

STRESZCZENIE

Do końca lat 90 XX wieku głównymi sztucznymi źródłami światła stosowanymi w oświetleniu wnętrzowym były źródła żarowe, źródła fluorescencyjne oraz lampy wyładowcze wysokoprężne. 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 emitowanych przez nie promieniowania oraz wysokich kosztów produkcji.

Od początku XXI wieku zauważyć można 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 .

Głównym celem pracy jest opracowanie metody modelowania rozkładu parametrów fotometrycznych i kolorymetrycznych oprawy ze źródłami półprzewodnikowymi, zapewniającą stabilizację natężenia oświetlenia oraz uzyskanie zamierzonej temperatury barwowej najbliższej na powierzchni referencyjnej.

Przed przystąpieniem do rozwiązania postawionego problemu przeprowadzono analizę parametrów spektrofotometrycznych ogólnie dostępnych półprzewodnikowych źródeł promieniowania z zakresu widzialnego. Biorąc pod uwagę cel niniejszej pracy, niezbędnymi parametrami były współrzędne trójkromatyczne x, y emitowanego przez diody światła oraz charakterystyki regulacji ich wyjściowego strumienia świetlnego Φ . Zaprojektowano oraz skonstruowano stanowiska pomiarowe służące do wyznaczania wymienionych parametrów. Na podstawie wyników przeprowadzonych badań wybrano cztery modele diod elektroluminescencyjnych, które wykorzystano w konstrukcjach modeli opraw LED:

- Cree XP-E XPEPHR – Photo Red,
- ProLight 3W PK2N-3LGE-SD – Green,
- Cree XP-C XPCBLU – Blue,
- Cree XP-G XPGBWT – 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 zwiększało stabilność jej punktu chromatyczności. Ponadto wyselekcjonowane diody elektroluminescencyjne charakteryzowały się najwyższą wartością strumienia świetlnego spośród wszystkich poddanych badaniom. Wybór diody Cree XP-G XPGBWT, 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 kilka dostępnych na rynku scalonych czujników koloru:

- TCS3200 (TAOS - Texas Advanced Optoelectronic Solutions),
- TCS3104 (ams AG),
- S9706 (Hamamatsu),
- MTCSiCS (MAZeT GmbH),
- MMCS6CS (MAZeT GmbH).

Na podstawie otrzymanych wyników charakterystyk wyjściowych oraz względnych czułości widmowych zdecydowano się na rozszerzenie obszaru badań do sensorów firmy Mazet: MTCSiCS oraz MMCS6. Po pierwsze układy charakteryzowały się wysoką liniowością sygnału wyjściowego, niezależnie od względnego rozkładu spektralnego promieniowania jakim je oświetlono. Ponadto opracowane tory pomiarowe ze wzmacniaczami transimpedancyjnymi o regulowanym wzmocnieniu, co pozwoliło na uzyskanie szerokiego zakresu pomiarowego obu detektorów. W rozdziale piątym przedstawiono również 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 wskazaniami 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 rozdziale szóstym 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 opracowanych modeli opraw oświetleniowych ze źródłami LED.

Wyniki przeprowadzonych badań laboratoryjnych dowiodły słuszności postawionej tezy, że możliwe jest wytworzenie zamierzonego rozkładu przestrzennego strumienia świetlnego i uzyskanie zamierzonej temperatury barwowej oraz wskaźnika oddawania barw na powierzchni odniesieniowej, poprzez 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 przeświecenia powierzchni w żadnym wariancie nie przekroczyły 8,5% wartości docelowej. Jednak przy temperaturze barwowej światła dziennego równej 2753 K oraz 3327 K kontroler

nie był w stanie odpowiednio wysterować modelu oprawy o trzech źródłach składowych – wynikało to z niskiego strumienia świetlnego diod Cree XP-E XPEPHR.

Bazując na wytycznych normy ANSI C78.377-2011 *Specifications for the Chromaticity of Solid State Lighting* stwierdzono, że we wszystkich rozpatrywanych wariantach układ poprawnie regulował wartość temperatury barwowej najbliższej strumienia świetlnego emitowanego przez model oprawy. W żadnym przypadku, niezależnie od wartości wyjściowego strumienia świetlnego, nie zauważono przekroczenia progów tolerancji określonych w zaleceniach normy ANSI C78.377-2011.

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 oświetlania pomieszczeń, w których stale przebywają ludzie – w żadnym z rozpatrywanych przypadków wskaźnik R_a nie przekroczył wartości 65.

W porównaniu do modelu bazującego 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_{bm} , charakterystycznych dla opraw stosowanych w oświetleniu wnętrzowym, czyli 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 oświetlania wnętrz, w których stale przebywają ludzie.

Za najważniejsze osiągnięcia własne autora uznać należy:

- konstrukcje stanowisk pomiarowych do wyznaczania właściwości spektrofotometrycznych półprzewodnikowych źródeł promieniowania oraz scalonych czujników koloru,
- opracowanie algorytmu sterowania modułem oświetleniowym LED bazującym na trzech barwnych źródłach składowych,
- opracowanie algorytmu sterowania modułem oświetleniowym LED bazującym na czterech źródłach składowych (trzy źródła barwne oraz jedno achromatyczne),
- projekt i wykonanie układu sterowania modułem oświetleniowym LED z optycznym sprzężeniem zwrotnym w postaci scalonego czujnika koloru,
- przeprowadzenie badań laboratoryjnych opracowanych algorytmów oraz modeli opraw oświetleniowych ze źródłami LED.

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*.

Autor planuje kontynuować prace nad konstrukcjami oraz algorytmami sterowania oprawami oświetleniowymi bazującymi na wielu źródłach składowych emitujących promieniowanie barwne oraz achromatyczne. Należy mieć również 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.

Lukasz Budzynski