

Piotr CZAJKA

Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, Radom

WYZNACZANIE CHARAKTERYSTYK PRACY IMPULSOWEJ WYSOKO WYDAJNYCH DIOD ELEKTROLUMINESCENCYJNYCH

Słowa kluczowe

System oświetlenia, maszynowe widzenie, oświetlacze impulsowe, proces dynamiczny.

Streszczenie

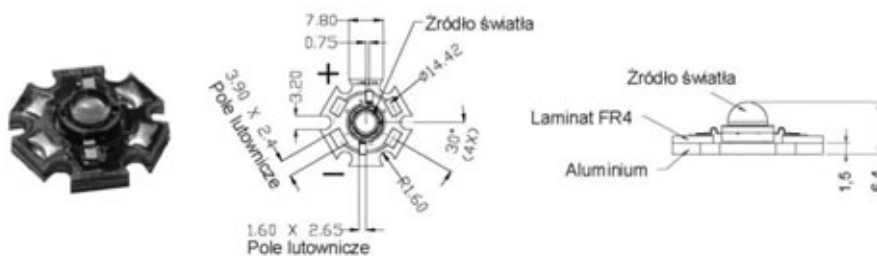
Automatyczna optyczna inspekcja w wielu procesach wymaga stosowania oświetlaczy, które są w stanie w bardzo krótkim czasie zapewnić wysoką wartość natężenia światła. Jednym z rozwiązań jest zastosowanie oświetlaczy diodowych w warunkach pracy impulsowej z chwilowym przekroczeniem nominalnych parametrów prądowych diod LED. Coraz częściej w systemach oświetlenia stosowane są wysoko wydajne diody LED, o mocach rzędu kilku watów. Przedmiotem badań był wpływ natężenia prądu i długości impulsu na wartość i stabilność natężenia światła diody w impulsie. Badania przeprowadzono dla diod *Luxeon* światła białego o mocach 1, 3 i 5 W. Wyniki badań mogą być wykorzystane przy projektowaniu oświetlaczy i ich sterowników.

Wprowadzenie

Oświetlenie w systemach maszynowego widzenia jest kluczowym czynnikiem, od którego zależy jakość rejestrowanych obrazów [1]. Oprócz wyboru metody oświetlenia, istotne znaczenie ma natężenie, równomierność rozkładu przestrzennego i stabilność czasowa źródła światła. Diody LED znalazły szerokie zastosowanie w optycznej inspekcji dzięki takim zaletom jak: stabilne i po-

wtarzalne oświetlenie, małe wymiary pojedynczego elementu, dzięki któremu można kształtować strumień świetlny oświetlacza, możliwość wyboru barwy światła, liniowa zależność strumienia świetlnego od prądu (w zakresie prądów nominalnych), niskie napięcie zasilania, mała bezwładność świetlna, wysoka trwałość, odporność na wstrząsy [2, 3].

Optyczna inspekcja może odbywać się w warunkach statycznych (obiekt kontrolowany jest nieruchomy) lub dynamicznych (obiekt znajduje się w ruchu). W warunkach dynamicznych konieczne jest zastosowanie szybkich kamer, aby zminimalizować rozmycie obrazu [4]. Skrócenie czasu rejestracji powoduje jednak konieczność uzyskania proporcjonalnie większego natężenia światła. Można to osiągnąć przez zastosowanie wysoko wydajnych diod elektroluminescencyjnych (rys. 1). Dalsze zwiększenie natężenia światła jest możliwe w warunkach pracy impulsowej, gdy oświetlacz jest włączany jedynie na czas rejestracji obrazu przez kamery. Krótki czas załączenia diod minimalizuje prawdopodobieństwo przegrzania struktur półprzewodnikowych i ich uszkodzenia.



Rys. 1. Wygląd przykładowej wysoko wydajnej diody *Luxeon Star* i jej wymiary

1. Podstawy wykorzystania diod świecących w systemach oświetlenia

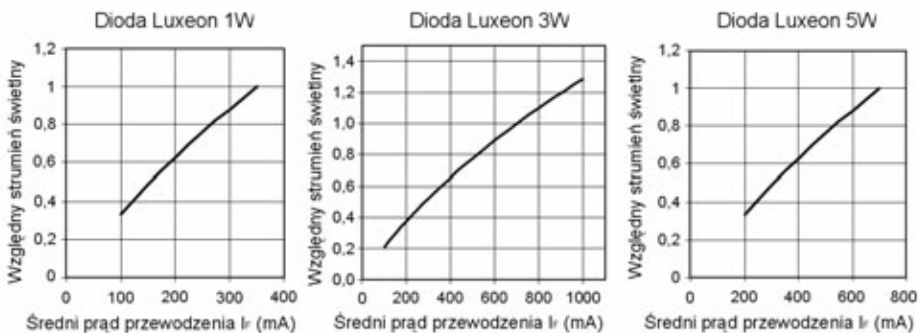
Promieniowanie optyczne w diodzie elektroluminescencyjnej (ang. LED – Light Emitting Diode) powstaje w wyniku rekombinacji promienistej nośników ładunku w złączu p-n przy polaryzacji złącza w kierunku przewodzenia. Diody świecące emitują promieniowanie w wąskim zakresie widma częstotliwości.

W celu uzyskania światła białego stosuje się obecnie trzy metody. Pierwszy sposób polega na mieszaniu światła pochodzącego z trzech diod składowych (czerwonej, zielonej i niebieskiej), co w efekcie powoduje otrzymanie światła barwy białej. Często diody umieszcza się w jednej wspólnej obudowie (dioda RGB). Zaletą rozwiązania jest duża wydajność oraz możliwość kształtowania temperatury światła białego. Do podstawowych wad należy wysoki koszt i skomplikowany układ sterujący pracą każdej z diod. Drugi sposób polega na wytwarzaniu przez LED promieniowania ultrafioletowego, które dzięki zastosowaniu luminoforu jest konwertowane na promieniowanie widzialne w podob-

ny sposób jak w lampach fluorescencyjnych. Odpowiednio dobrany skład chemiczny luminoforu powoduje uzyskanie światła o białej barwie. Głównymi zaletami tej metody jest prostota wytwarzania światła i niskie koszty. Podstawowe wady to mała wydajność, ze względu na straty w luminoforze, oraz częściowo przedostające się na zewnątrz szkodliwe promieniowanie UV. Trzeci sposób polega na zastosowaniu niebieskiej diody elektroluminescencyjnej, którą umieszcza się w obudowie pokrytej żółtym luminoforem. Światło niebieskie emitowane przez diodę jest częściowo przepuszczane, a częściowo pochłaniane przez luminofor, który z kolei konwertuje je w światło żółte. Przepuszczone światło niebieskie diody ulega wymieszaniu ze światłem barwy żółtej z luminoforu, dzięki czemu uzyskuje się światło białe. Podstawowe zalety tej metody to prosty sposób wytwarzania, mniejsze straty niż w metodzie drugiej oraz brak promieniowania UV. Powyższe zalety powodują, że jest to obecnie podstawowa metoda wytwarzania białych diod świecących [5]. Tą metodą są również wykonane wysoko wydajne diody *Luxeon Star*. Podstawowe parametry tych diod przedstawione zostały w tab. 1. Natężenie emitowanego światła jest proporcjonalne do wielkości prądu przewodzenia (w zakresie prądów nominalnych). Przy wzroście temperatury zmniejsza się intensywność promieniowania, co ogranicza maksymalną temperaturę pracy diod świecących. Wykresy na rys. 2 przedstawiają zależność względnego strumienia świetlnego od prądu, podaną przez producenta [6].

Tabela 1. Podstawowe parametry diod *Luxeon Star*

Typ diody	Opis	Napięcie przewodzenia [V]	Prąd nominalny przewodzenia [mA]	Strumień świetlny [lm]
LXHL-MW1D	Biała dioda <i>Luxeon 1W</i>	3,42	350	25
LXHL-LW3C	Biała dioda <i>Luxeon 3W</i>	3,70	700	65
LXHL-LW6C	Biała dioda <i>Luxeon 5W</i>	6,84	700	120



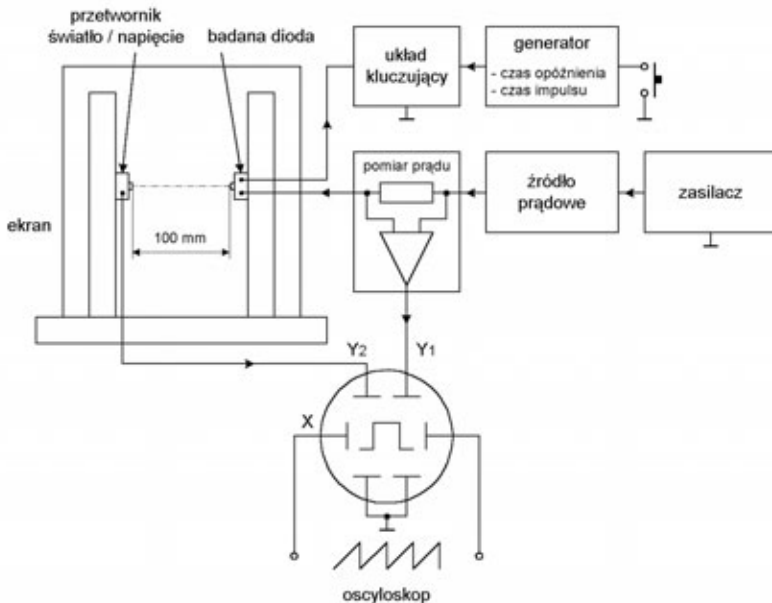
Rys. 2. Zależność względnego strumienia świetlnego od prądu (wg producenta)

W wysoko wydajnych diodach elektroluminescencyjnych cała moc wydzielana się na bardzo małej powierzchni złącza (około 1 mm^2), co powoduje, że gęstość mocy jest bardzo wysoka (na poziomie 100 W/cm^2) [5]. Należy zawsze dążyć do obniżenia temperatury złącza, ponieważ wraz ze wzrostem temperatury maleje sprawność diody i jej czas eksploatacji. Diody *Luxeon* wykorzystywane w badaniach były wyposażone fabrycznie w niewielki radiator o powierzchni około 3 cm^2 . Producent zaleca stosowanie dodatkowego zewnętrznego radiatora. Dokładne informacje na temat zarządzania ciepłem (ang. thermal management) diod *Luxeon* znajdują się w dokumentacji producenta [6].

Podczas pracy impulsowej możliwe jest przekroczenie nominalnych wartości prądu, nie dopuszczając do przegrzania diody. Maksymalna wartość prądu zależy od długości impulsu oraz od częstotliwości załączeń diod. Przyjmuje się, że czas pomiędzy kolejnymi impulsami powinien być wielokrotnie większy niż długość impulsu. Jest to spowodowane tym, iż energia cieplna wydzielona w impulsie wymaga czasu w celu odprowadzenia jej do obudowy, ze względu na bezwładność cieplną diody.

2. Metodyka badań. Stanowisko badawcze

Na potrzeby badań opracowano i wykonano stanowisko badawcze, w skład którego wchodzi m.in. analogowy przetwornik światło-napięcie typu OPT-101 i oscyloskop cyfrowy (rys. 3). Do kalibracji układu pomiarowego wykorzystano



Rys. 3. Schemat stanowiska do badania diod LED w pracy impulsowej

luksomierz cyfrowy L-100 firmy Sonopan. Badania przeprowadzono dla ustalonych długości impulsów i wartości prądu (do 20-krotności prądu nominalnego w impulsie). Podstawowe parametry przetwornika światła przedstawiono w tab. 2. Składa się on z umieszczonej w jednej obudowie fotodiody i wzmacniacza o napięciu wyjściowym, które jest wprost proporcjonalne do natężenia światła.

Tabela 2. Podstawowe parametry przetwornika OPT-101

Napięcie zasilania [V]	Pasmo [kHz]	Czas ustalania [μ s]	Nieliniowość [%]
2,7÷36	14	80	$\pm 0,01$

Diody mocowano do wspornika poprzez laminat epoksydowy (rys. 3), aby zapewnić powtarzalną oporność termiczną. Diody LED były wyposażone standardowo w niewielki radiator (rys. 1). Na drugim wsporniku, w odległości 100 mm, na poziomie badanej diody zamocowano przetwornik światło–napięcie. W celu wyeliminowania wpływu oświetlenia otoczenia zastosowano ekran. Oscyloskop wykorzystano do obserwacji prądu płynącego przez diodę w impulsie oraz do pomiaru napięcia z przetwornika światła. Do zasilania prądem stałym zastosowano źródło prądowe zbudowane na wzmacniaczu operacyjnym mocy typu OPA548. Czas trwania impulsu ustawiany był na generatorze impulsowym wyzwalanym ręcznie. Prąd zasilający diodę był załączany poprzez układ kluczujący zbudowany w oparciu o układ IPS021. Temperatura otoczenia stanowiska badawczego była równa temperaturze pokojowej $22\pm 1^\circ\text{C}$.

Przedmiotem badań był wpływ natężenia prądu i długości impulsu na wartość i stabilność krótkoczasową natężenia światła diody w impulsie. Nie badano natomiast wpływu częstotliwości impulsów prądu oraz wpływu czasu na tzw. długoczasową stabilność natężenia światła. Luksomierz L-100 posiada długi czas pomiaru (ok. 2 s), dlatego nie można go zastosować w badaniach w trybie impulsowym. Posłużył on natomiast do przeprowadzenia skalowania wyników pomiarów. W tym celu dokonano pięciokrotnie, dla każdej diody LED, pomiaru natężenia oświetlenia za pomocą luksomierza. Diody znajdowały się w ustalonych warunkach termicznych i były zasilane w sposób ciągły na poziomie prądu nominalnego. Pomiary powtórzono, umieszczając w miejscu głowicy pomiarowej luksomierza przetwornik światło–napięcie. W ten sposób wyznaczono wartość współczynnika skalującego. W dalszej kolejności uzyskane wartości natężenia oświetlenia przeliczono na jednostki natężenia światła, które są parametrem opisującym źródło światła, jakim jest dioda, a nie detektor luksomierza. Skorzystano w tym celu z zależności:

$$E = \frac{I}{r^2} \quad (1)$$

gdzie:

E – natężenie oświetlenia [lx],

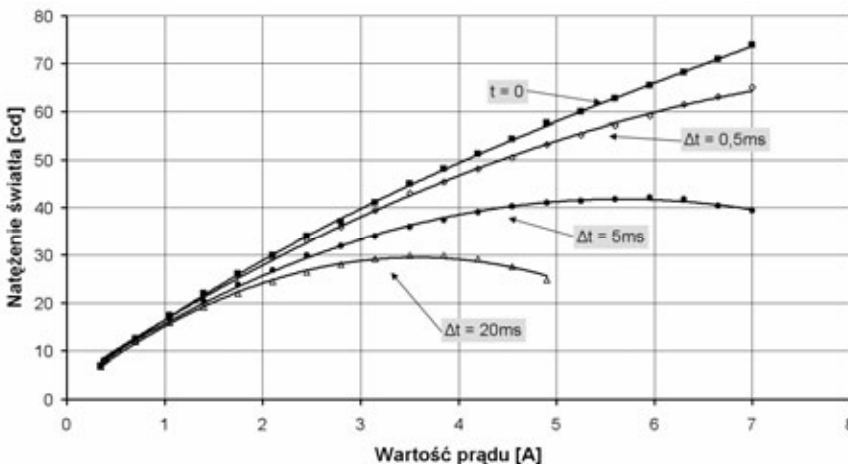
I – natężenie światła (światłość) [cd],

r – odległość źródła światła od detektora [m].

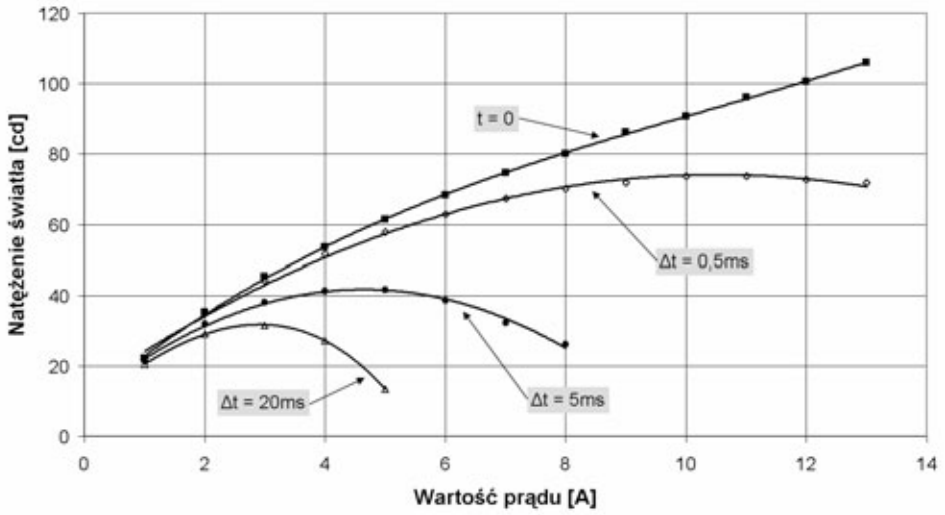
Natężenie światła mierzono na początku i na końcu impulsu. Na podstawie uzyskanych wyników wyznaczono charakterystyki natężenia światła w funkcji wartości prądu. Na podstawie analizy zależności pomiędzy charakterystykami opracowano wykresy spadku natężenia światła w funkcji prądu. Określono maksymalne wartości prądu w zależności od założonego, dopuszczalnego spadku natężenia światła pomiędzy początkiem i końcem impulsu. Dopuszczalną różnicę w natężeniu światła w impulsie określa się w zależności od zastosowanego systemu wizyjnego.

3. Analiza wyników badań

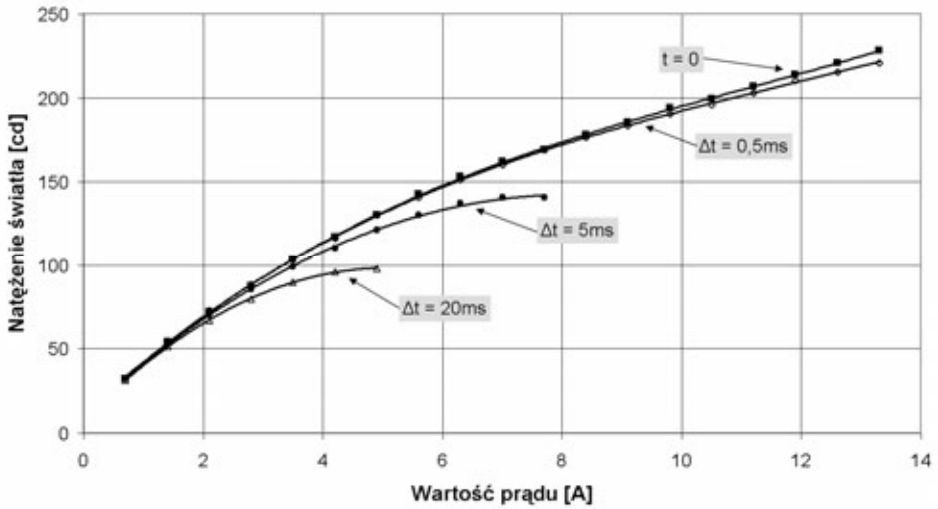
Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów opracowano charakterystyki natężenia światła badanych diod w funkcji prądu, w pracy impulsowej (rys. 4÷6). Charakterystyki zostały przedstawione w postaci zbiorczych wykresów. Dla każdej wyznaczonej charakterystyki, krzywa górna ($t = 0$) przedstawia natężenie światła na początku impulsu sterującego. Krzywe znajdujące się poniżej krzywej ($t = 0$) przedstawiają natężenie światła na końcu impulsu o długości Δt . Na podstawie charakterystyk natężenia światła opracowano wykresy spadku natężenia światła w czasie trwania impulsu jako procentowe zmniejszenie ilości światła na końcu impulsu w odniesieniu do wartości początkowej (rys. 7÷9).



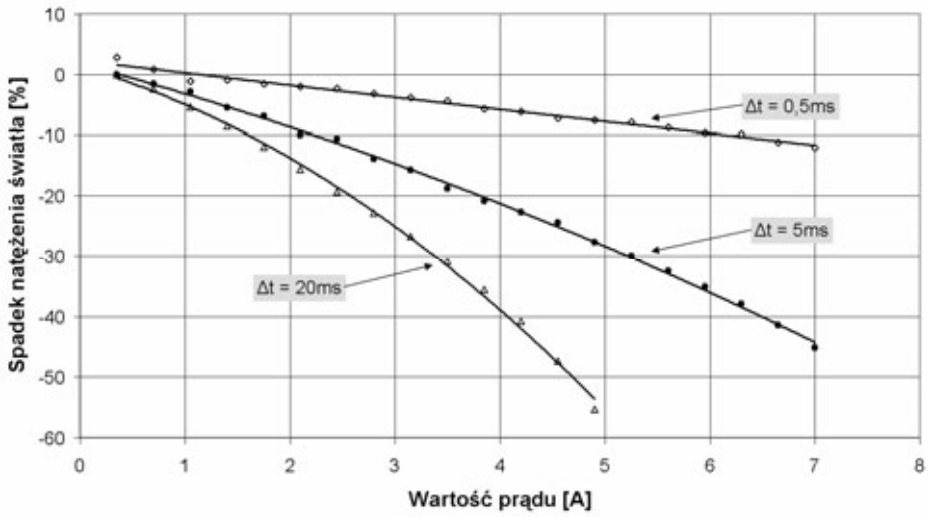
Rys. 4. Charakterystyki natężenia światła diody *Luxeon 1W* w pracy impulsowej (prąd nominalny 350 mA)



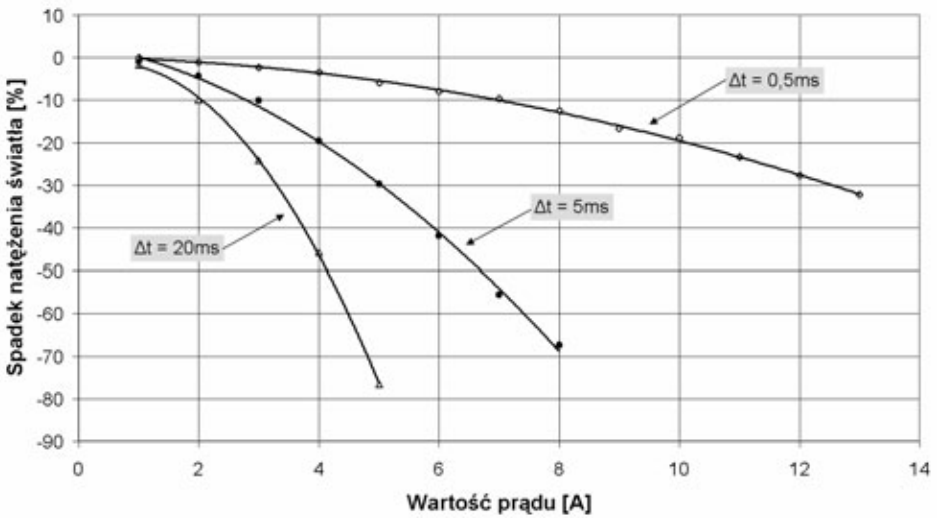
Rys. 5. Charakterystyki natężenia światła diody *Luxeon* 3W w pracy impulsowej (prąd nominalny 700 mA)



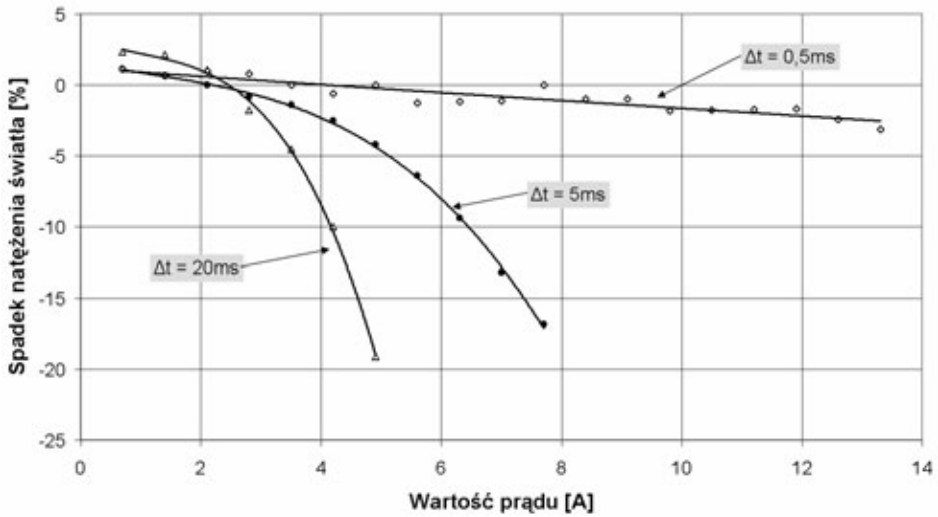
Rys. 6. Charakterystyki natężenia światła diody *Luxeon* 5W w pracy impulsowej (prąd nominalny 700 mA)



Rys. 7. Charakterystyki spadku natężenia światła diody *Luxeon 1W* w pracy impulsowej (prąd nominalny 350 mA)

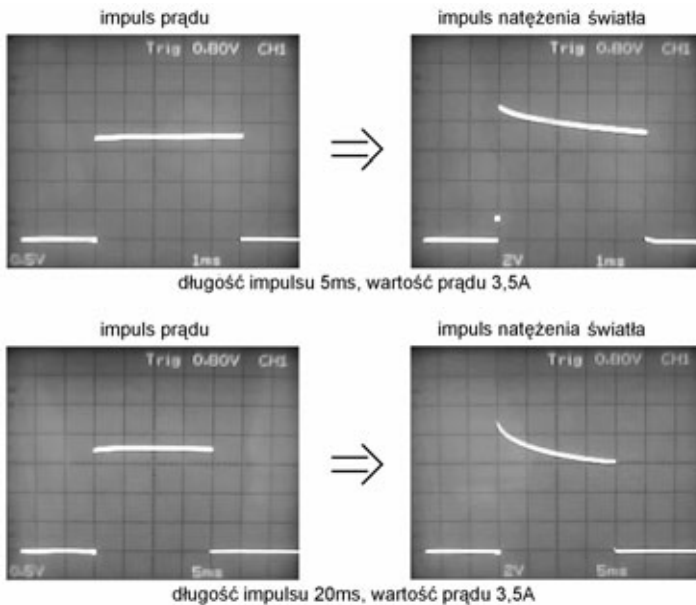


Rys. 8. Charakterystyki spadku natężenia światła diody *Luxeon 3W* w pracy impulsowej (prąd nominalny 700 mA)



Rys. 9. Charakterystyki spadku natężenia światła diody *Luxeon* 5W w pracy impulsowej (prąd nominalny 700 mA)

W trakcie badań zarejestrowano przykładowe oscylogramy impulsów prądowych i odpowiadających im zmian natężenia światła uzyskane dla diody *Luxeon* 1W w pracy impulsowej (rys. 10).



Rys. 10. Przykładowe oscylogramy impulsu prądu i natężenia światła zarejestrowane podczas badań diody *Luxeon* 1W w pracy impulsowej

Łączną niepewność pomiaru wartości prądu w impulsie wyznaczono metodą typu B na podstawie znanej dokładności pomiaru napięcia za pomocą oscyloskopu $a_U = \pm 3\%$ oraz dopuszczalnej tolerancji wartości rezystancji $a_R = \pm 2\%$. Łączna niepewność standardowa pomiaru wartości prądu wynosiła:

$$u_I = \sqrt{u_U^2 + u_R^2} = \sqrt{\left(\frac{a_U}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{a_R}{\sqrt{3}}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{3}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^2} = 2,1\% \quad (2)$$

Niepewność rozszerzona (rozkład prostokątny) wynosiła:

$$U_I = \sqrt{3} \cdot u_I = \sqrt{3} \cdot 2,1 = 3,6\% \quad (3)$$

Łączną niepewność pomiaru natężenia światła wyznaczono metodą typu B na podstawie dokładności pomiaru napięcia za pomocą oscyloskopu $a_U = \pm 3\%$, dokładności luksomierza $a_L = \pm 2,5\% + 1\text{LSB}$, dokładności przetwornika światło–napięcie oraz dokładności wyznaczenia odległości dioda–detektor. Na dokładność pomiaru przetwornika miały głównie wpływ: dokładność wzmocnienia związana z tolerancją zastosowanego rezystora $\pm 5\%$ i nieliniowość wzmocnienia $\pm 0,01\%$ pełnego zakresu. Ze względu na to, że w pomiarach z użyciem przetwornika światło–napięcie wyznaczone były wartości względne, które następnie były mnożone przez wartość natężenia oświetlenia uzyskaną z pomiarów luksomierzem, na wynik nie miała wpływu tolerancja zastosowanego rezystora. Natomiast miała wpływ nieliniowość wzmocnienia, jednak została ona uznana za nieistotną w porównaniu z dokładnością luksomierza i oscyloskopu. Odległość pomiędzy diodą i detektorem zmierzono za pomocą suwmiarki, z dokładnością $\pm 0,1\text{mm}$. Niepewność związana z tym pomiarem była również pominięta w całkowitym rachunku wyznaczania niepewności pomiaru.

Łączna niepewność standardowa pomiaru natężenia światła wynosiła:

$$u_{I\text{św}} = \sqrt{\left(\frac{a_U}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{a_L}{\sqrt{3}}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{3}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{2,8}{\sqrt{3}}\right)^2} = 2,4\% \quad (4)$$

Niepewność rozszerzona (rozkład prostokątny) wynosiła:

$$U_{I\text{św}} = \sqrt{3} \cdot u_{I\text{św}} = \sqrt{3} \cdot 2,4 = 4,2\% \quad (5)$$

Podsumowanie

Na podstawie uzyskanych wyników badań diod *Luxeon* stwierdzono, że poprzez przekroczenie nominalnych wartości prądu diod możliwe jest osiągnięcie

kilkakrotnie większych wartości natężenia światła w impulsie o czasie trwania rzędu pojedynczych ms. Wraz ze wzrostem wartości prądu zwiększeniu ulegała również wartość natężenia światła, przy czym zależność ta po przekroczeniu prądu nominalnego była nieliniowa. Wyniki badań pokazały, że natężenie światła malało wraz z czasem trwania impulsu. Było to skutkiem rosnącej temperatury złącza diody dla dłuższych impulsów.

Na podstawie charakterystyk spadku natężenia światła od wartości prądu zasilającego możliwe jest dobranie maksymalnej wartości prądu przy założonej dopuszczalnej zmienności w czasie natężenia światła. W przypadku przekroczenia nominalnego prądu zasilania diod *Luxeon*, konieczne jest kontrolowanie czasu trwania impulsu i amplitudy prądu. Dodatkowo należy zapewnić czas wyłączenia pomiędzy impulsami potrzebny na odprowadzenie ciepła wydzielonego do obudowy. Częstotliwość załączania impulsów prądowych musi spełniać warunek, aby całkowita ilość energii, która wydzielili się w diodzie w czasie jednego okresu była porównywalna lub mniejsza od wartości energii wydzielającej się w tym samym odcinku czasu przy pracy stałoprądowej z prądem nominalnym [5].

Na podstawie badań stwierdzono, że przy jednakowej wartości przesterowania $K = I/I_N$ spadek natężenia światła w impulsie jest najmniejszy dla diody 5W. Podobny poziom zmienności natężenia światła zaobserwowano dla diody 1W. Dla diody 3W spadek ten był znacznie większy, co było spowodowane różną wielkością powierzchni złącza. Diody 1W i 3W mają porównywalną wielkość złącza, natomiast dioda 5W ma większą powierzchnię (ok. czterokrotnie). Gęstość mocy w diodach 1W i 5W jest na podobnym poziomie, a w przypadku diody 3W znacznie większa. Biorąc pod uwagę tę cechę, należy przyjąć, że do pracy impulsowej najbardziej nadają się diody *Luxeon Star* 1W i 5W.

Przedstawione wyniki badań opisują pojedyncze diody *Luxeon* w pracy impulsowej. Zgromadzona wiedza może być także wykorzystana w procesie projektowania oświetlacza złożonego z wielu diod elektroluminescencyjnych. Zakładając, że pojedyncza dioda LED jest punktowym źródłem światła, wartość natężenia światła w wybranym punkcie przestrzeni jest sumą natężeń od poszczególnych diod [7]. Możliwe jest modelowanie teoretycznej charakterystyki natężenia światła całego oświetlacza w pracy impulsowej wykorzystując wiedzę o charakterystyce pojedynczego emitera. Należy przy tym uwzględnić wpływ szczególnych warunków termicznych pracy diod w oświetlaczu, wynikających z umieszczenia dużej liczby diod w małych odległościach pomiędzy nimi.

Praca naukowa wykonana ze środków Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego, wykonana w ramach realizacji Programu Wieloletniego pn. „Doskonalenie systemów rozwoju innowacyjności w produkcji i eksploatacji w latach 2004–2008”.

Bibliografia

1. Van Dommelen C.H.: Choose the right lighting for inspection. Test & Measurement World, 1996, 10, 1.
2. Żagan W.: Podstawy techniki świetlnej. Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2005, 192–196.
3. Booth K., Hill S.: Optoelektronika. WKŁ, Warszawa 2001, 99–105.
4. West P.: High speed, real-time machine vision. Automated vision systems. <http://www.machinevisiononline.org/public/articles/>, 9–12.
5. Wilanowski A.: LED know-how. http://www.lighting.pl/html/LED_Lediko, cz. 3, 5 i 7.
6. Power light source Luxeon technical datasheet. Lumileds Lighting U.S. <http://www.lumileds.com>. 2003, 2005.
7. Giesko T., Czajka P., Wasiak J., Zbrowski A.: Modelowanie procesu oświetlania w przestrzeni 3D na potrzeby maszynowych systemów automatycznej optycznej inspekcji. Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego, ITEE – PIB, Radom 2005, 17–32.

Recenzent:
Waldemar WÓJCIK

The determination of characteristics of highly-efficient LED diodes impulse work

Key words

Lighting system, machine vision, impulse lighting illuminators, dynamic process.

Summary

Automatic optical inspection in many processes demands the application of lighting illuminators, which are able to ensure high value intensity of illumination in a very short time. One of solutions is the application of LED lighting illuminators in impulse work conditions with temporary crossing border parameters of current diodes LED. Highly-efficient LED diodes with the power of several watts are more and more often used in lighting systems. The topic of research was the influence of current intensity and impulse length on the value and uniformity of the illumination diode intensity in impulse. Research was conducted for *Luxeon* diodes with white light and power of 1, 3 and 5 watts. Research results can be used in the course of designing lighting illuminators and their controllers.