

System do wyznaczania rzeczywistej temperatury złącza wielokolorowych diod LED

Streszczenie. W artykule przedstawiono sposób pomiaru temperatury złącza diod LED RGB dużej mocy. Opracowano i wykonano system pomiarowy z komorą termiczną oraz przeprowadzono szereg badań w typowych warunkach pracy opraw oświetleniowych z diodami elektroluminescencyjnymi. Zbadano wpływ poszczególnych chip-ów na temperaturę sąsiadujących złączy. Uzyskane wyniki pozwalają na właściwe konstruowanie kompletnego systemu oświetleniowego wykorzystującego wielozłączone LEDy do pracy w zakresie temperatury otoczenia od 0°C do +100°C, szczególnie w aspekcie dopasowania efektywnego układu zasilania w oprawach oświetlenia awaryjnego i ewakuacyjnego.

Abstract. This paper describes electrical method for measuring junction temperature of high power LEDs. Designed and constructed system with thermal chamber and performed a number of studies in typical operating conditions luminaires with LEDs. The results allow for proper construction of a complete LED lighting system using for operation in ambient temperatures ranging from -10°C to 100°C, especially in terms of matching the effective supply in emergency and evacuation lighting fittings. **Electrical method for measuring junction temperature of high power LEDs**

Słowa kluczowe: LED, temperatura, zasilanie, pomiary.

Keywords: LED, temperature, power supply, measurements

Wstęp

W ciągu ostatnich kilku lat dynamiczny rozwój technologii wytwarzania źródeł światła sprawił, że diody elektroluminescencyjne LED stały się źródłami światła o wydajności akceptowalnej do typowych zastosowań [1]. Wzrost skuteczności świetlnej, jak też wzrost strumienia świetlnego z pojedynczego chipu LED sprawiły, że bez kłopotu półprzewodnikowe emiterzy promieniowania zastępują klasyczne źródła żarowe oraz stają się silną konkurencją dla źródeł fluorescencyjnych. Dzięki opracowaniu technologii umożliwiającej wykonywanie wielozłączeniowych diod RGB, są często wykorzystywane w urządzeniach o dynamicznie zmiennej barwie emitowanego światła. Nie bez znaczenia pozostaje fakt dużej trwałości diod LED, która często przekracza 50 tys. godzin, w porównaniu do źródeł konwencjonalnych, charakteryzującymi się znacznie krótszym czasem trwałości.

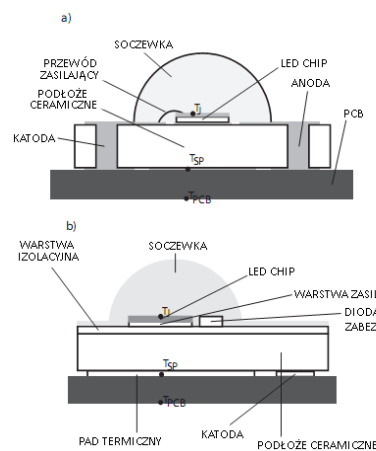
Właściwości fotometryczne oraz trwałość diod elektroluminescencyjnych w znacznej mierze zależą od temperatury złącza diody. Wzrost temperatury złącza powoduje spadek strumienia świetlnego oraz nadmierną degradację struktury chipu diody. Badania [2] wykazują, że około 70% uszkodzeń LED-ów spowodowanych jest zbyt wysoką temperaturą złącza, a zmiany strumienia świetlnego są funkcją degradacji luminoforu pod wpływem oddziaływania podwyższonej temperatury.

Wielu producentów dość nieprecyzyjnie podaje parametry swoich produktów lub podaje je dla warunków, które praktycznie nie występują w czasie pracy diody w oprawie oświetleniowej. Utrudnia to projektantom zoptymalizowanie układu pod względem termicznym, pogarszając tym samym osiągi lampy. Brak wiedzy w tym zakresie prowadzić może do dwóch błędnych rozwiązań. Pierwszym jest przewymiarowanie układu chłodzącego diodę, co w konsekwencji podraża konstrukcję. Drugie rozwiązanie związane jest z niedopasowaniem radiatora lub całego systemu chłodzącego, które jest wynikiem błędnej analizy dokumentacji technicznej rozpatrywanej diody LED.

Temperatura złącza i rezystancja termiczna

Przekroje konstrukcji współczesnych wysokowydajnych LED-ów mocy przedstawiono na rysunku 1. Jak widać są one do siebie zbliżone. Chip diody z wyprowadzonymi kontaktami elektrycznymi umieszczony został na specjalnym rdzeniu ceramicznym o wysokim współczynniku przewodności cieplnej. Jest to konieczne, ponieważ niemal całe cie-

pło wytworzone w obszarze złącza jest odprowadzane tą drogą poza obudowę diody. Jak wykazano w pracy [3] taka budowa posiada pewną rezystancję oraz pojemność termiczną. Znając ich wartości można, na podstawie temperatury płytki drukowanej oszacować wartość temperatury złącza LED-a. Biorąc jednak pod uwagę zmienność rezystancji termicznej rdzenia ceramicznego zależną od wielu czynników między innymi prądu zasilania oraz jakości lutowni, wynik takich rachunków może być obarczony znacznym błędem [3].



Rys. 1 Budowa diody elektroluminescencyjnej

W dalszej części artykułu zaproponowano system pomiarowy, pozwalający na pomiar temperatury złącza diody LED w zakresie temperatur, w których zwykle pracują oprawy oświetleniowe. Zaprojektowany system wykorzystuje jedną z wersji elektrycznej metody pomiaru temperatury złącza półprzewodnikowego, opisaną w standardzie EIA JEDEC 51-1 [4]. Zdecydowano się na wybór metody „pojedynczego prądu”, głównie ze względu na zadowalającą dokładność pomiaru oraz stosunkowo niski koszt wykonania systemu pomiarowego [5]. Zgodnie z tym standardem, napięcie przewodzenia złącza półprzewodnikowego jest zależne od temperatury tego złącza. W ogólnej teorii jest to relacja nieliniowa. Jednak w typowym zakresie temperatur, w jakich pracują złącza diod elektroluminescencyjnych, nieliniowość ta jest na tyle mała, że można ją pominąć. W przypadku gdy aproksymacja tej zależności funkcją liniową nie zapewnia odpowiedniej dokładności pomiaru temperatury w całym rozpatrywanym zakresie temperatur (zazwyczaj

przyjmuje się dopuszczalny błąd rzędu $\pm 3^{\circ}\text{C}$) można zastąpić ją kilkoma odcinkami opisanymi przez różne współczynniki temperaturowe.

Zgodnie z ustaleniami standardu EIA JEDEC 51-1 [4], związek pomiędzy temperaturą złącza a napięciem przewodzenia w danym zakresie temperatur można opisać następującą zależnością:

$$(1) \quad \frac{\Delta V_f}{k} = \Delta T_{j-rise}$$

gdzie: k – temperaturowy współczynnik zmian napięcia przewodzenia, ΔV_f – zmiana wartości napięcia przewodzenia, ΔT_{j-rise} – zmiana temperatury złącza.

Znając powyższe wielkości można określić rzeczywistą temperaturę złącza diody na podstawie równania:

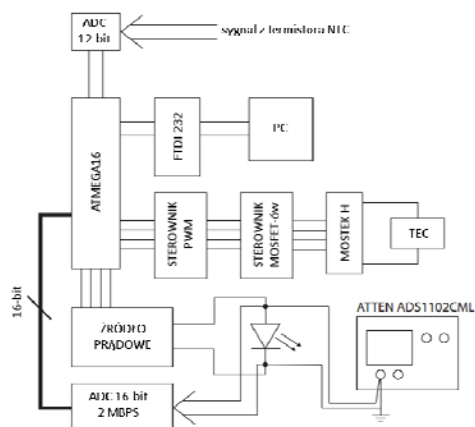
$$(2) \quad T_j = T_A + \frac{\Delta V}{k}$$

gdzie: T_A – temperatura otoczenia diody, T_j – temperatura złącza LED.

System do pomiaru temperatury złącza diody elektroluminescencyjnej

Przed przystąpieniem do właściwego pomiaru temperatury złącza w rzeczywistych warunkach pracy diody LED, należy wyznaczyć temperaturowy współczynnik zmian napięcia przewodzenia. Można dokonać tego na kilka sposobów opisanych między innymi w pracy [5]. W projektowanym systemie zdecydowano się na zastosowanie pojedynczych impulsów prądowych o czasie trwania nie przekraczającym 2 ms i regulowanej wartości prądu. Podstawą wyboru takiego sposobu pomiaru było założenie, że przy tak krótkim czasie moc dostarczona do złącza jest na tyle mała, że nie powoduje zauważalnego podgrzania chipu. Można więc przyjąć, że temperatura złącza jest taka sama jak temperatura otoczenia diody. Wadą tej metody jest konieczność stosowania szybkich i zarazem precyzyjnych układów pomiarowych, zwiększających koszt systemu.

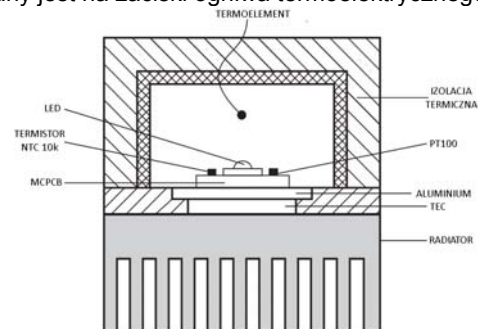
Schemat systemu pomiarowego został zaprezentowany na rysunku 2. Jego najważniejszym elementem jest odizolowana od otoczenia komora termiczna wyposażona w ogniwo Peltiera o mocy 70 W (rys. 3).



Rys. 2 Schematyczna budowa systemu pomiarowego

Do modułu termoelektrycznego przytwierdzona jest na stałe płytka aluminiowa, do której mocuje się badane LEDy przyłutowane do obwodów drukowanych o rdzeniu aluminiowym (MCPCB). Ogniwo to jest sterowane przez mostek H pozwalający na zmianę kierunku prądu zasilającego ogniwo, dzięki takiemu rozwiązaniu możliwe jest zarówno grzanie jak też chłodzenie badanych diod. Regulacji wartości prądu dokonuje się poprzez zmianę współczynnika wypełnienia sygnału sterującego mostkiem. Taki sygnał PWM niestety nie może być bezpośrednio podany na zaciski

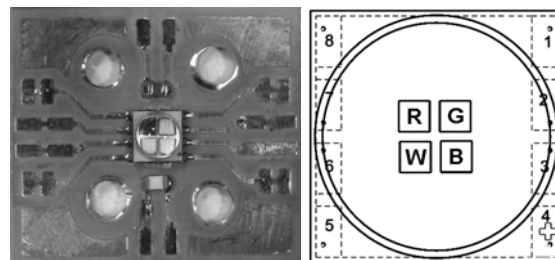
układu termoelektrycznego, ponieważ niekorzystnie wpływa to na jego sprawność. W związku z tym, przed modulem Peltiera zastosowano dolnoprzepustowy filtr LC, zmniejszający tętnienia prądu zasilającego. Tak uśredniony sygnał, o wartości proporcjonalnej do współczynnika wypełnienia podawany jest na zaciski ogniwa termoelektrycznego.



Rys. 3 Budowa komory termicznej

Zakres temperatur jaki możliwy jest do osiągnięcia w wykonanej komorze termicznej zawiera się w przedziale od -20°C do 150°C . W czasie pomiarów nie obniżano temperatury poniżej -10°C , ponieważ prowadziło to do silnego osadzania się lodu na powierzchni badanej diody, przy istniejącej wilgotności atmosfery w komorze, co mogło prowadzić przy grzaniu diody do powstania zwarcia obwodów drukowanych przez roztopiony lód. Wzrost temperatury powyżej 100°C również był niewskazany z powodu możliwości uszkodzenia modułu grzewczego.

Pomiar temperatury dokonywano w kilku miejscach wewnątrz komory. Głównym czujnikiem, który bezpośrednio podłączony był do elektronicznego układu sterującego opartego na mikrokontrolerze Atmega16, jest termistor o ujemnym współczynniku temperaturowym. Został on przyłutowany do obwodu drukowanego w niewielkiej odległości od badanej diody LED, aby rejestrować temperaturę złącza w jak najmniejszej odległości od źródła ciepła. Taki sposób montażu zapewnia niską rezystancję termiczną pomiędzy czujnikiem a badanym obiektem (diodą świecącą).



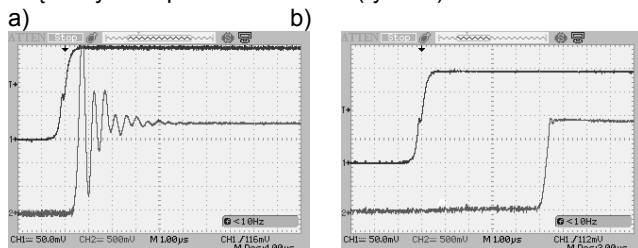
Rys. 4 Płytkę drukowaną z przyłutowaną diodą i czujnikami temperatury oraz rozmieszczenie chipów wewnątrz diody

Kolejnym czujnikiem przyłutowanym do płytki drukowanej jest czujnik PT100 podłączony do kalibratora Axiomet AX-C850, który według danych producenta zapewni dokładność pomiaru nie mniejszą niż $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$. Przed uruchomieniem układu, na podstawie jego wskazań zweryfikowano odczyty z termistora i skalibrowano czujnik temperatury. W czasie pomiarów, czujnik PT100 pozwala użytkownikowi nadzorować pracę systemu i wprowadzać w trybie on-line ewentualne zmiany nastaw regulatora. Tego typu dozór nastaw temperatury jest konieczny, gdyby stwierdzono nieprawidłowości pracy komory termicznej. Ostatnim czujnikiem jest termopara typu K mierząca temperaturę powietrza otaczającego badaną diodę, realizująca pomiar parametru T_A .

W trakcie badania, opracowany układ sterowania, automatycznie regulował i stabilizował temperaturę wewnątrz komory termicznej. O momencie załączenia modułu źródła

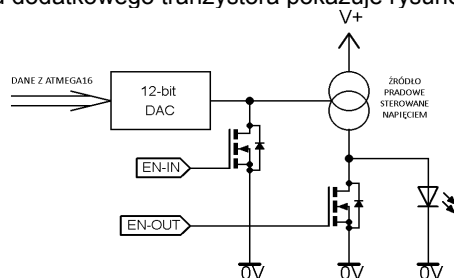
prądowego musi jednak zdecydować użytkownik. W czasie przeprowadzania pomiarów, po każdej zmianie temperatury wewnątrz komory termicznej, należało ustabilizować jej warunki pracy, poprzez relaksację w czasie 10 minut, aby mieć pewność osiągnięcia równowagi termicznej wewnątrz komory.

Zakłada się, że impuls prądowy przy wyznaczaniu współczynnika temperaturowego jest bardzo krótki, rzędu kilku milisekund. Założenie to wynika z faktu, że w tak krótkim czasie, rzeczywista temperatura złącza jest bardzo zbliżona do temperatury obudowy diody. Zaprojektowane i wykonane źródło prądowe jest w stanie generować impulsy prądowe o regulowanej wartości od 10 mA do 1 A i czasie trwania nie krótszym niż 1 ms. Źródło to oparte jest na klasycznym zwierciadle prądowym ze zwielokrotnieniem prądu. Istotnym w tego typu układach jest wyeliminowanie oscylacji podczas włączania źródła, które wprowadzają dodatkowe błędy przy pomiarze napięcia przewodzenia w początkowym etapie uruchamiania (rys. 5a).



Rys. 5 Przebieg sterujący regulowanym źródłem prądowym oraz napięcie na LED: a) bez dodatkowego tranzystora, b) z dodatkowym bocznikiem

W prezentowanym układzie oscylacje zostały ograniczone poprzez wprowadzenie podwójnego kluczowanie źródła – rysunek 6. Pierwszy tranzystor MOSFET załącza źródło podając odpowiednie napięcie na jego wejście sterujące. Na tym etapie tranzystor wyjściowy połączony równolegle z badaną diodą LED przewodzi prąd. Dopiero po ustaniu oscylacji tranzystor jest wyłączany – prąd zaczyna płynąć przez mierzoną diodę. Czas opóźnienia został określony doświadczalnie na podstawie obserwacji przebiegu na ekranie oscyloskopu. Wynik działania układu po zastosowaniu dodatkowego tranzystora pokazuje rysunek 5b.

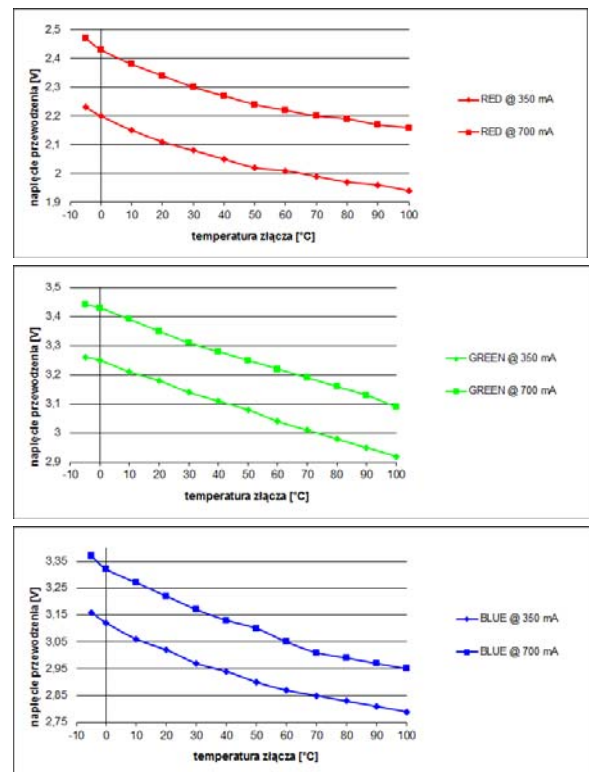


Rys. 6 Podwójne kluczowanie sterowalnego źródła prądowego

Kolejnym ważnym elementem systemu jest szybki przetwornik analogowo – cyfrowy. W celu zapewnienia wysokiej rozdzielczości pomiaru zdecydowano się na przetwornik 16 – bitowy o wyjściu równoległym. Takie połączenie zapewnia dużo szybszą transmisję danych, niż przy magistrali szeregowej, co jest również istotne przy tak krótkich impulsach zasilających. Niestety egzemplarz układu dostarczony przez producenta jako darmowa próbka miał niestabilne źródło napięcia odniesienia, co eliminowało układ jako wiarygodny przyrząd pomiarowy. Zdecydowano się na zastąpienie przetwornika oscyloskopem cyfrowym ustawionym w tryb rejestracji pojedynczego impulsu. Wyzwalanie oscyloskopu realizowane jest tym samym sygnałem co aktywacja źródła prądowego.

Mając tak skonfigurowany układ przystąpiono do pomiaru temperaturowego współczynnika zmiany napięcia przewodzenia. Temperaturę wewnątrz komory termicznej zmieniano od 0°C do 100°C z krokiem co 10°C. Następnie, po osiągnięciu przez układ równowagi termicznej, zasilano diodę LED impulsami prądu o wartościach maksymalnych 350 mA oraz 700 mA. Chcąc ograniczyć wpływ zjawiska samoogrzewania złącza za wartość napięcia przewodzenia przy danych temperaturach przyjmowano średnią wartość napięcia z pierwszych 200 µs po uruchomieniu źródła prądu.

Wykorzystując opracowany i wykonany system pomiarowy, zbadano i zweryfikowano parametry termiczne diody LED o czterech oddzielnych złączach renomowanego producenta. Przeprowadzone badania przyczyniły się do określenia relacji pomiędzy trzema chipami diody, emitującymi światło o barwie czerwonej, zielonej oraz niebieskiej. Wyniki pomiarów wpływu temperatury złącza na wartość napięcia przewodzenia zaprezentowane zostały na rysunkach 7 oraz zestawione w Tabeli 1.



Rys. 7 Wyniki pomiaru zależności napięcia przewodzenia od temperatury złącza diody RGB

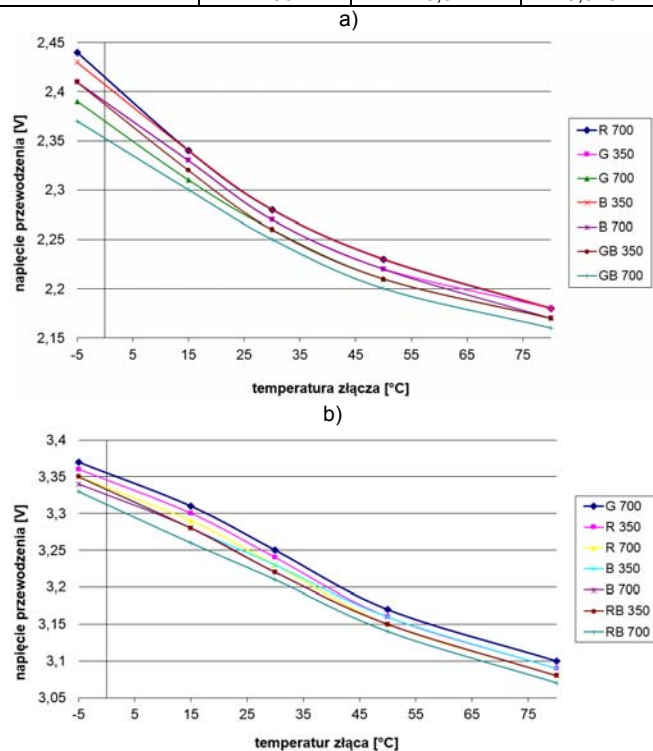
Analizując otrzymane wyniki można stwierdzić, że wszystkie badane diody wraz ze zmianą temperatury zachowują się w sposób analogiczny. Wzrost temperatury powoduje spadek wartości napięcia przewodzenia. W przypadku diody o barwie zielonej widoczna jest liniowa zależność pomiędzy tymi dwoma wielkościami w całym rozpatrywanym zakresie temperatur. Możliwe jest aproksymowanie powyższej relacji funkcją liniową o współczynniku dopasowania R^2 większym od 0,997. Znacząco ułatwia to precyzyjne określenie temperatury złącza diody działającej w realnych warunkach pracy. Diody czerwona oraz niebieska charakteryzują się większą nieliniowością relacji temperatury złącza i napięcia przewodzenia. W przypadku diody niebieskiej, po aproksymacji linią prostą zależności $V_f(T_j)$, błąd pomiaru temperatury złącza przekracza dopuszczalną wartość $\pm 3^\circ\text{C}$ jedynie na końcach zakresu. Przy diodzie czerwonej, chcąc dalej pozostać przy zależnościach liniowych, warto podzielić rozpatrywany przedział temperatur na dwa

zakresy. Pierwszy od 0°C do 50°C, drugi natomiast 50°C do 100°C. Dopiero wtedy opisać relację $V_f(T_f)$ dwoma oddzielnymi funkcjami liniowymi. Taki zabieg nie skomplikuje w istotny sposób procedury obliczania rzeczywistej temperatury złącza, a pozwoli na zachowanie odpowiedniej dokładności pomiaru.

Dalej analizując otrzymane wyniki można stwierdzić, że badane diody charakteryzują się różnymi temperaturowymi współczynnikami zmian napięcia przewodzenia k . Na jego wielkość wpływa zarówno wartość prądu zasilającego jak i materiał z jakiego został wykonany chip danej diody świecącej. Wzrost prądu powoduje zwiększenie współczynnika temperaturowego, co pociąga za sobą silniejszy spadek napięcia przewodzenia przy zmianie temperatury otoczenia.

Tabela 1. Zestawienie wartości współczynnika k przy różnych prądach zasilania

nazwa diody	prąd zasilania [mA]	współczynnik k [mV/°C]	R^2
LED red 0°C - 50°C	350	-3,8	0,985
	700	-4,1	0,982
LED red 50°C - 100°C	350	-1,6	0,991
	700	-1,6	0,988
LED green	350	-3,3	0,998
	700	-3,4	0,999
LED blue	350	-3,4	0,971
	700	-3,9	0,975



Rys. 8 Napięcie przewodzenia diody przy różnych warunkach zasilania złącza sąsiadujących: a) dioda czerwona zasilana 700 mA, b) dioda zielona zasilana 700 mA

W dalszej części eksperymentu wykorzystano wyznaczony wcześniej współczynnik temperaturowy do wyznaczenia temperatury złącza w czasie pracy diody w realnych warunkach, jakie mogą wystąpić wewnątrz oprawy oświetleniowej. Rozpatrzono przypadki gdy zasilany jest pojedynczy chip, jak również kombinacje, gdy pracują dwa i trzy chipy zasilane różnymi wartościami prądu. W tym celu każdy chip badanego LED-a podłączono do niezależnego zasilacza prądowego, a diodę ponownie umieszczono w komorze termicznej. Pomiaru wartości napięcia przewodzenia dokonywano po osiągnięciu równowagi termicznej we-

wnątrz komory. Na rysunku 8 zestawiono wyniki pomiarów diody czerwonej i zielonej zasilanych prądem 700 mA.

Zmierzone wartości pokazują, że temperatura rzeczywista temperatura złącza jest zawsze większa od zewnętrznej temperatury diody. Związane jest to z rezystancją termiczną układu, o której wspomniano wcześniej. Na tym etapie nie możliwe jest określenie jej wartości, ponieważ niezbędna do tego jest znajomość mocy jaka została mocach wyemitowana z diody w postaci promieniowania optycznego. Jednak porównując napięcia przewodzenia poszczególnych diod przy różnych temperaturach otoczenia można stwierdzić, że jej wartość zmienia się wraz z temperaturą otoczenia.

Kolejny istotny fakt to wpływ poszczególnych chipów na sąsiadujące układy. Wzajemne podgrzewanie chipów jest szczególnie widoczne przy wysokich mocach dostarczanych do złącza. We wszystkich rozważanych przypadkach powoduje to wzrost temperatury badanego złącza na poziomie od 4°C do 8°C. Najsilniejszy wpływ widoczny jest przy złączach przylegających do siebie całymi krawędziami, słabszy przy chipach sąsiadujących wierzchołkami – rys. 6. Jest to zgodne z teorią transferu ciepła. Jednak może przysporzyć problemów w układach, w których konieczne jest utrzymanie stałego strumienia świetlnego lub widma promieniowania.

Podsumowanie

Opracowany i wykonany układ pomiarowy do analizy właściwości termicznych diod świecących, pozwolił ocenić zgodność właściwości prezentowanych przez producentów diod. Informacje zaprezentowane w kartach katalogowych produktów muszą być analizowane niezwykle szczegółowo, tym bardziej, że parametry elektrooptyczne LEDów często prezentowane są przy różnych warunkach odniesieniowych (różne prądy zasilania, różne temperatury otoczenia itp.). Dzięki przedstawionej metodologii pomiaru, udało się zaprezentować właściwości LED dużej mocy, w typowych dla ich pracy zakresach temperatur oraz typowych prądów zasilania. Jest to istotne z racji na konieczność właściwego dopasowania układów zasilania modułów ledowych. Jeśli projektant sprzętu oświetleniowego dopasuje zasilacz do znamionowych warunków pracy przy znamionowej temperaturze złącza, to może się okazać, że w również typowych warunkach pracy oprawy oświetleniowej, może wystąpić sytuacja awaryjna. Szczególnie jest to ważne w konstrukcjach, które pracują całorocznie lub w warunkach klimatu arktycznego. Wzrost napięcia przewodzenia diody w niskich temperaturach może spowodować, że układ zasilania nie będzie w stanie uruchomić modułu ledowego.

Problem zmian temperaturowych rozpatrywanych w tym artykule pokazuje istotę konstrukcyjną wykorzystania ledów do celów oświetleniowych, w szczególności w oświetleniu awaryjnym i ewakuacyjnym. Analiza struktury z jednym chipem LED nie jest zbyt skomplikowana. Komplikacja badań wystąpi w analizie diod o matrycowym rozłożeniu w jednej obudowie kilku chipów, szczególnie w rozwiązaniach o różnych napięciach przewodzenia (np. LED typu RGB). Tego typu badania będą w dalszym ciągu prowadzone przez autorów, szczególnie w powiązaniu z obserwacją zmian fotometrycznych i kolorymetrycznych strumienia świetlnego emitowanego przez diody świecące.

"Opracowano na podstawie wyników III etapu programu wieloletniego "Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy", finansowanego w latach 2014-2016 w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego/narodowego Centrum Badań i Rozwoju" - PW/BWP/WE/1/2014. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy - Państwowy Instytut Badawczy. Wykonawca projektu: Politechnika Białostocka

LITERATURA

- [1] Górecki K., Górecka K., Górecki P.: „Porównanie właściwości eksploatacyjnych wybranych typów lamp LED”, *Przegląd Elektrotechniczny*, 11a/2012, str. 111 – 114.
- [2] Chhajer S., Xi Y., Gessmann Th., Xi J.-Q., Shah M., Kim J. K., Schubert E. F., “Junction temperature in light-emitting diodes assessed by different methods”, *Light-Emitting Diodes: Research, Manufacturing and Applications IX*, Proc. of SPIE 5739, str. 16 – 24.
- [3] Jayasighe L., Narendran N., Dong T., “Is the Thermal Resistance Coefficient of High-power LEDs constant?” *Seventh International Conference on Solid State Lighting*, Proc. of SPIE 6669, 2007, str. 146 – 152.
- [4] EIA JEDEC Standard JESD51-1 *Integrated Circuits Thermal Measurement Method-Electrical Test Method (Single Semiconductor Device)*, 1995
- [5] Siegal B., “Practical Considerations in High Power LED Junction Temperature Measurements”, *31st International Conference on Electronics Manufacturing and Technology*, 2006, str. 62 – 66.
- [6] Application Note AVR221: Discrete PID controller, Atmel Corporation, 2006
- [7] Vaitonis Z., Stonkus A., Zukauskas A., “Effect of junction temperature oscillation on output characteristics of a light-emitting diode under pulse-width and pulse-frequency modulation driving modes”, *IET Optoelectronics*, 2012, Vol. 6, str. 52 – 56.
- [8] Roscam Abbing F. D., Pertijs M. A. P., “Light-emitting diode junction-temperature sensing using differential voltage/current measurements”, *Sensors IEEE Conference Publications*, 2011, str. 861 – 864.

Autorzy: mgr inż. **Łukasz Budzyński**, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, ul. Wiejska 45D, 15-351 Białystok, E-mail: l.budzynski@pb.edu.pl; dr hab. inż. **Maciej Zajkowski**, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, ul. Wiejska 45D, 15-351 Białystok, E-mail: m.zajkowski@pb.edu.pl; dr inż. **Urszula J. Blaszcak**, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, ul. Wiejska 45D, 15-351 Białystok, E-mail: u.blaszcak@pb.edu.pl; dr inż. **Jaścek Kuszniar** – Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, ul. Wiejska 45D, 15-351 Białystok, E-mail: j.kusznier@pb.edu.pl,