Przemysław Ptak
Akademia Morska w Gdyni

MODELOWANIE CHARAKTERYSTYK WYBRANYCH DIOD LED MOCY Z UWZGLĘDNIENIEM ZJAWISK CIEPLNYCH

W pracy rozważany jest problem modelowania diod LED mocy przy wykorzystaniu programu Spice. Przedstawiono autorski elektro-termiczno-optyczny model diod LED, uwzględniający zjawiska elektryczne w poszczególnych diodach LED, samonagrzewanie oraz zjawiska optyczne. Poprawność modelu zweryfikowano doświadczalnie zarówno w warunkach pracy statycznej, jak i dynamicznej dla diod LED firmy CREE typu XML, XPE oraz MCE. Uzyskano dobrą zgodność między wynikami pomiarów i obliczeń.

Słowa kluczowe: *diody LED mocy, zjawiska termiczne, SPICE.*

WSTĘP

Półprzewodnikowe źródła światła są coraz powszechniej wykorzystywane w technice oświetleniowej i motoryzacyjnej [7, 9, 11, 17, 19, 20]. W ostatnich latach można zauważyć polepszenie się parametrów eksploatacyjnych oraz spadek cen pojedynczych diod LED [20]. Właściwości półprzewodnikowych źródeł światła LED produkowanych obecnie umożliwiają uzyskanie dużych wartości strumienia świetlnego, wysokiej skuteczności świetlnej oraz długiego czasu życia liczonego w dziesiątkach tysięcy godzin bezawaryjnej pracy [10].

Jak wykazano w pracy [3], w czasie pracy rozważanych elementów półprzewodnikowych temperatura ich wnętrza wzrasta na skutek zjawisk cieplnych, tzn. samonagrzewania oraz wzajemnych sprzężeń cieplnych między elementami umieszczonymi na wspólnym podłożu. W celu uwzględnienia wpływu tych zjawisk na charakterystyki elektryczne i optyczne oraz na temperaturę wnętrza tych elementów niezbędne są elektrotermiczne modele rozważanych elementów [1, 4, 12, 13, 16, 18].

Pojedyncze diody LED są elementami składowymi całych systemów oświetleniowych. Do konstrukcji systemów oświetleniowych lub do optymalizacji ich bryły świetlnej potrzebne są modele komputerowe opisane w pracach [1, 8, 14]. Bardzo często programem wykorzystywanym do wykonywania symulacji komputerowych jest Spice [1, 14, 15].

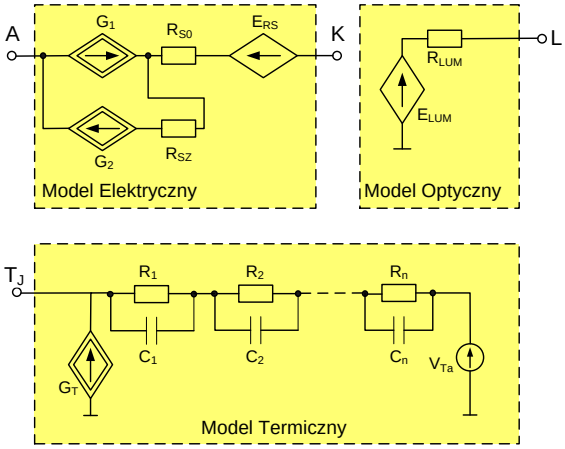
W pracach [4, 13] przedstawiono modele elektrotermiczne diod LED, uwzględniające ich właściwości elektryczne, termiczne oraz optyczne przy pracy w warunkach statycznych dla polaryzacji w kierunku przewodzenia. W pracy [18]

omówiono model elektrotermiczny diody LED spolaryzowanej w kierunku zaporowym oraz przewodzenia, uwzględniający także zakres przebicia badanych elementów, jednak nieuwzględniający inercji termicznej. Model uwzględniający inercję termiczną przedstawiono w pracy [4].

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki pomiarów i obliczeń charakterystyk diod LED firmy CREE z rodziny XLamp. W kolejnych rozdziałach zaprezentowano postać zastosowanego modelu elektro-termiczno-optycznego oraz uzyskane wyniki eksperymentalne badanych diod LED.

1. POSTAĆ ELEKTRO-TERMICZNO-OPTYCZNEGO MODELU DIODY LED

Na rysunku 1 przedstawiono reprezentację obwodową elektro-termiczno-optycznego modelu diody LED. Model ten zawiera trzy bloki reprezentujące model elektryczny, optyczny i skupiony model termiczny, umożliwiający wyznaczenie temperatury wnętrza T_J diody LED przy uwzględnieniu zjawiska samonagrzewania. Opis modelu elektrycznego oraz optycznego wraz z zależnościami analitycznymi zawarto w pracach [4, 8].



Rys. 1. Postać autorskiego dynamicznego modelu elektro-termiczno-optycznego diody LED

Fig. 1. *The network power LEDs, thermal phenomena representation of the original dynamic electro-thermalo-optical model of the power LED*

Jak już wspomniano, model termiczny umożliwia wyznaczenie temperatury wnętrza badanej diody LED. Wartość tej temperatury odpowiada napięciu w węźle T_J. Sterowane źródło prądowe G_T reprezentuje moc cieplną wydzielaną w badanym elemencie. Sieć RC reprezentuje przejściową impedancję termiczną w rozważanych diodach LED oraz modeluje przepływ ciepła między wnętrzem badanego elementu

a otoczeniem, liczba zaś elementów RC zależy od zastosowanego systemu chłodzenia. Źródło napięciowe V_{Ta} reprezentuje temperaturę otoczenia T_a.

Moc cieplna wydzielana w elemencie LED stanowi różnicę między mocą elektryczną pobieraną przez ten element ze źródła zasilania i mocą emitowanego promieniowania. Zgodnie z zależnością przedstawioną w pracy [1], moc optyczna stanowi iloczyn mocy elektrycznej oraz sprawności konwersji energii elektrycznej na światło. Sprawność ta jest proporcjonalna do skuteczności świetlnej diody LED, podawanej przez producenta.

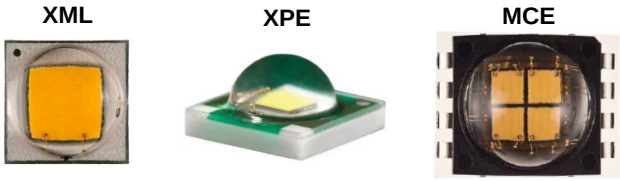
Sposób wyznaczania wartości parametrów modelu elektrycznego i optycznego przedstawiono w pracy [3], natomiast wyznaczenie wartości elementów modelu termicznego wymaga zmierzenia własnej przejściowej impedancji termicznej każdej badanej diody dla wszystkich rozpatrywanych warunków chłodzenia. Sposób pomiaru tych przejściowych impedancji termicznych opisano w pracach [2, 3], natomiast algorytm wyznaczania wartości elementów RC w modelu termicznym w postaci sieci Fostera przedstawiono w pracy [6].

2. WYNIKI OBLICZEŃ I POMIARÓW

Wykorzystując opisany w poprzednim rozdziale elektro-termiczno-optyczny model diody LED, obliczono nieizotermiczne charakterystyki badanych diod, pracujących przy różnych warunkach zasilania i chłodzenia. Układ do pomiaru parametrów elektrycznych, termicznych i optycznych przedstawiono w pracy [5].

Na rysunku 2 pokazano obudowy, natomiast w tabeli 1 zebrano wartości podstawowych parametrów badanych diod LED firmy CREE z rodziny XLamp. Uzyskane wyniki obliczeń porównano z wynikami pomiarów.

Na rysunkach 3–6 przedstawiono uzyskane wyniki obliczeń i pomiarów, które oznaczono odpowiednio za pomocą linii i punktów.



Rys. 2. Widok obudów badanych diod LED

Fig. 2. *Views of packages of the investigated diodes*

Tabela 1. Wartości wybranych parametrów badanych diod LED

Table 1. *Values of selected parameters of the investigated diodes*

Typ diody	P_H [W]	I_{FMAX} [A]	Φ_V [lm]	Typ obudowy
Xlamp XML	10	3	341 @ I_F=0,35A	SMD
Xlamp XPE	3	1	122 @ I_F=0,35A	SMD
Xlamp MCE	2,8	0,7	100 @ I_F=0,35A	SMD

Badania przeprowadzono dla diod LED umieszczonych na radiatorze o wymiarach 180 x 118 x 8 mm (duży radiator) oraz na podłożu MCPCB (bez radiatora). Dla wszystkich rozważanych warunków chłodzenia badanych diod LED uzyskano inne wartości parametrów modelu termicznego, które zostały zestawione w tabeli 2. Analizując wartości termicznych stałych czasowych dla każdej z rozpatrywanych diod, można zauważyć, że wraz ze zmniejszaniem wymiarów układu chłodzącego maleje wartość najdłuższej termicznej stałej czasowej.

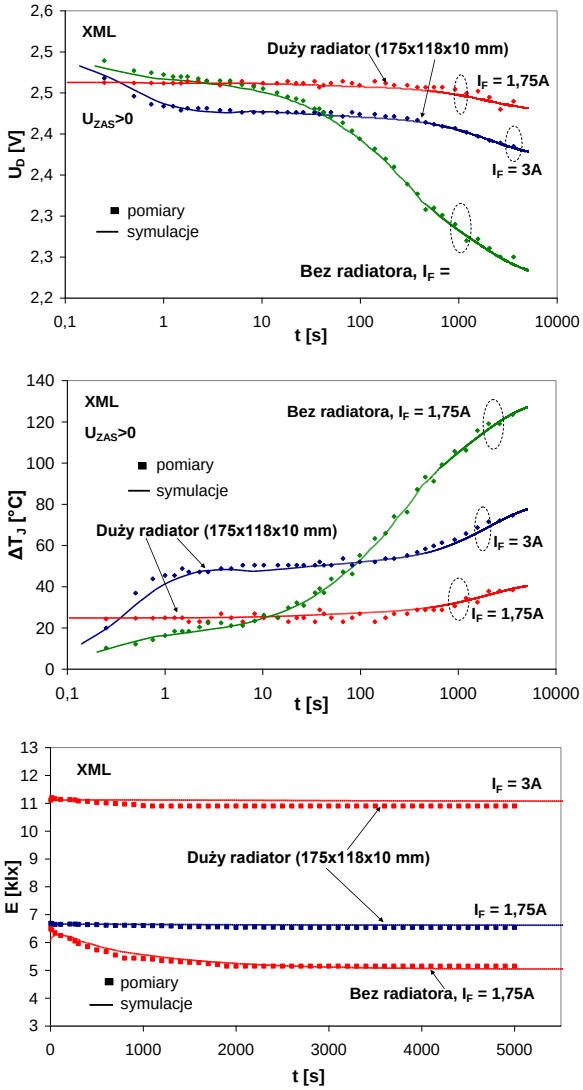
Tabela 2. Wartości parametrów termicznych badanych diod LED

Table 2. *Values of thermal parameters of the investigated diodes*

	XML		XPE		MCE	
Parametr	Duży radiator	Brak radiatora	Duży radiator	Brak radiatora	Duży radiator	Brak radiatora
R_{th} [K/W]	13	37	23	41,7	12,07	29,66
a_1	0,376	0,264	0,246	0,199	0,504	0,293
τ_1 [s]	2078,12	938,45	2724,97	1244,56	2253,47	1137,6
a_2	0,044	0,483	0,076	0,442	0,028	0,495
τ_2 [s]	28,98	201,13	329,84	224,33	484,58	214,45
a_3	0,58	0,098	0,098	0,097	0,468	0,097
τ_3 [s]	0,49	29,63	4,45	34,56	0,00004	51,43
a_4		0,03	0,576	0,041		0,018
τ_4 [s]		3,28	0,28	2,53		8,59
a_5		0,123	0,004	0,221		0,097
τ_5 [ms]		298	0,04	251		0,04
a_6		0,002				
τ_6 [ms]		0,04				

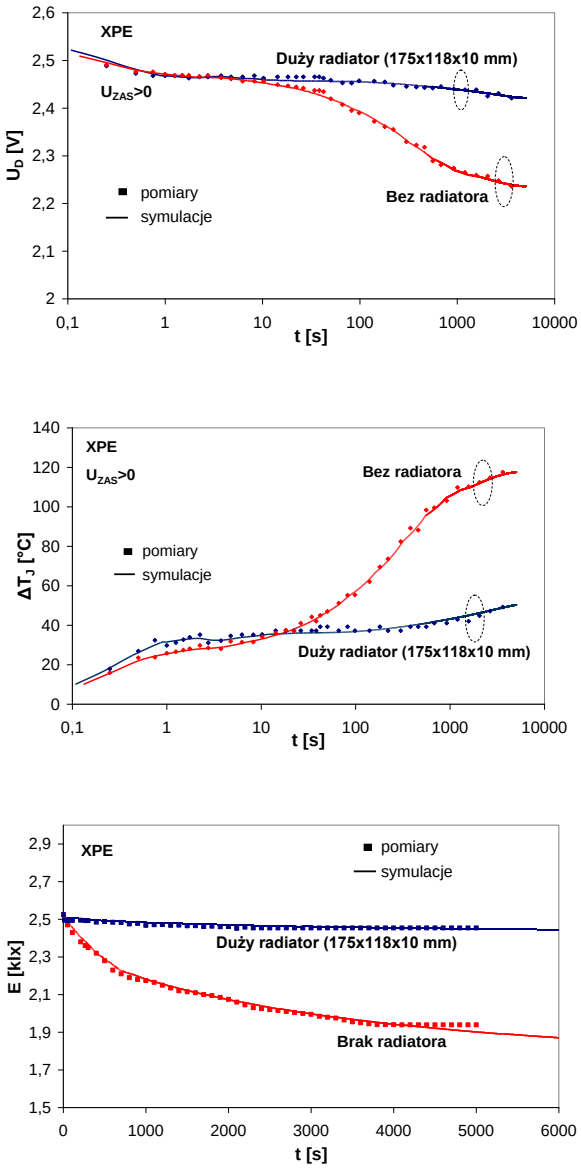
Rysunki 3–5 ilustrują obliczone i zmierzone czasowe przebiegi napięcia, przyrostu temperatury wnętrza oraz natężenia oświetlenia dla diod typu XML, XPE oraz MCE przy różnych warunkach chłodzenia. Jak można zauważyć na tych rysunkach, wartość natężenia oświetlenia stabilizuje się po czasie równym około 4000 s, przy czym czas ten jest uzależniony od warunków chłodzenia oraz od prądu zasilania badanych elementów LED. Wyraźnie widać, że przy zastosowaniu dużego radiatora spadek wartości natężenia oświetlenia jest prawie niewidoczny i wynosi kilka procent dla badanych elementów, natomiast przy braku radiatora dochodzi nawet do 23% dla diody typu XPE, 20% dla diody typu XML oraz 7% dla diody typu MCE. Zaobserwowano, że zależność $E(t)$ jest funkcją malejącą na skutek

wzrostu temperatury wnętrza badanych diod LED. Jak należało oczekiwać, wzrost rozmiarów układu chłodzenia oraz spadek wartości prądu polaryzacji powoduje zmniejszenie wartości przyrostu temperatury ΔT_J. Odpowiednio dla diody typu XML wartość różnicy temperatury wynosi 86°C przy prądzie I_F = 1,75 A, dla diody typu XPE – 68°C przy prądzie I_F = 1A oraz dla diody typu MCE – 32°C przy prądzie I_F = 0,7 A. Analizując wyniki pomiarów oraz obliczeń, można stwierdzić, że opisany model zapewnia dobrą zgodność między wynikami obliczeń i pomiarów.



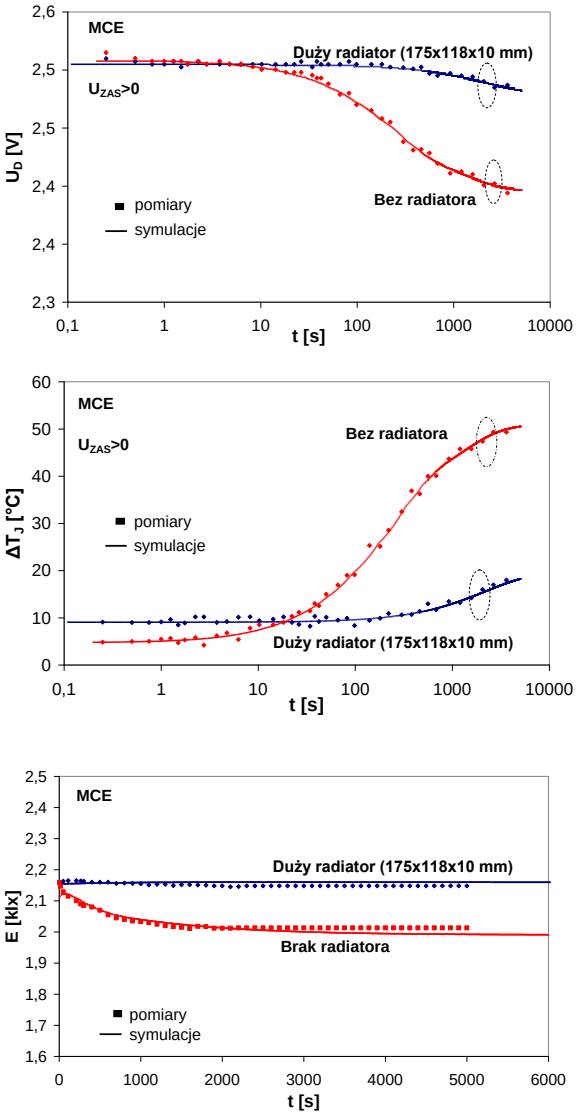
Rys. 3. Obliczone i zmierzone czasowe przebiegi napięcia, przyrostu temperatury wnętrza oraz natężenia oświetlenia diody typu XML

Fig. 3. *Calculated and measured waveforms of the excess of the internal temperature over ambient one and illuminance of the XML LED family*



Rys. 4. Obliczone i zmierzone czasowe przebiegi napięcia, przyrostu temperatury wnętrza oraz natężenia oświetlenia diody typu XPE

Fig. 4. *Calculated and measured waveforms of the excess of the internal temperature and illuminance of the XPE LED family*

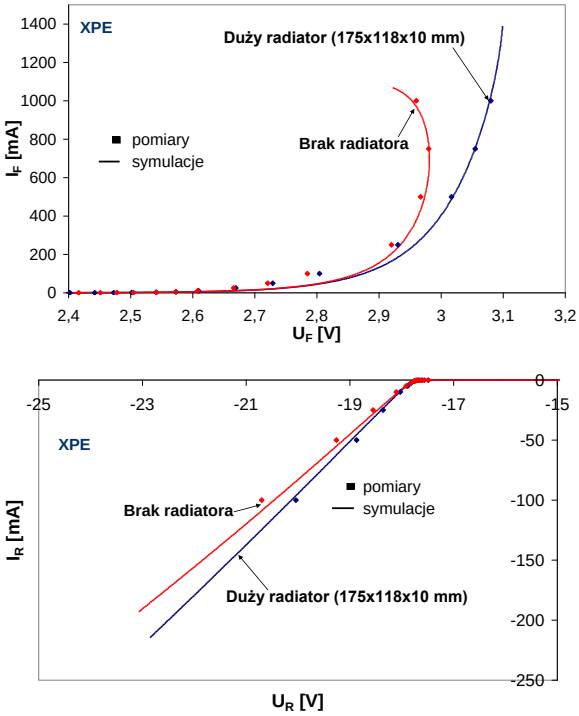


Rys. 5. Obliczone i zmierzone czasowe przebiegi napięcia, przyrostu temperatury wnętrza oraz natężenia oświetlenia diody typu MCE

Fig. 5. *Calculated and measured waveforms of the excess of the internal temperature and illuminance of the MCE LED family*

Na rysunku 6 pokazano obliczone i zmierzone charakterystyki prądowo-napięciowe diody LED typu XPE. Diody podczas badań eksperymentalnych były spolaryzowane kolejno w kierunku zaporowym oraz w kierunku przewodzenia, co pozwoliło przeanalizować działanie opracowanego modelu diod LED dla różnych warunków polaryzacji. Pomiary i symulacje wykonano przy dwóch różnych

warunkach chłodzenia. Analizując charakterystyki prądowo- napięciowe w kierunku przewodzenia, można zauważyć, że dioda pracująca bez radiatora wykazuje ujemną wartość rezystancji dynamicznej w zakresie dużych prądów przewodzenia. Z kolei, analizując charakterystyki prądowo-napięciowe rozważanej diody w obu zakresach jej pracy, można stwierdzić poprawność zaproponowanego modelu elektro-termiczno-optycznego w całym dopuszczalnym zakresie pracy tego elementu.



Rys. 6. Charakterystyki elektryczne diody typu XPE dla różnych warunków chłodzenia

Fig. 6. *DC forward characteristics of the XPE LED family for the different cooling conditions*

PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono wyniki symulacji i pomiarów charakterystyk diod LED mocy firmy CREE typu XML, XPE i MCE, stosowanych w technice oświetleniowej oraz motoryzacyjnej. Zaproponowano autorski model elektro-termiczno-optyczny diod LED dla programu Spice, uwzględniający właściwości elektryczne, optyczne i cieplne tych elementów. Poprawność opracowanego modelu zweryfikowano doświadczalnie dla rozważanych diod LED mocy, pracujących przy różnych warunkach chłodzenia oraz polaryzacji.

Uzyskano dobrą zgodność między wynikami obliczeń i pomiarów zarówno dla diod LED pracujących w warunkach statycznych, jak i dynamicznych. Zgodność ta potwierdza poprawność opracowanego modelu. Przedstawione wyniki obliczeń i pomiarów potwierdzają istotny wpływ zjawisk cieplnych na przyrost temperatury wnętrza i natężenie oświetlenia badanych diod LED mocy.

LITERATURA

1. Górecki K., *Electrothermal model of a power LED for SPICE*, International Journal of Numerical Modelling Electronic Network, Devices and Fields, Vol. 25, 2012, No. 1, s. 39–45.
2. Górecki K., *Measurements of thermal resistance of power LEDs*, Microelectronics International, Vol. 31, 2014, No. 3, s. 217–223.
3. Górecki K., *The influence of mutual thermal interactions between power LEDs on their characteristics*, 19th International Workshop on Thermal Investigations of IC's and Systems Therminic, Berlin 2013, s. 188–193.
4. Górecki K., Ptak P., *Modelling power LEDs with thermal phenomena taken into account*, Proceedings of 22nd International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems MIXDES, Toruń 2015, s. 431–435.
5. Górecki K., Ptak P., *The influence of the mounting manner on thermal and optical parameters of power LEDs*, International Journal of Microelectronics and Computer Science, Vol. 6, 2015, No. 1, s. 23–28.
6. Górecki K., Zarębski J., *Estymacja parametrów modelu termicznego elementów półprzewodnikowych*, Kwartalnik Elektroniki i Telekomunikacji, 2006, nr, 3, s. 347–360.
7. *High power automotive forward lighting LED*, Philips Lumileds, December 2013, www.philips lumileds.com/uploads/15/AB35-pdf.
8. Huang S., Wu H., Fan B., Zhang B., Wang G., *A chip-level electrothermal-coupled design model for high-power light-emitting diodes*, Journal of Applied Physics, Vol. 107, 2010, No. 5, s. 054509–054509-8.
9. Lasance C.J.M., Poppe A., *Thermal management for LED applications*, Springer Science+Business Media, New York 2014.
10. Magdziak R., *Oświetlenie LED. Raport techniczno-rynkowy*, „Elektronik", 2014, nr, 4, s. 28–52.
11. Mroziewicz B., *Biało świecące diody LED rewolucjonizują technikę oświetleniową*, „Elektronika", 2010, nr, 9, s. 145–154.
12. Poppe A., *A step forward in multi-domain modeling of power LEDs*, 28th Annual IEEE Semiconductors Thermal Measurement and Management Symposium SEMI-THERM, San Jose 2012, CA, s. 325–330.
13. Poppe A., *Multi-domain compact modeling of LEDs: An overview of models and experimental data*, Microelectronics Journal, Vol. 46, 2015, pp.1138–1151.
14. Poppe A., Farkas G., Szekely V., Horvath G., Rencz M., *Multi-domain simulation and measurement of power LEDs and power LED assemblies*, 22nd Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, Dallas 2006, s. 191–198.
15. Poppe A., Lasance C.J.M., *On the standardization of thermal characterization of LEDs*, 25th IEEE SEMI-THERM Symposium, 2009, s. 151–158.

16. Poppe A., Szalai A., *Practical aspects of implementation of a multi-domain LED model*, 30th Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium SEMI-THERM, San Jose 2014, CA, s. 153–158.
17. Ptak P., Górecki K., *Elements of cooling system sof Power LEDs*, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, 2014, nr 84, s. 118–133.
18. Ptak P., Górecki K., *Modelling reverse characteristics of power LEDs with thermal phenomena taken into account*, 39th International Conference IMAPS-CPMT Poland, paper no. 143, Gdańsk 2015.
19. Schubert E.F., *Light emitting diodes. Second edition*, Cambridge University Press, New York 2008.
20. Weir B., *Driving the 21st century's lights*, IEEE Spectrum, Vol. 49, 2012, No. 3, s. 42–47.

MODELLING CHARACTERISTICS OF THE SELECTED POWER LEDS WITH THERMAL PHENOMENA TAKEN INTO ACCOUNT

Summary

In the paper the manner of the modelling of power LED with the use of the SPICE software is presented. The new electro-thermal-optical model of power LED diodes taking into account both electric phenomena, self-heating and optical phenomena in selected LEDs is proposed. The correctness of the model is verified experimentally both in the steady state and in dynamic operation of LED XML, XPE and MCE type from CREE Company. The good agreement between results of calculations and measurement is obtained.

Keywords*: thermal phenomena, SPICE, power LEDs.*