

## METODY PROGNOZOWANIA ZMIANY POŁOŻENIA PUNKTU CHROMATYCZNOŚCI ŚWIATŁA EMITOWANEGO PRZEZ ŹRÓDŁA LED W TRAKCIE ICH EKSPLOATACJI

Robert SUPRONOWICZ<sup>1</sup>, Justyna KOWALSKA<sup>2</sup>, Przemysław TABAKA<sup>3</sup>, Cheng QIAN<sup>4</sup>, Jiajie FAN<sup>5</sup>, Irena FRYC<sup>6</sup>

1. Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny
2. Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, Zakład Techniki Świetlnej  
e-mail: justyna.kowalska@ien.pw.edu.pl
3. Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki, Zakład Systemów Elektroenergetycznych  
tel.: 42 6312610 e-mail: przemyslaw.tabaka@wp.pl
4. School of Reliability and Systems Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China  
e-mail: cqian@buaa.edu.cn
5. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China  
e-mail: jay.fan@connect.polyu.hk
6. Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroenergetyki Fotoniki i Techniki Świetlnej  
tel.: +85 7469062 e-mail: i.fryc@pb.edu.pl

Badania zostały zrealizowane w ramach pracy nr S/WE/3/2018 i sfinansowane ze środków na naukę MNiSW

**Streszczenie:** W artykule zaprezentowano dwie metody prognozowania przesunięcia punktu chromatyczności  $u',v'$  zachodzącego w trakcie eksploatacji źródeł LED. Zmierzone w trakcie eksploatacji LEDa rozkłady widmowe mocy promienistej, zostały użyte w metodzie prognozowania bazującej na modelowaniu rozkładu mocy promienistej oraz metodzie regresji nieliniowej opierającej się na wartości współrzędnych położenia punktu chromatyczności  $u',v'$ . Zamieszczono porównanie wyników predykcji zmian położenia punktu chromatyczności wybranymi metodami. W celu weryfikacji dokładności wyników uzyskiwanych przy użyciu obydwu modeli przeprowadzono predykcję wartości  $u',v'$  dla czasu eksploatacji LEDa wynoszącego 9200 h. Wartości otrzymane przy użyciu nieliniowej regresji zmiany  $u',v'$  charakteryzują się wyższą dokładnością od uzyskanych modelowaniem rozkładu widmowego LED.

**Słowa kluczowe:** kolorymetria, LED, rozkład widmowy, współrzędne chromatyczne.

### 1. WSTĘP

Dwudziesty pierwszy wiek w branży oświetlenia profesjonalnego jak i komercyjnego w znacznym stopniu został zdominowany przez białe źródła LED. Użytkownicy tego typu źródeł światła oczekują informacji o jego parametrach i okresie przez który będzie on spełniał swoją funkcję. Elektryczne źródła światła mogą być opisywane różnorodnymi wielkościami i parametrami świetlno-optycznymi. Do typowych wielkości opisujących jakość parametrów świetlnych elektroluminescencyjnych źródeł światła, emitujących promieniowanie barwy białej zalicza się:

- strumień świetlny  $\Phi$  [lm];
- temperatura barwowa  $T_b$  [K]  
lub temperatura barwowa najbliższa  $T_{cb}$  [K];
- skuteczność świetlna  $\eta$  [lm/W];
- maksymalna wartość natężenia prądu pracy  $I$  [A];

- maksymalna moc  $P$  [W];
- położenie punktu chromatyczności;
- rozkład widmowy emitowanego światła;
- regiony chromatyczności (binowanie);
- wskaźnik oddawania barw  $CIE R_a, R_f$  [-];
- trwałość – dla tradycyjnych źródeł światła (tj. takich dla których czas eksploatacji zawiera się w przedziale od 1000 godzin (np. żarówki) do 32 000 godzin (np. wysokoprężne lampy sodowe o podwyższonej trwałości) definiowana jest jako czas po upływie którego 50% badanych lamp nadal świeci. Wraz z pojawieniem się na rynku źródeł LED, wprowadzono inną definicję trwałości, którą oznaczono symbolem  $L_x B_x$ . Parametr ten informuje o wartości procentowej utrzymania początkowego strumienia świetlnego w określonej liczbie badanych źródeł światła. Na przykład symbol „ $L_{70} B_{50}$  10 000 h” informuje że 50% z badanych źródeł światła utrzyma 70% strumienia początkowego w czasie 10 000 godzin [1].

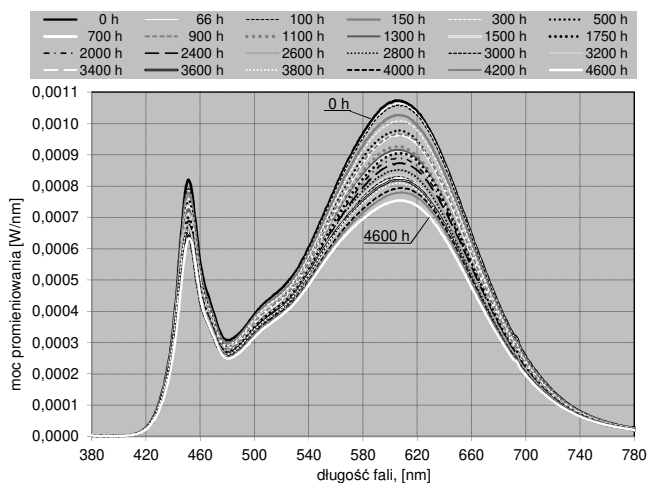
Liczne ośrodki naukowe prowadzą prace badawcze dotyczące wyznaczania parametrów eksploatacyjnych LEDów. W związku z faktem, iż czasy świecenia źródeł LED sięgającą dziesiątków tysięcy godzin, badania dotyczące określania zmian parametrów świetlnych LED-ów w czasie eksploatacji są prowadzone z użyciem metod prognozowania matematycznego.

Spśród wszystkich parametrów istotnych z punktu eksploatacji LEDów jedynie metoda dotycząca metod prognozowania eksploatacyjnych zmian wartości strumienia świetlnego białych LED-ów jest uznana międzynarodowo. Jest nią opracowanie Illuminating Engineering Society of North America IES opublikowane w dokumencie TM-21-11 [2]. Zmiany eksploatacyjne dotyczące wartości pozostałych parametrów LEDów np. rozkładu widmowego, skuteczności świetlnej, temperatury barwowej najbliższej czy położenia

punktu chromatyczności nie zostały jak do tej pory opisane uznanymi międzynarodowo metodami prognozowania. Brak tych metod nie wynika z faktu iż są to zagadnienia marginalne. Wręcz przeciwnie - zagadnienia te są istotne, zarówno z naukowego jak i praktycznego punktu widzenia np. efekt zmiany barwy światła białego instalacji oświetleniowych, w których występuje wiele opraw LED umieszczonych obok siebie, może być uciążliwy dla użytkowników. W celu opisanego parametrów barwy źródła światła należy dysponować danymi pomiarowymi dotyczącymi jego rozkładu widmowego.

## 2. DANE POMIAROWE - ROZKŁAD WIDMOWY MOCY PROMIENISTEJ ŚWIATŁA BIAŁEJ DIODY LED W FUNKCJI CZASU JEJ ŚWIECENIA

W artykule zespołu Cheng Qiana „Prediction of Lumen Depreciation and Color Shift for Phosphor-Converted White Light-Emitting Diodes Based on A Spectral Power Distribution Analysis Method” [3] zaprezentowano zmierzone rozkłady widmowe mocy promienistej światła (rys. 1) emitowanego przez diodę pc-LED (niebieską diodę pokrytą luminoforem emitującą światło o temperaturze barwowej najbliższej wynoszącej 3000 K). Diodę tę zasilono prądem stałym o wartości 180 mA. Temperatura pracy wynosiła 105°C.

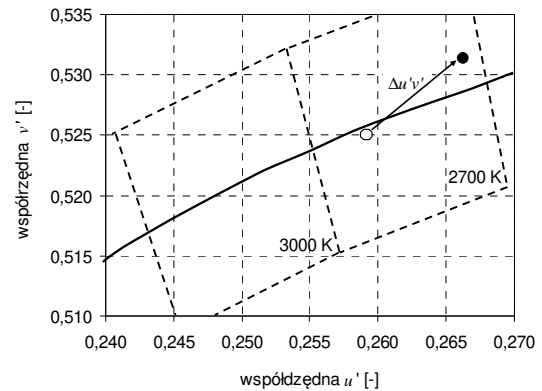


Rys. 1. Zmierzone rozkłady widmowe diody w funkcji czasu świecenia

Z użyciem danych dotyczących rozkładu widmowego określa się położenie punktu chromatyczności (rys. 2) oraz jego przesunięcie  $\Delta u'v'$ , zachodzące podczas eksploatacji danej diody. Zmiany te mogą być określane poprzez wartość, którą definiuje się jako odległość o jaką nastąpiło przesunięcie punktu chromatyczności źródła światła względem jego początkowego położenia. Zgodnie z zaleceniami ANSI C78.377A aby produkt oświetleniowy nie przyczyniał się do powstawania wizualnych różnic w odbieranej przez człowieka barwie, różnica  $\Delta u'v'$  nie może przekraczać  $\pm 0,006$ . Dlatego też pomiary zostały przerwane po 4600 h pracy diody, ponieważ wartość  $\Delta u'v'$  wyniosła 0,007 czyli produkt powinien zostać wycofany z użytkowania.

Określanie tego granicznego momentu jest bardzo istotnym zagadnieniem, ale pomimo działań podjętych w wielu ośrodkach naukowych, brak jest obecnie uznanych międzynarodowo metod umożliwiających prognozowanie zmian  $\Delta u'v'$  światła białych LED. W niniejszym

opracowaniu przedstawiono metodę prognozowania tych zmian z zastosowaniem regresji nieliniowej. W dotychczasowych publikacjach, poświęconym temu zagadnieniu, tego rodzaju metoda nie była opisywana.



Rys. 2. Ilustracja przesunięcia punktu chromatyczności -  $\Delta u'v'$

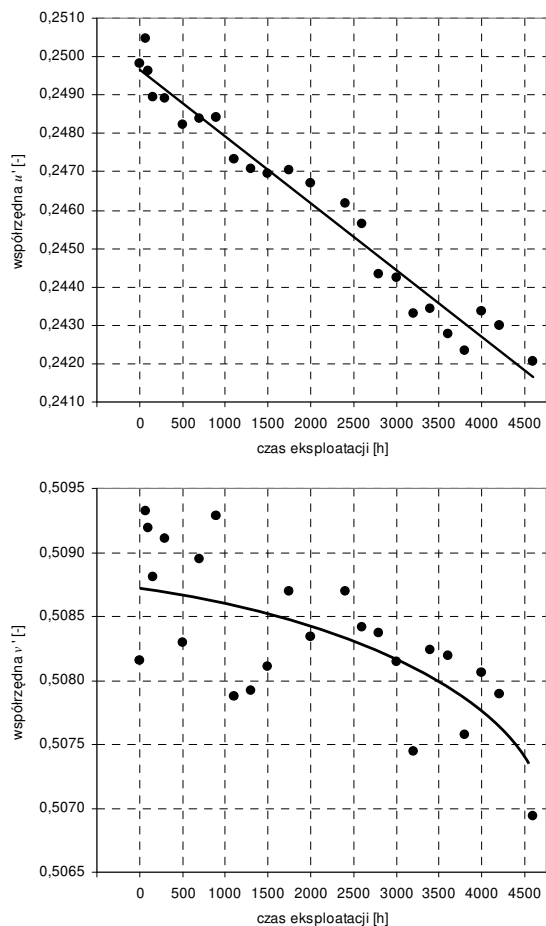
## 3. METODA OPARTA NA NIELINIOWEJ REGRESJI

Dane pomiarowe (rys. 1) zostały wykorzystane w metodzie predykcji zmian przesunięcia punktu chromatyczności diody. Algorytm działania użyty w tej metodzie przedstawiono na rysunku 3. Dla rozkładów widmowych mocy promienistej białego LEDa wyznaczono wartości położenia punktu chromatyczności  $u'v'$  (rys. 4). Następnie wykreślono funkcję dopasowania  $y = c + a \exp^{bx}$  dla tych punktów. Metoda ta została zaimplementowana w środowisku programistycznym R. Efekt dopasowania zilustrowano na rysunku 4.



Rys. 3. Schemat proponowanej metody predykcji położenia punktu chromatyczności

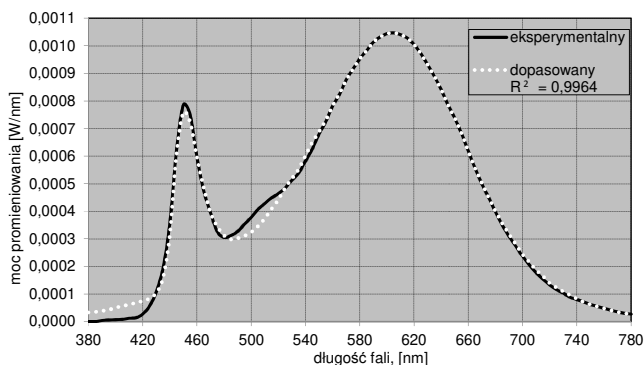
W celu określenia jakości przedstawionej metody prognozowania położenia punktu chromatyczności, uzyskane przy jej użyciu dane porównano z danymi uzyskanymi metodą opisaną przez współautorów tego artykułu w publikacji [3] „Prediction of lumen depreciation and color shift for phosphor-converted white light-emitting diodes based on a spectral power distribution”.



Rys. 4. Wyniki dopasowania współrzędnej chromatycznej  $u' v'$  modelem  $y = a \exp^{bx+c}$

#### 4. METODA PROGNOZOWANIA ZMIAN POŁOŻENIA PUNKTU CHROMATYCZNOŚCI ŚWIATŁA LED BAZUJĄCA NA MODELOWANIU ROZKŁADU WIDMOWEGO

Metoda prognozowania zmian położenia punktu chromatyczności bazująca na modelowaniu rozkładu widmowego została przedstawiona w pracy [3]. Autorzy pracy [3] dokonali, przy użyciu programu Origin dekompozycji zmierzonego (dla czasu 0 h) rozkładu widmowego przy użyciu funkcji  $Asym2sig$  (rys. 5). Jakość dopasowania opisana parametrem  $R^2$  wynosi 0,9964.



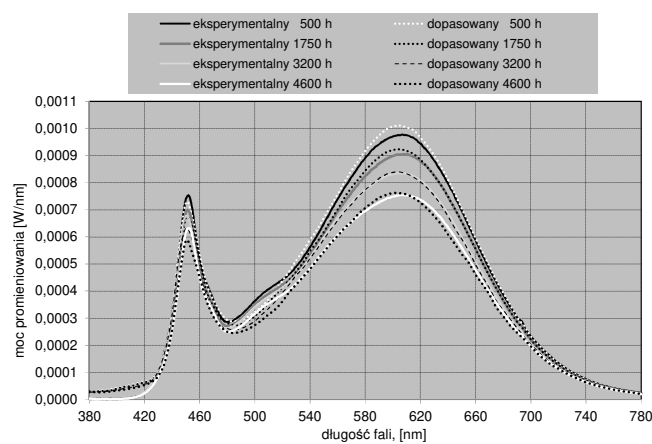
Rys. 5. Rozkład widmowy zmierzony oraz modelowany

Wartości położenia punktu chromatyczności  $u' v'$  dla danych pochodzących z pomiaru oraz zamodelowanych zamieszczono w tabeli 1. Dla każdego zmierzonego rozkładu

widmowego przedstawionego na rysunku 1, wyznaczono krzywą dopasowania, dobierając odpowiednie współczynniki funkcji  $Asym2sig$ . Uzyskane w ten sposób krzywe zamieszczono na rysunku 6 wraz z odpowiadającymi im zmierzonymi rozkładami widmowymi. Otrzymana we wszystkich przypadkach wartość współczynnika  $R^2$  przekracza 0,99 (tabela 2). Wartości przewidywane współrzędnych położenia punktu chromatyczności oraz ich przesunięcia względem wartości zmierzonych eksperymentalnie zamieszczono na rysunku 7.

Tabela 1. Wartości, zmierzonego oraz modelowanego, strumienia świetlnego oraz położenia punktu chromatyczności  $u' v'$

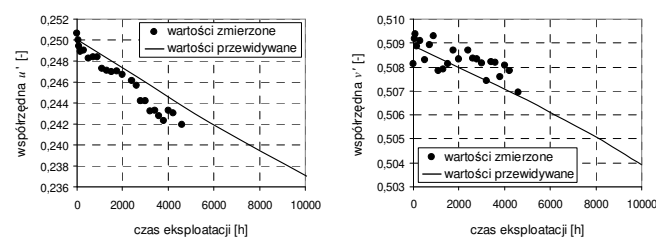
wielkość	rozkład widmowy światła białej diody LED	
	zmierzony	dopasowany ( $Asym2sig$ )
$u'$	0,2498	0,2506
$v'$	0,5082	0,5078



Rys. 6. Zmierzony i modelowany rozkład widmowy diody dla wybranych czasów pracy

Tabela 2. Wskaźnik  $R^2$  dla wybranych czasów pracy diody

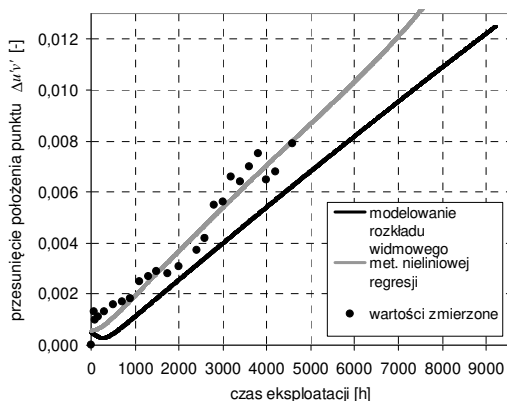
czas	500 h	1750 h	3200 h	4600 h
$R^2$	0,9947	0,9950	0,9938	0,9930



Rys. 7. Wartości współrzędnych chromatycznych  $u' i v'$  wyznaczone dla modelu dopasowania oraz eksperymentalnie

#### 5. PORÓWNANIE DOKŁADNOŚCI PRZEDSTAWIONYCH METOD PROGNOZOWANIA PRZESUNIĘCIA PUNKTU CHROMATYCZNOŚCI $\Delta u' v'$

Porównanie jakości działania obydwu omawianych metod polegało na tym, iż przy ich użyciu prognozowano wartość przesunięcia punktu chromatyczności (rys. 8) w trakcie eksploatacji LEDa przez 9200 h. Czas ten jest dwukrotnością czasu dla którego dysponowano danymi pomiarowymi dotyczącymi rozkładu widmowego mocy promienistej (rys. 1).



Rys. 8. Zestawienie efektów działania prognozowania położenia punktu chromatyczności w odniesieniu do wartości zmierzonych

W tabeli 3 przedstawiono współrzędne położenia punktu chromatyczności  $u'v'$  przy wybranych czasach pracy LEDa.

Tabela 3. Współrzędne  $u'v'$  dla określonego czasu pracy LEDa

Czas [h]	Wartości zmierzone		Metoda rozkładu widmowego		Metoda nieliniowej regresji	
	$u'$	$v'$	$u'$	$v'$	$u'$	$v'$
0	0,24982	0,50815	0,25010	0,50857	0,24978	0,50877
500	0,24826	0,50829	0,24938	0,50838	0,24883	0,50871
1750	0,24708	0,50870	0,24761	0,50787	0,24655	0,50850
3200	0,24329	0,50744	0,24561	0,50723	0,24406	0,50807
4600	0,24199	0,50693	0,24374	0,50658	0,24180	0,50733

Jakość metod prognozowania została określona poprzez różnicę wartości prognozowanych i zmierzonych punktów chromatyczności  $u'v'$  (Tabela 4).

Tabela 4. Różnica zmierzonych i prognozowanych  $u'v'$

Czas [h]	Metoda rozkładu widmowego		Metoda nieliniowej regresji	
	$\Delta u'$	$\Delta v'$	$\Delta u'$	$\Delta v'$
0	0,00028	0,00042	-0,00032	0,00020
500	0,00112	0,00009	-0,00055	0,00033
1750	0,00053	-0,00083	-0,00106	0,00063
3200	0,00232	-0,00021	-0,00155	0,00084
4600	0,00175	-0,00035	-0,00194	0,00075

## CHROMATICITY SHIFT PREDICTION METHODS FOR WHITE PHOSPHOR-CONVERTED LED

The chromaticity shift  $\Delta u'v'$  in white LEDs are occurring during the exploitation of this type of light sources. The spectral power distributions measured during LED exploitation can be used for calculation of chromaticity shift. Due to long LED lifetime is important to have mathematical methods which could predict their chromaticity shift. The article presents the method of white LED chromaticity shift prediction. The method was based on nonlinear regression of chromaticity coordinates  $u'v'$  by R software. For compaction was taken chromaticity shift prediction by modeling the spectral power distribution of LEDs described in the paper Qian C.; Fan J.; Fan X.; Zhang G.: "Prediction of lumen depreciation and color shift for phosphor-converted white light-emitting diodes based on a spectral power distribution". The chromaticity shift values obtained using non-linear regression of  $u'v'$  are given with higher accuracy than obtained by modeling the spectral power distribution of LEDs. It is worth noting that methods of chromaticity shift prediction can be also used to determine the durability of LED's luminous flux, color rendering and efficacy.

**Keywords:** colorimetry, LED, spectral power distribution, chromaticity shift.

W tabeli 5 zamieszczono informacje dotyczące wartości przesunięcia punktu chromatyczności  $\Delta u'v'$  oraz dokładności określania tego przesunięcia wyznaczonego obydwoima omawianymi metodami prognozowania. Z danych zawartych w tabeli 5 wynika, iż metoda regresji liniowej zapewnia większą dokładność prognozowania położenia punktu chromatyczności niż modelowanie rozkładu widmowego przyjętą w artykule [3] funkcją.

Tabela 5. Wartości przesunięcia punktu chromatyczności w wybranych czasach i dokładność metod prognozowania

Czas [h]	Wartości $\Delta_{ZM}$	Metoda rozkładu		Metoda nieliniowej regresji	
		$\Delta_{RW}$	$\Delta_{ZM} - \Delta_{RW}$	$\Delta_{NR}$	$\Delta_{ZM} - \Delta_{NR}$
0	0,0000	0,0005	-0,0005	0,0006	-0,0006
500	0,0016	0,0005	0,0011	0,0011	0,0005
1750	0,0028	0,0022	0,0006	0,0033	-0,0005
3200	0,0066	0,0043	0,0023	0,0057	0,0009
4600	0,0079	0,0063	0,0016	0,0080	-0,0001
9200	-	0,0125	-	0,0178	-

## 6. WNIOSKI

Wykazano, iż predykcja zmian położenia punktu chromatyczności  $\Delta u'v'$  na podstawie wartości współrzędnych położenia punktu chromatyczności  $u'v'$  charakteryzuje się wyższą dokładnością obliczeń niż prognozowanie z użyciem metody modelowania rozkładu widmowego. Jakość metod prognozowania została określona jako wartość różnicy wartości prognozowanych i zmierzonych punktów chromatyczności. Warto również zauważyć, iż omawiane metody prognozowania mogą być także rozwijane w kierunku ich zastosowań np. do określania wskaźników oddawania barw.

## 7. BIBLIOGRAFIA

1. DIN IEC/PAS 62 717
2. IES TM-21-11
3. Qian C.; Fan J.; Fan X.; Zhang G.: Prediction of Lumen Depreciation and Color Shift for Phosphor-Converted White Light-Emitting Diodes Based on a Spectral Power Distribution; Analysis Method IEEE Access (Vol. 5), 2017; s. 24054 - 24061