325.
13. Kotulski Z., Szczepiński W.: *Rachunek błędów dla inżynierów*, WNT, Warszawa 2009.
14. Zięba A.: *Analiza danych w naukach ścisłych i technice*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2013.
15. Arendarski J.: *Niepewność pomiarów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2013.
16. Fiok A.: *Telewizja. Podstawy ogólne*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1996.
17. Mielnicki J.: *Zarys wiadomości o barwie*, Fundacja Rozwoju Polskiej Kolorystyki, Łódź 1997.
18. Felhorski W., Stanioch W.: *Kolorymetria trójkromatyczna*, WNT, Warszawa 1973.
19. Mokrzycki W., Tatol M.: *Color difference Delta E – A survey*, „Machine Graphics and Vision” 2011, t.20, nr 4, s. 383–411.

20. Budzyński Ł., Zajkowski M., Błaszczak U., Kuszniar J.: *System do wyznaczania rzeczywistej temperatury złącza wielokolorowych diod LED*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2015, R.91, nr 7, s. 72–76.
21. Budzyński Ł.: *Influence of junction temperature on the spectral power distribution of Light Emitting Diodes*, „Challenges of Modern Technology” 2015, t. 6, nr 4, s. 3–7.
22. Karta katalogowa farby OPRC – Barium Sulfate Coating firmy Optopolimer (wersja dostępna dnia 10.05.2017).
23. Karta katalogowa spektrometru OL-750 (wersja dostępna dnia 15.06.2017).
24. Karta katalogowa produktu Cree XLamp XP-E LEDs (wersja dostępna dnia 15.06.2017).
25. Karta katalogowa produktu Lumileds Luxeon 3535L Color Line/White Line (wersja dostępna dnia 15.06.2017).
26. Karta katalogowa produktu ProLoght Opto PK2N-1LxE Series (wersja dostępna dnia 15.06.2017).
27. Karta katalogowa MAZeT GmbH MTCSiCS (wersja dostępna dnia 10.06.2017).
28. Karta katalogowa MAZeT GmbH MMCS6CS (wersja dostępna dnia 10.06.2017).
29. Karta katalogowa MAZeT GmbH MTI04 (wersja dostępna dnia 10.06.2017).
30. Karta katalogowa mikrokontrolera AVR Atmega8/Atmega8L (wersja dostępna dnia 15.06.2017).
31. Karta katalogowa Macroblock MBI6651 (wersja dostępna dnia 15.06.2017).
32. Nota aplikacyjna UM10204: *I²C-bus specification and user manual*, NXP Semiconductors, (wersja dostępna dnia 15.06.2017).
33. Karta katalogowa Microchip MCP3422/2/4 (wersja dostępna dnia 15.06.2017).

Spis tabel

Tabela 1.1. Różnice barwy ΔE_{CIE} pomiędzy przyjętą chromatycznością modeli diod a wynikami poszczególnych egzemplarzy.....	21
Tabela 1.2. Równania opisujące zależność strumienia świetlnego Φ_i diody elektroluminescencyjnej od wartości natężenia prądu zasilającego I_F w zakresie od 0 do 500 mA.....	28
Tabela 2.1. Sygnały sterujące multiplexerem oraz wartości rezystancji sprzężenia zwrotnego [29].....	33
Tabela 2.2. Zadeklarowane przez producenta oraz wyznaczone eksperymentalnie wartości rezystancji sprzężenia zwrotnego konwertera MTI04.....	41
Tabela 2.3. Wartości sygnału ciemnego poszczególnych sekcji czujnika MMCS6 przy różnych poziomach przetwarzania W_{MTI04} układu MTI04.....	47
Tabela 2.4. Napięcie U_{OUT_PD} na wyjściu układu MTI04 przy oświetleniu czujnika diodami: Cree XP-E XPEPHR – Photo Red, ProLight PK2N-3LGE-SD – Green oraz Cree XP-C XPCBLU – Blue.....	48
Tabela 2.5. Wyniki pomiarów parametrów kolorymetrycznych przy użyciu czujnika MTCSiCS oraz kolorymetru CL – 200.....	52
Tabela 2.6. Wyniki pomiarów parametrów kolorymetrycznych przy użyciu czujnika MMCS6 oraz kolorymetru CL – 200.....	54
Tabela 4.1. Wyniki pomiarów stabilizacji natężenia oświetlenia E przy różnych wartościach temperatury barwowej T_b światła dziennego.....	99
Tabela 4.2. Wartość wyjściowego strumienia świetlnego Φ_{out} emitowanego przez model oprawy LED RGB przy różnych wartościach temperatury barwowej T_b światła dziennego.....	100
Tabela 4.3. Moc modułu LED P [W] w zależności od poziomu bazowego natężenia oświetlenia E_b oraz temperatury barwowej T_b światła dziennego.....	100
Tabela 4.4. Wartość skuteczności świetlnej modułu LED η [lm/W].....	101
Tabela 4.5. Temperatura barwowa najbliższa promieniowania emitowanego przez model oprawy LED przy różnych wartościach bazowego natężenia oświetlenia E_b	101
Tabela 4.6. Tolerancja określania temperatury barwowej najbliższej T_{bn} zgodnie z wytycznymi normy ANSI C78.377-2011 [10].....	103

Tabela 4.7. Różnice pomiędzy temperaturą barwową promieniowania dziennego T_b a temperaturą barwową najbliższą T_{bm} promieniowania emitowanego przez model oprawy LED	104
Tabela 4.8. Wartość ogólnego wskaźnika oddawania barw R_a przy różnych wartościach temperatury barwowej T_b światła dziennego i bazowego natężenia oświetlenia E_b	104
Tabela 4.9. Wyniki pomiarów stabilizacji natężenia oświetlenia E przy różnych wartościach temperatury barwowej T_b światła dziennego	106
Tabela 4.10. Wartość wyjściowego strumienia świetlnego Φ_{out} emitowanego przez model oprawy LED RGBW przy różnych wartościach temperatury barwowej T_b światła dziennego	107
Tabela 4.11. Moc modułu LED RGBW P [W] w zależności od poziomu bazowego natężenia oświetlenia E_b oraz temperatury barwowej T_b światła dziennego	107
Tabela 4.12. Wartość skuteczności świetlnej modułu LED RGBW η [lm/W]	107
Tabela 4.13. Temperatura barwowa najbliższa promieniowania emitowanego przez model oprawy LED RGBW przy różnych wartościach bazowego natężenia oświetlenia E_b	108
Tabela 4.14. Różnice pomiędzy temperaturą barwową promieniowania dziennego T_b a temperaturą barwową najbliższą T_{bm} promieniowania emitowanego przez model oprawy LED RGBW	109
Tabela 4.15. Wartość ogólnego wskaźnika oddawania barw R_a przy różnych wartościach temperatury barwowej T_b światła dziennego i bazowego natężenia oświetlenia E_b	110

Spis rysunków

Rys. 1.1. Współrzędne trójchromatyczne źródeł składowych zaproponowanych rozwiązań oprawy oświetleniowej: a) trzy składowe barwne RGB, b) pięć składowych barwnych RGB+CA, c) trzy składowe barwne oraz jedna achromatyczna RGB+W	9
Rys. 1.2. Schemat blokowy automatycznego systemu pomiarowego do wyznaczania charakterystyk prądowo-napięciowych LED-ów	12
Rys. 1.3. Obwód drukowany o podłożu aluminiowym, do którego przylutowano testowane LED-y	12
Rys. 1.4. Charakterystyki prądowo-napięciowe wybranych LED-ów firmy Prolight	13
Rys. 1.5. Charakterystyki prądowo-napięciowe wybranych LED-ów firmy Cree	13
Rys. 1.6. Charakterystyki prądowo-napięciowe wybranych LED-ów firmy Cree.....	14
Rys. 1.7. Stanowisko badawcze do wyznaczania charakterystyk widmowych diod elektroluminescencyjnych.....	14
Rys. 1.8. Widmowy współczynnik odbicia farby na bazie siarczanu baru $BaSO_4$ [22]	15
Rys. 1.9. Wartość napięcia zasilającego U_{zas} źródła żarowe w czasie pomiaru spektrometrem OL-750	16
Rys. 1.10. Wartość natężenia prądu I_{zas} zasilającego źródła żarowe w czasie pomiaru spektrometrem OL-750	16
Rys. 1.11. Względne charakterystyki widmowe użytych źródeł żarowych (pomiar przy użyciu spektrometru OL-750) oraz teoretyczny rozkład iluminantu A.....	17
Rys. 1.12. Względne charakterystyki widmowe użytych źródeł żarowych (pomiar przy użyciu spektrometru Black-Comet) oraz teoretyczny rozkład iluminantu A.....	17
Rys. 1.13. Wartości widmowego współczynnika korekcyjnego opracowanego stanowiska pomiarowego	18
Rys. 1.14. Względne charakterystyki widmowe diody Cree XP-G XRGBHT – Warm White przed oraz po uwzględnieniu współczynnika korekcyjnego	19
Rys. 1.15. Względne skorygowane charakterystyki widmowe wybranych LED-ów firmy ProLight	19
Rys. 1.16. Względne skorygowane charakterystyki widmowe wybranych LED-ów firmy CREE	20

Rys. 1.17. Względne skorygowane charakterystyki widmowe wybranych LED-ów firmy CREE.....	20
Rys. 1.18. Współrzędne tróchromatyczne diod PK2N-3LGE-SD – Green na płaszczyźnie $u'v'$	22
Rys. 1.19. Współrzędne tróchromatyczne diod XP-C XPCBLU – Blue na płaszczyźnie $u'v'$	22
Rys. 1.20. Współrzędne tróchromatyczne diod XP-E XPEPHR – Photo Red na płaszczyźnie $u'v'$	22
Rys. 1.21. Współrzędne tróchromatyczne diod XP-G XPGBWT – Cool White na płaszczyźnie $u'v'$	23
Rys. 1.22. Współrzędne tróchromatyczne wybranych LED-ów.....	24
Rys. 1.23. Stanowisko badawcze do wyznaczania strumienia świetlnego diod elektroluminescencyjnych.....	26
Rys. 1.24. Dioda Cree CXA1512 Easy White 4000 K użyta jako wzorzec strumienia świetlnego.....	26
Rys. 1.25. Stanowisko do wyznaczania bryły fotometrycznej źródeł światła.....	27
Rys. 1.26. Zależność strumienia świetlnego Φ_4 modelu diod LED PK2N-3LGE-SD – Green w funkcji prądu zasilania I_F	28
Rys. 1.27. Zależność strumienia świetlnego Φ_8 modelu diod XP-C XPCBLU – Blue w funkcji prądu zasilania I_F	29
Rys. 1.28. Zależność strumienia świetlnego Φ_{13} modelu diod XP-E XPEPHR – Photo Red w funkcji prądu zasilania I_F	29
Rys. 1.29. Zależność strumienia świetlnego Φ_{14} modelu diod XP-G XPGBWT – Cool White w funkcji prądu zasilania I_F	29
Rys. 2.1. Układ MTCSiCS – widok oraz wymiary układu scalonego [27].....	32
Rys. 2.2. Schematyczna budowa układu MAZeT MTI04 [29].....	33
Rys. 2.3. Schemat połączenia układu MTCSiCS z mikrokontrolerem Atmega8.....	34
Rys. 2.4. Układ MMCS6 – widok oraz wymiary układu scalonego [28].....	35
Rys. 2.5. Schemat połączenia układu MMCS6 z mikrokontrolerem Atmega8.....	36
Rys. 2.6. Względna widmowa czułość kanałów układu MTCSiCS [27].....	37
Rys. 2.7. Względna widmowa czułość kanałów układu MMCS6 [28].....	38
Rys. 2.8. Schemat stanowiska pomiarowego do wyznaczania charakterystyk sygnałów wyjściowych scalonych czujników barwy.....	38
Rys. 2.9. Stanowisko pomiarowe do wyznaczania charakterystyk sygnałów wyjściowych scalonych czujników barwy.....	39
Rys. 2.10. Kolejne etapy procedury przekształcania charakterystyk wyjściowych układu MTCSiCS.....	40

Rys. 2.11. Wartość napięcia U_{OUT} kanałów X (punkty czerwone), Y (punkty zielone), Z (punkty niebieskie) czujnika MTCSiCS przy oświetleniu diodą Cree XP-E XPEPHR – Photo Red.....	41
Rys. 2.12. Wartość napięcia U_{OUT} kanałów X (punkty czerwone), Y (punkty zielone), Z (punkty niebieskie) czujnika MTCSiCS przy oświetleniu diodą ProLight PK2N-3LGE-SD – Green	42
Rys. 2.13. Wartość napięcia U_{OUT} kanałów X (punkty czerwone), Y (punkty zielone), Z (punkty niebieskie) czujnika MTCSiCS przy oświetleniu diodą Cree XP-C XPCBLU – Blue	42
Rys. 2.14. Wartość napięcia U_{OUT} kanałów wyjściowych czujnika MMCS6 przy oświetleniu diodą Cree XP-C XPCBLU – Blue	44
Rys. 2.14. Wartość napięcia U_{OUT} kanałów wyjściowych czujnika MMCS6 przy oświetleniu diodą Cree XP-C XPCBLU – Blue (cd.).....	45
Rys. 2.14. Wartość napięcia U_{OUT} kanałów wyjściowych czujnika MMCS6 przy oświetleniu diodą Cree XP-C XPCBLU – Blue (cd.).....	46
Rys. 2.15. Zależność sygnału ciemnego poszczególnych sekcji czujnika MMCS6 w zależności od poziomu przetwarzania W_{MTI04} układu MTI04	47
Rys. 2.16. Zmiana napięcia $U_{U,PD}$ przy oświetleniu czujnika MMCS6 diodą Cree XP-E XPEPHR – Photo Red przy poziomie przetwarzania $W_{MTI04} = 8$	49
Rys. 2.17. Zmiana napięcia $U_{U,PD}$ przy oświetleniu czujnika MMCS6 diodą ProLight PK2N-3LGE-SD – Green przy poziomie przetwarzania $W_{MTI04} = 8$	49
Rys. 2.18. Zmiana napięcia $U_{OUT,PD}$ przy oświetleniu czujnika MMCS6 diodą Cree XP-C XPCBLU – Blue przy poziomie przetwarzania $W_{MTI04} = 8$	50
Rys. 2.19. Schemat stanowiska pomiarowego do testowania scalonych czujników barwy.....	50
Rys. 2.20. Stanowisko pomiarowe do testowania scalonych czujników barwy	51
Rys. 2.21. Współrzędne trójchromatyczne analizowanej mieszaniny strumieni świetlnych obliczone na podstawie wskazań kolorymetru CL-200 (punkt czarny) oraz przetransformowanych wskazań czujnika MTCSiCS (punkt czerwony).....	58
Rys. 2.22. Współrzędne trójchromatyczne analizowanej mieszaniny strumieni świetlnych: punkt czarny – współrzędne przyjęte za rzeczywiste, punkt zielony – obliczone na podstawie rozszerzonej procedury kalibracji, punkt czerwony – obliczone na podstawie standardowej procedury kalibracji	60
Rys. 2.23. Położenie punktów chromatyczności źródeł użytych w podstawowej wersji procedury kalibracji czujnika MMCS6.....	62
Rys. 2.24. Współrzędne trójchromatyczne analizowanej mieszaniny strumieni świetlnych obliczone na podstawie wskazań kolorymetru CL-200 (punkt czarny) oraz przetransformowanych wskazań czujnika MMCS6 (punkt czerwony).....	64
Rys. 2.25. Położenie punktów chromatyczności źródeł użytych w rozszerzonej wersji procedury kalibracji czujnika MMCS6.....	65

Rys. 2.26. Współrzędne tróchromatyczne analizowanej mieszaniny strumieni świetlnych.....	67
Rys. 3.1. Rozmieszczenie LED-ów na obwodzie drukowanym MCPCB – model oprawy oparty na trzech źródłach składowych R, G, B.....	70
Rys. 3.2. Zdjęcie skonstruowanego modelu modułu LED	70
Rys. 3.3. Położenie współrzędnych tróchromatycznych źródeł składowych oprawy LED RGB oraz współrzędnych przykładowej mieszaniny F.....	71
Rys. 3.4. Zakres barw możliwych do zrealizowania przy użyciu wybranych składowych RGB.....	72
Rys. 3.5. Prosta przechodząca przez punkty B i F.....	74
Rys. 3.6. Punkt F_{RG} przecięcia prostych przechodzących przez punkty B, F oraz R, G.....	75
Rys. 3.7. Rozmieszczenie LED-ów na obwodzie drukowanym MCPCB – model oprawy oparty na czterech źródłach składowych R, G, B, W.....	79
Rys. 3.8. Zdjęcie zmontowanego modułu LED – model oprawy o czterech składowych R, G, B, W.....	79
Rys. 3.9. Zakres barw możliwych do zrealizowania przy użyciu wybranych składowych RGBW	80
Rys. 3.10. Proste prostopadłe do boków trójkąta RGB i przechodzących przez punkt F.....	82
Rys. 3.11. Proste wyznaczające zmniejszony gamut oraz położenie punktów chromatyczności pośrednich źródeł składowych F_1 , F_2 oraz F_3	83
Rys. 3.12. Położenie punktów chromatyczności mieszaniny F oraz pośrednich źródeł składowych F_1 , F_2 , F_3	85
Rys. 3.13. Punkt F_{RG} w miejscu przecięcia prostych y_{W-F1} oraz y_{RG}	88
Rys. 3.14. Punkt F_{RB} w miejscu przecięcia prostych y_{W-F2} oraz y_{RB}	89
Rys. 3.15. Punkt F_{GB} w miejscu przecięcia prostych y_{W-F3} oraz y_{GB}	90
Rys. 4.1. Uproszczony schemat układu elektronicznego sterującego modelem oprawy LED.....	92
Rys. 4.3. Zdjęcie skonstruowanego toru pomiarowego czujnika MTCSiCS.....	93
Rys. 4.4. Schemat pojedynczego źródła prądowego zastosowanego w modelu oprawy LED.....	93
Rys. 4.2. Schemat połączenia toru pomiarowego czujnika MTCiCS mikrokontrolerem sterującym modelem oprawy LED	94
Rys. 4.5. Zdjęcie zaprojektowanych źródeł prądowych wykorzystanych w modelu oprawy LED	95
Rys. 4.6. Charakterystyka wyjściowa pojedynczego źródła MBI6651 o maksymalnym prądzie wyjściowym 500 mA	95

Rys. 4.7. Algorytm obliczania wypełnienia sygnałów sterujących źródłami prądowymi w zależności od strumienia świetlnego źródeł składowych	96
Rys. 4.8. Schematyczna budowa stanowiska pomiarowego wykorzystanego do badań opracowanego modelu oprawy LED	97
Rys. 4.9. Względne charakterystyki widmowe promieniowania dziennego, przy którym przeprowadzono badania skonstruowanych modeli opraw LED.....	98
Rys. 4.10. Współrzędne trójchromatyczne promieniowania przy którym przeprowadzono badania opracowanych modeli opraw oświetleniowych.....	98
Rys. 4.11. Współrzędne trójchromatyczne promieniowania emitowanego przez opracowany model oprawy LED z trzema barwami składowymi	102
Rys. 4.12. Przykładowe widmo promieniowania emitowanego przez model oprawy o trzech barwach składowych.....	105
Rys. 4.13. Współrzędne trójchromatyczne promieniowania emitowanego przez opracowany model oprawy LED z czterema barwami składowymi	109
Rys. 4.14. Przykładowe widmo promieniowania emitowanego przez model oprawy o czterech barwach składowych	111

