

WŁAŚCIWOŚCI WIDMOWE ŹRÓDEŁ ŚWIATŁA TYPU SMART LED

Jacek KUSZNIER

Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny
e-mail: j.kusznier@pb.edu.pl

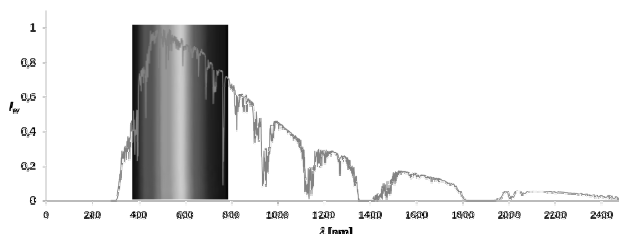
Streszczenie: Światło słoneczne docierające do powierzchni Ziemi charakteryzuje się w zależności od pory dnia dużą zmiennością co do charakteru widmowego jak również wywoływanego przez nie natężenia oświetlenia. Organizm ludzki jest przystosowany do takiego rytmu cyklicznych zmian i wykorzystuje je do regulacji cyklu aktywności dobowej. Na dostosowanie poziomu oświetlenia i widma do naturalnego cyklu dobowego organizmu pozwalają instalacje oświetleniowe wykorzystujące źródła światła typu smart. Spełnić takie wymagania mogą obecnie głównie źródła LED. Artykuł przedstawia wyniki pomiarów charakterystyk widmowych wybranych źródeł. Przedstawione wyniki badań pokazują w jaki sposób kształtują się charakterystyki lamp LED RGB oraz lamp LED wykorzystujących diody niebieskie z luminoforem.

Słowa kluczowe: technika świetlna, lampy LED, miernictwo promieniowania optycznego.

1. PROCES WIDZENIA

Fale elektromagnetyczne o długościach od 380 nm do 780 nm są rejestrowane za pośrednictwem zmysłu wzroku człowieka. Nazywamy je światłem. Jest ono niezbędne do pobudzenia receptorów na siatkówce oka. Światło jest konieczne do wykonywania większości czynności przez człowieka. Potwierdza to fakt, że więcej niż 80% informacji z otoczenia uzyskujemy za pośrednictwem zmysłu wzroku.

Zakres widzialny obejmuje tą część promieniowania słonecznego dla której na powierzchni Ziemi osiąga ono największą wartość (rys. 1). Fale o różnych długościach postrzegamy jako światło o barwach od fioletowej (to jest od 380 nm) do czerwonej (780 nm).



Rys. 1. Względna charakterystyka widmowa promieniowania słonecznego na powierzchni Ziemi (opracowane na podstawie [1, 2])

Percepcja światła jest możliwa dzięki temu, że na siatkówce oka znajduje się około 126 mln receptorów. 120 mln spośród nich to pręciki, które pozwalają jedynie na rejestrowanie jaskrawości. Maksimum ich czułości przypada

na fale o długości 507 nm. Tylko 6 mln receptorów stanowią natomiast czopki. Nie są one rozmieszczone równomiernie na całej powierzchni siatkówki, ale skupiają się głównie w dołku środkowym. Dodatkowo występują one w trzech rodzajach, z których każdy jest wrażliwy na nieco inny zakres widma promieniowania widzialnego.

Czopki S stanowią około 4% wszystkich i posiadają maksimum czułości przy fali o długości 420 nm. Odpowiada to barwie fioletowo-niebieskiej. Czopki M stanowią około 32% posiadają maksimum czułości przy 530 nm. Odpowiada to barwie zielonej. Czopki L stanowią 64% wszystkich, posiadają maksimum przy 560 nm i sięgają zakresem czułości widmowej najdalej w zakres fal czerwonych.

Umożliwia to nam postrzeganie barw. Powoduje to również konieczność mieszania strumieni świetlnych przynajmniej trzech barw (najczęściej czerwonej, zielonej i niebieskiej) w celu uzyskania wrażenia wzrokowego światła białego. Do pobudzenia czopków wymagana jest luminancja większa niż do pobudzenia pręcików. Jest to powodem sytuacji, że jedynie w procesie widzenia dziennego (fotopowego) jesteśmy w stanie postrzegać barwy. Czopki odpowiadają za tworzenie wrażeń wzrokowych przy luminancji w polu widzenia większej niż 3,5 cd/m².

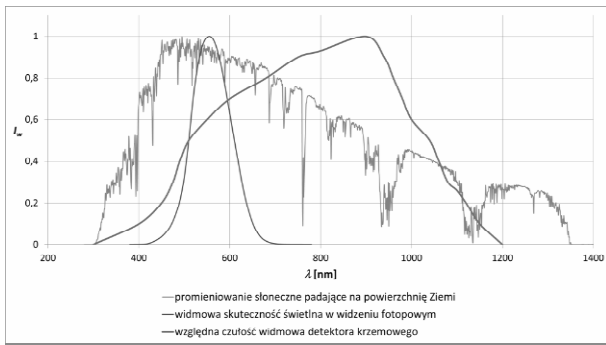
Jeżeli wartość obserwowanej luminancji jest mniejsza od 0,035 cd/m² pobudzone są jedynie pręciki. Taki rodzaj widzenia nie umożliwia rozróżniania barw i nazywamy go widzeniem nocnym (skotopowym).

W warunkach, gdy luminancja ma wartości z przedziału od 0,035 cd/m² do 3,5 cd/m² aktywne są zarówno czopki jak i pręciki. Taki sposób widzenia nazywamy zmierzchowym (mezopowym).

Krzywa względnej czułości widmowej widzenia dziennego $V(\lambda)$ stanowi wypadkową czułości wszystkich czopków i maksimum jej czułości przypada na 555 nm (rys. 2).

Promieniowanie, które daje efekt widzialny zawiera się więc jedynie w wąskim zakresie fal, które obejmuje krzywa $V(\lambda)$.

W celu przeprowadzenia poprawnie pomiarów wielkości świetlnych należy uwzględnić różnice pomiędzy krzywą względną skuteczności świetlnej przy widzeniu fotopowym i krzywą względną czułości użytego detektora. Korekcja widmowa może być przeprowadzona poprzez zastosowanie odpowiedniego zestawu filtrów korygujących w głowicy detektora lub na etapie przeliczania wyników pomiarów.



Rys. 2. Względne charakterystyki widmowe: promieniowania słonecznego na powierzchni Ziemi, widmowej skuteczności świetlnej w widzeniu fotopowym i czułości widmowej detektora krzemowego (opracowane na podstawie [1, 3, 4])

2. ZMIENNOŚĆ DOBOWA WIDMA ŚWIATŁA SŁONECZNEGO

Światło słoneczne docierające do powierzchni Ziemi charakteryzuje się w zależności od pory dnia dużą zmiennością co do charakteru widmowego jak również wywołwanego przez nie natężenia oświetlenia. Organizm ludzki jest przystosowany do takiego rytmu cyklicznych zmian i wykorzystuje je do regulacji aktywności dobowej. Wysoka ekspozycja w ciągu dnia na światło zawierające duży udział promieniowania niebieskiego powoduje, że jesteśmy gotowi do pracy. Światło białe o wysokiej temperaturze barwowej stymuluje fotoreceptory ipRGC. Są to receptory na siatkówce oka, których pobudzenie nie wywołuje wrażeń wzrokowych, ale wpływa na gospodarkę hormonalną organizmu. Pobudzanie ich wyzwała produkcję dopaminy, serotoniny, oraz kortyzolu, a ogranicza wydzielanie melatoniny.

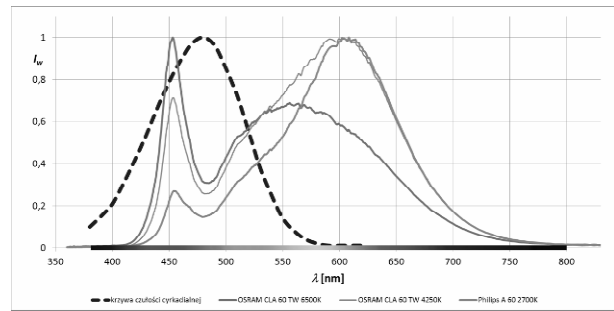
Jeszcze przed 100 latami większość czasu aktywności dziennej człowieka było związane ze światłem naturalnym. Obecnie prawie całą pracę wykonujemy przy oświetleniu elektrycznym. Większość czasu odpoczynku również spędzamy przy świetle sztucznym. Jego widmo zwykle jest niezmiennie w czasie i bardzo odbiega od widma światła słonecznego.

Ekspozycja w godzinach popołudniowych i wieczornych na takie światło, jakie w czasie dnia pomaga nam utrzymać wysoką aktywność powoduje zmniejszenie ilości wydzielanej melatoniny co może skutkować problemami ze snem i odpoczynkiem. Ponieważ obecnie nie jesteśmy w stanie uniknąć ekspozycji na światło sztuczne dla oceny jego potencjalnego oddziaływania na organizm powinniśmy poznać jego charakter widmowy. Za efekty cyrkadialne odpowiada głównie promieniowanie z zakresu od 380 nm do 600 nm. Najsilniejsze oddziaływanie obserwujemy dla fali o długości 460 nm. Jest to promieniowanie o barwie niebieskiej, w obszarze o niskiej czułości widmowej w widzeniu fotopowym. Nie postrzegamy więc w pełni tego promieniowania z siłą odpowiadającą jego oddziaływaniami na cykl cyrkadialny.

Diody LED, w szczególności o barwach chłodnych charakteryzują się wysoką emisją w zakresie omawianych fal (rys. 3). Należy więc ograniczyć korzystanie z tego typu źródeł światła w godzinach popołudniowych i wieczornych.

Na dostosowanie poziomu oświetlenia i widma do naturalnego cyklu aktywności dobowej organizmu pozwalają instalacje oświetleniowe wykorzystujące źródła światła typu smart. Do tej grupy zaliczamy źródła, które dają możliwość regulacji emitowanego strumienia świetlnego jak również

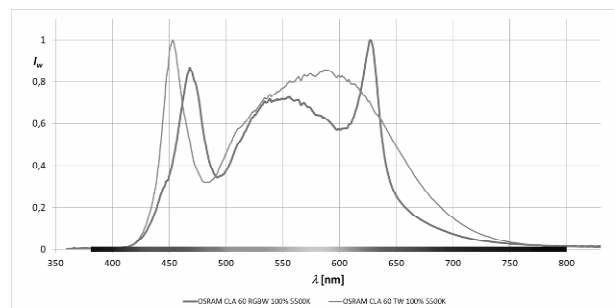
zmiany temperatury barwowej (charakteru widmowego). [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14]



Rys. 3. Krzywa czułości cyrkadialnej oraz charakterystyki widmowe wybranych źródeł typu LED (opracowane na podstawie badań własnych oraz [5])

3. ŹRÓDŁA ŚWIATŁA TYPU SMART LED

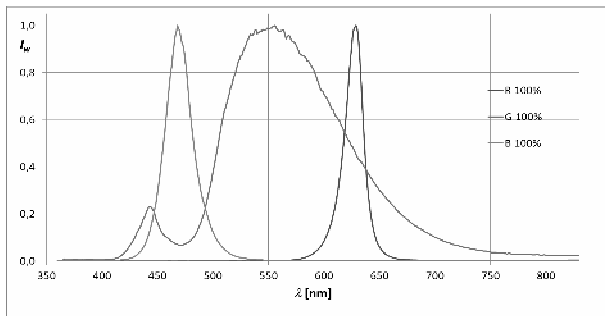
Źródłami światła, które mogą spełnić przedstawione w punkcie 2 wymagania są obecnie głównie źródła LED.



Rys. 4. Widmowa skuteczność świetlna w widzeniu fotopowym oraz charakterystyki widmowe źródeł typu LED o takiej samej wartości temperatury barwowej (opracowane na podstawie badań własnych oraz [3])

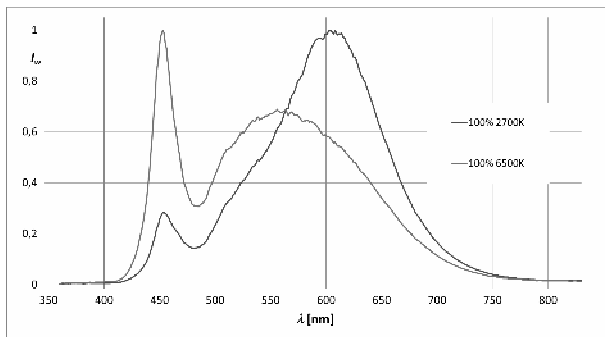
O wartości temperatury barwowej w największym stopniu decyduje udział promieniowania niebieskiego i czerwonego. Należy jednak podkreślić, że źródła charakteryzujące się taką samą temperaturą barwową i wskaźnikiem oddawania barw mają często różniące się w istotny sposób charakterystyki widmowe. Ich kształt zależy w największym stopniu od sposobu, w jaki jest uzyskiwane światło białe. (rys. 4)

W lampach typu RGB obserwujemy wyraźnie trzy lokalne maksima emisji dla barw: niebieskiej, zielonej i czerwonej. Pochodzą one od monochromatycznych diod LED, których strumienie świetlne są addytywnie mieszane w celu uzyskania światła o barwie białej. W celu lepszego odwzorowania barw oświetlanych przedmiotów (uzyskania wyższych wartości wskaźnika oddawania barw) dodawana jest zwykle dodatkowa biała dioda LED. Dioda biała charakteryzuje się większą szerokością widma w zakresie promieniowania emitowanego przez luminofor w porównaniu do szerokości widmowej diod monochromatycznych (czerwonej, zielonej i niebieskiej). Rysunek 5 przedstawia charakterystyki widmowe takiego źródła przy emisji strumienia świetlnego o barwie niebieskiej, zielonej i czerwonej. Przebieg wykresu o barwie zielonej wskazuje na zastosowanie luminoforu, który skutecznie poszerza widmo w zakresie promieniowania zielonego i pozwala na jego lepsze wypełnienie w całym zakresie widzialnym. Lampy takie oznaczamy RGBW.



Rys. 5. Charakterystyki widmowe źródła typu LED RGBW-OSRAM LIGHTIFY CLASSIC A 60 RGBW E27 (opracowane na podstawie badań własnych)

W drugim typie lamp LED światło białe jest uzyskiwane poprzez addytywne mieszanie promieniowania niebieskiego emitowanego przez złącze półprzewodnikowe z promieniowaniem emitowanym przez luminofor w zakresie większych długości fali. Wymieszanie światła niebieskiego (częściowo absorbowanego przez luminofor) z żółtym światłem luminoforu daje w efekcie światło białe. Na charakterystyce widmowej takich źródeł obserwujemy tylko dwa maksima: wąską linię o barwie niebieskiej i szeroką obejmującą promieniowanie od zielonego do czerwonego. O jakości odwzorowania barw decyduje w takim przypadku rodzaj zastosowanego luminoforu. W źródłach typu smart zastosowane są zwykle równocześnie diody LED o barwie ciepłobiałej i chłodnobiałej. Mieszanie emitowanych przez nie strumieni świetlnych pozwala na zmianę temperatury barwowej lampy. Rysunek 6 przedstawia charakterystyki widmowe takiego źródła przy emisji strumienia świetlnego o barwie ciepłej (2700 K) i chłodnej (6500K).



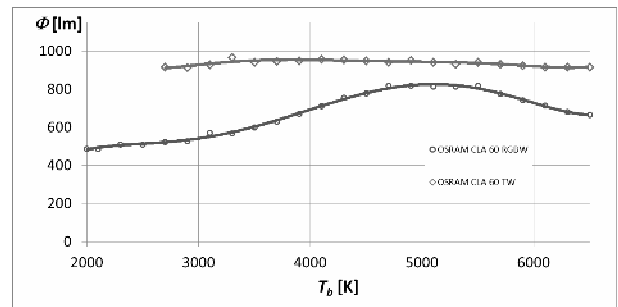
Rys. 6. Charakterystyki widmowe źródła typu LED-OSRAM LIGHTIFY CLASSIC A 60 TW E27 (opracowane na podstawie badań własnych)

4. WYNIKI POMIARÓW PARAMETRÓW ŹRÓDEŁ ŚWIATŁA TYPU SMART LED

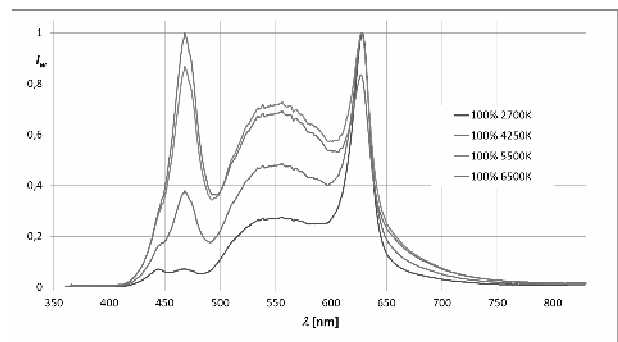
Badaniom zostały poddane źródła światła typu LED umożliwiające regulację zarówno wartości emitowanego strumienia świetlnego jak również temperatury barwowej. Do pomiarów został wykorzystany spektrometr StellarNet Blue-Wave UVIS-50.

Pierwszym z badanych źródeł była lampa OSRAM LIGHTIFY CLASSIC A 60 RGBW E27 w której światło o zadanym charakterze widmowym jest uzyskiwane poprzez mieszanie RGB uzupełnione światłem diody białej. Tego typu rozwiązanie pozwoliło na płynne regulowanie emitowanego strumienia świetlnego w zakresie od 0 do 100% oraz temperatury barwowej (T_b) od 2000 K do 6500 K. Skuteczność świetlna źródła sięgała wartości deklarowanej przez producenta i wynosiła 81 lm/W jedynie w zakresie T_b od 4700 K do 5500 K (rys. 7).

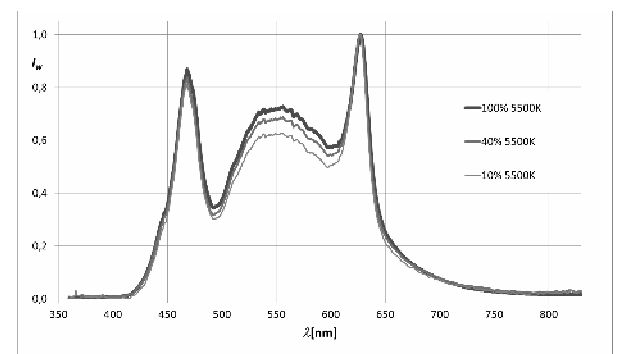
Zmiana zadanej T_b powodowała odpowiednie wysterowanie diod RGB oraz W i poprzez to zmianę charakteru widmowego emitowanego światła (rys. 8). Regulacja poziomu emitowanego strumienia świetlnego powodowała niewielkie zmiany przebiegu charakterystyki widmowej. Największe zmiany zostały zaobserwowane przy $T_b=5500$ K co zostało przedstawione na rysunku 9.



Rys. 7. Zależność strumienia świetlnego badanych źródeł smart LED od T_b (opracowane na podstawie badań własnych)

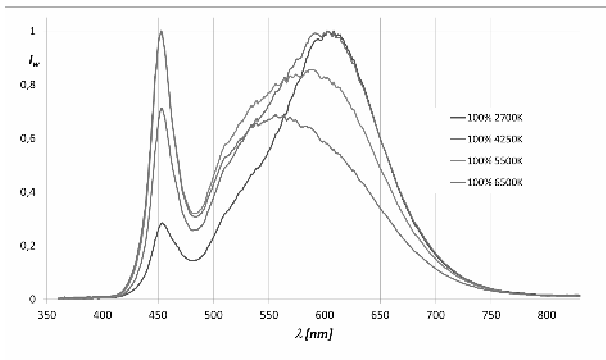


Rys. 8. Charakterystyki widmowe źródła typu LED RGBW-OSRAM LIGHTIFY CLASSIC A 60 RGBW E27 przy różnych T_b (opracowane na podstawie badań własnych)

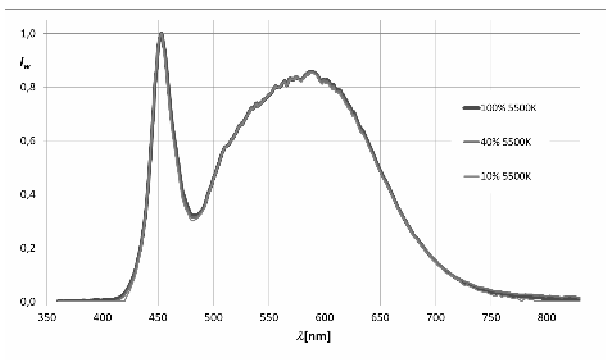


Rys. 9. Charakterystyki widmowe źródła typu LED RGBW-OSRAM LIGHTIFY CLASSIC A 60 RGBW E27 w zależności od wielkości emitowanego strumienia świetlnego (opracowane na podstawie badań własnych)

Drugim z badanych źródeł była lampa OSRAM LIGHTIFY CLASSIC A 60 TW E27. Zmiana temperatury barwowej tej lampy jest uzyskiwane poprzez odpowiednie mieszanie strumieni świetlnych zastosowanych diod LED typu CW (cold white) oraz WW (warm white). Pozwala to na płynną regulację emitowanego strumienia świetlnego w zakresie od 0 do 100% oraz T_b od 2700 K do 6500 K. Skuteczność świetlna źródła była większa od wartości deklarowanej przez producenta (85 lm/W) w całym zakresie regulacji i sięgała 101 lm/W (rys. 7). Zmiana zadanej T_b powodowała odpowiednie wysterowanie diod CW oraz WW i poprzez to zmianę charakteru widmowego emitowanego światła (rys. 10). Regulacja poziomu emitowanego strumienia świetlnego nie powodowała widocznych zmian przebiegu charakterystyki widmowej przy żadnej wartości T_b . Przykładowy przebieg przedstawiony został na rysunku 11.



Rys. 10. Charakterystyki widmowe źródła typu LED– OSRAM LIGHTIFY CLASSIC A 60 TW E27 przy różnych T_b (opracowane na podstawie badań własnych)



Rys. 11. Charakterystyki widmowe źródła typu LED– OSRAM LIGHTIFY CLASSIC A 60 TW E27 w zależności od wielkości emitowanego strumienia świetlnego (opracowane na podstawie badań własnych)

5. PODSUMOWANIE

Potrzeba określenia właściwości widmowych lamp LED i ich oddziaływania na organizm ludzki wymaga pomiarów ich charakterystyk widmowych, a nie określenia tylko wybranych wskaźników jak T_b oraz R_a . Na podstawie uzyskanych wyników należy stwierdzić, że źródła typu smart LED spełniają dobrze wymagania w zakresie dostosowania zarówno poziomu oświetlenia (wielkości emitowanego strumienia świetlnego) oraz dostosowania charakteru widmowego do naturalnego cyklu zmian światła słonecznego.

Praca została wykonana na Wydziale Elektrycznym Politechniki Białostockiej w ramach S/WE/3/2018

6. BIBLIOGRAFIA

1. American Society for Testing and Materials, ASTM G173-03 reference spectra (2013), <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/ASTMG173/ASTMG173.html>.

2. Taylor A., Parkin I., Noor N., Tummeltshammer C., Brown M. S., Papakonstantinou I.: A bioinspired solution for spectrally selective thermochromic VO2 coated intelligent glazing; *Optics Express* Vol. 21, Issue S5, pp. A750-A764 (2013).
3. Żagan W.: Podstawy techniki świetlnej, Oficyna Wydawnicza Polit. Warszawskiej, Warszawa 2005.
4. <http://www.ee.co.za/article/integrating-sphere-data-sincere.html>.
5. Simunovic M. P.: On Seeing Yellow The Case for, and Against, Short-Wavelength Light–Absorbing Intraocular Lenses, *Arch Ophthalmol.* 2012; 130(7):919-926.
6. Fryc I., Jakubowski P., Kołacz K.: Analiza parametrów promieniowania optycznego kompaktowych lamp wyładowczych HID oraz modułów LED COB używanych do oświetlenia witryn sklepowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 93 NR 11/2017, s. 186-189.
7. Zawilska J. B., Czarnecka K.: Melanopsyna nowo odkryty chronobiologiczny receptor światła, *Postępy Biologii Komórki*, Tom 33 2006 NR 2 (229.246).
8. Turlej Z., Lisak E.: Czynniki hormonalne w oświetleniu wnętrza, *Prace Instytutu Elektrotechniki*, zeszyt 228, 2006.
9. Lucas R. J., Peirson S. N., Berson D. M., Brown T. M., Cooper H. M., Czeisler C. A., Figueiro M. G., Gamlin P. D., Lockley S. W., O'Hagan J. B., Price L. L. A., Provencio I., Skene DJ., Brainard G. C.: Measuring and using light in the melanopsin age, *Trends in Neurosciences* January 2014, Vol. 37, No. 1.
10. Wolska A., Sawicki D., Tomczuk K., Mazurek P.: Rozkład widmowy światła sztucznego a skuteczność hamowania wydzielania melatoniny, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 92 NR 9/2016, s. 186-190.
11. Jakubowski P.: Analiza porównawcza parametrów świetlnych źródeł LED oraz OLED w kontekście emisji promieniowania niebieskiego, *Polish Journal for Sustainable Development*, Tom 21 (2) 2017, s. 25-36.
12. Fryc I., Fryc J., Wąsowski K. A.: Rozważania o jakości oddawania barw źródeł światła, wyrażanej wskaźnikiem R_a (CRI), uwzględniające fizjologię widzenia oraz zagadnienia techniczno-prawne, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 92 NR 9/2016, s. 218-223.
13. Marzec S.: Zagrożenie promieniowaniem optycznym lamp LED, *Prace Instytutu Elektrotechniki*, zeszyt 268, 2015, s. 117-122.
14. Jakubowski P., Fryc I.: Metody pomiaru wielkości charakteryzujących promieniowanie optyczne czynne cyrkadialnie, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki PG*, Nr 54/2017, s. 105-108.

SPECTRAL PROPERTIES OF SMART LED LIGHT SOURCES

Sunlight reaching the Earth is characterized by a large variation in the spectral nature depending on the time of day, as well as the intensity of lighting caused by it. Human body is adapted to such a rhythm of cyclical changes and uses it to regulate the cycle of daily activities. Lighting installations which use smart light sources allow to adjust the level of illumination and spectrum to the natural daily cycle of the body. These requirements can now be met mainly by LED sources. The article presents the results of measurements of spectral characteristics of selected sources. Presented results show the characteristics of RGB LED lamps and LED lamps using blue diodes with phosphor.

Keywords: light technique, LED lamps, optical radiation measurements.