

Analiza aspektów termicznych oraz niezawodnościowych na przykładzie opraw ze źródłami LED do oświetlenia miejsca pracy

Streszczenie. Dostępność dobrej jakości źródeł światła w postaci diod LED o odpowiedniej charakterystyce kierunkowej w naturalny sposób sprzyja wypieraniu świetlówek kompaktowych w konstrukcji opraw do oświetlenia miejsca pracy. Brak konieczności stosowania elementów optycznych do formowania wiązki światła upraszcza konstrukcję oprawy i pozwala zmniejszyć docelowe koszty produkcji. W niniejszym artykule porównano wpływ punktu pracy źródeł LED na strumień świetlny i niezawodność opraw oświetleniowych.

Abstract. The availability of good quality light sources in the form of LEDs with the appropriate directional characteristics in a natural way favors the displacement of compact fluorescent lamps in the construction of luminaires for lighting the workplace. No need to use additional optical components to form a light beam simplifies the design of the luminaire and allows to reduce the production costs. This article compares the effect of the working point of LED sources on luminous flux and reliability of luminaires. (Analysis of thermal and reliability aspects on the example of luminaires with LED sources for workplace lighting).

Słowa kluczowe: Oprawy LED, oświetlenie miejsca pracy, zarządzanie ciepłem, niezawodność

Keywords: LED luminaires, workspace lighting, thermal management, reliability

Wstęp

Podstawową zaletą źródeł światła w postaci diod LED jest możliwość konstruowania wysokowydajnych, pod względem jakości oświetlenia oraz sprawności energetycznej, opraw oświetleniowych zasilanych napięciem stałym bez konieczności przekraczania dopuszczalnych wartości napięć dotykowych. Przy aktualnej skuteczności świetlnej diod LED generujących światło białe na poziomie powyżej 100 lm/W do oświetlenia stanowisk pracy wystarczające są oprawy oświetleniowe o mocy około 30 – 50 W, co w zdecydowany sposób sprzyja nie tylko wypieraniu tradycyjnych źródeł żarowych, ale także świetlówek kompaktowych w tego typu aplikacjach. Podstawowym zagadnieniem do rozwiązania w tego typu aplikacjach przy zastępowaniu lamp fluorescencyjnych jest ograniczenie dużego oślnienia wynikającego z wysokiej luminancji dochodzącej do 10^7 cd/m². W przypadku specjalizowanego oświetlenia miejsca pracy odpowiednio zaprojektowany i wykonany dyfuzor jest nieodłącznym elementem konstrukcyjnym oprawy oświetleniowej wykorzystującej diody LED. Małe wymiary źródeł LED pozwalają konstruować lekkie i kompaktowe rozmiarów oprawy oświetleniowe, gdzie podstawowym problemem staje się gęstość rozpraszanej w postaci ciepła mocy. Dobór punktu pracy diod LED przy szeregowym łączeniu źródeł światła w moduły i równoległym łączeniu modułów decyduje, przy zdefiniowanej wartości przewodności cieplnej materiałów konstrukcyjnych, o wartości uzyskiwanego docelowo strumienia świetlnego oraz niezawodności oprawy oświetleniowej.

Bardzo ważną i powszechnie pomijaną zaletą źródeł LED ze względu na brak standaryzacji jest możliwość bardzo wyraźnego zwiększenia efektywności energetycznej poprzez zasilanie opraw oświetleniowych z centralnej magistrali napięcia stałego o odpowiednio dobranej wartości, co w bardzo skuteczny sposób redukuje problemy ochrony przeciwporażeniowej i zmniejsza ryzyko powstawania pożarów przy awariach instalacji elektrycznych. Wykorzystanie komponentów półprzewodnikowych nowej generacji wytwarzanych w technologii węgla krzemu i azotku galu pozwala myśleć w przyszłości o konstrukcji centralnego przekształtnika energoelektronicznego zasilającego źródła oświetleniowe wykorzystujące diody LED o sprawności energetycznej przekraczającej 97% przy jednoczesnej bardzo silnej miniaturyzacji układów zasilania [1].

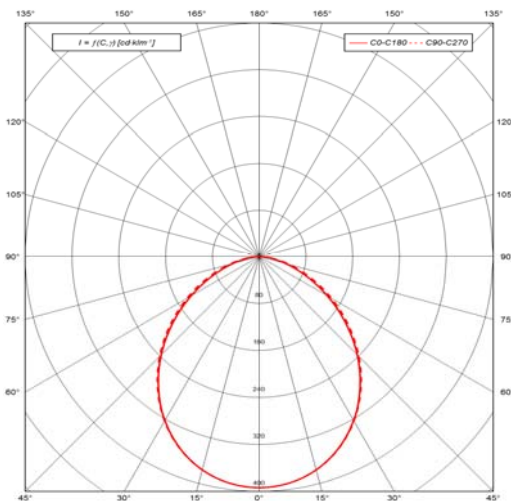
Opis eksperymentu

W pracy porównano parametry techniczne dwóch opraw oświetleniowych. W pierwszej oprawie oświetleniowej o wymiarach 600 x 180 x 128 mm i masie 1,5 kg oznaczonej jako L226 wykorzystano 392 diody LED o mocy znamionowej 450 mW określonej dla temperatury otoczenia 25°C. Ze względu na nominalne napięcie włączenia diody na poziomie 3 V opracowano układ elektryczny tworzący moduł łączący szeregowo 14 diod LED i wykorzystano w oprawie oświetleniowej 28 tego typu modułów. W konstrukcji drugiej oprawy oświetleniowej oznaczonej jako L230 o wymiarach 690 x 180 x 128 mm wykorzystano 30 opisywanych powyżej modułów łączonych równolegle. Do zasilania opraw oświetleniowych wykorzystano dedykowany zasilacz renomowanego producenta o mocy wyjściowej na poziomie 75 W zasilany napięciem sieciowym 230 VAC, gwarantujący utrzymanie współczynnika mocy powyżej 0,9 i sprawności na poziomie 88% przy pełnym obciążeniu. Zasilacz ten pozwala uzyskać wartość prądu wyjściowego na poziomie 2 A przy tętnieniach wysokiej częstotliwości na poziomie poniżej 15%. Przy obciążeniu zasilacza poniżej 20W jego sprawność energetyczna spada zgodnie z danymi katalogowymi do poziomu poniżej 83%, a współczynnik zawartości harmonicznych wzrasta do wartości THD powyżej 13%, co wskazuje potencjalne zyski jakie tkwią jeszcze w zakresie poprawy konstrukcji zasilaczy dedykowanych do źródeł LED.

Analiza uzyskanych wyników

Oprawa oświetleniowa L226 jest zasilana docelowo wartością prądu na poziomie 830 mA, co pozwala uzyskać wartość prądu 30 mA w każdym analizowanym module LED. Przy dobranym w ten sposób punkcie pracy można uzyskać z każdej diody LED strumień świetlny na poziomie 12 lm, co daje sumaryczną wartość strumienia świetlnego całej oprawy na poziomie 4 700 lm. Zastosowane w oprawie źródła LED pracują w takim przypadku przy około 20% mocy znamionowej. Temperatura pracy zastosowanych w oprawie diod LED jest zbliżona w tym przypadku do temperatury otoczenia, co pozwala uzyskać wynikowy strumień świetlny z oprawy na poziomie 4 600 lm przy mocy czynnej na poziomie 35,5 W i bardzo wysokiej skuteczności świetlnej na poziomie 130 lm/W. Zastosowanie źródeł światła LED o odpowiedniej charakterystyce kierunkowej w połączeniu z mlecznym

kloszem minimalizującym efekt olśnienia z odpornego na uderzenia poliwęglanu Makrolon® pozwala uzyskać rozsył światłości zbliżony do zgodnego z prawem Lamberta zaprezentowany na Rys. 1. W oprawie udało się w ten sposób uzyskać maksymalną światłość na poziomie 400 cdklm⁻¹.

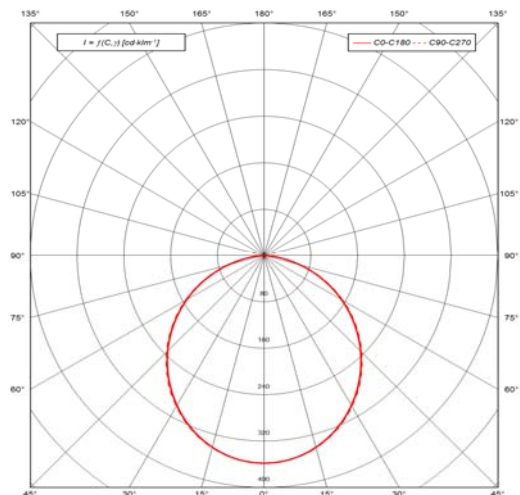


Rys.1. Rozsył światłości z oprawy L226.

Oprawa oświetleniowa L230 jest zasilana docelowo wartością prądu na poziomie 1 400 mA, co pozwala uzyskać wartość prądu 47 mA w każdym analizowanym module LED. Przy dobranym w ten sposób punkcie pracy można uzyskać z każdej diody LED strumień światłny na poziomie powyżej 17 lm, co daje sumaryczną wartość strumienia światelnego całej oprawy na poziomie 7 300 lm. Zastosowane w oprawie źródła LED pracują w takim przypadku przy około 30% mocy znamionowej. Temperatura pracy zastosowanych w oprawie diod LED osiąga w takim przypadku wartość na poziomie 70°C, co pozwala uzyskać wynikowy strumień światłny z oprawy na poziomie 5 600 lm przy mocy czynnej na poziomie 61,7 W i ograniczonej skuteczności świetlnej na poziomie 90 lm/W. Analizowany przypadek pokazuje w drastyczny sposób spadek strumienia emitowanego przez białe diody LED wraz ze wzrostem temperatury. Wzrost temperatury pracy źródeł LED o 40°C prowadzi nieuchronnie do zmniejszenia wartości strumienia światelnego o 25%. Analizowany przypadek rysuje zakres koniecznej optymalizacji zarówno w zakresie odprowadzania ciepła ze źródeł LED nawet przy punkcie pracy bardzo odległym od wartości nominalnych pracy źródeł LED, ale pokazuje także znaczenie doboru zasilacza do projektowanej oprawy. Zastosowanie zasilacza renomowanego producenta pozwala na spełnienie norm związanych z odpornością i emisją EMC, pomimo że sprawność zasilacza spada do poziomu 85% przy zasilaniu oprawy L226. W przypadku zastosowania dla analogicznej oprawy zasilacza innego producenta pracującego przy obciążeniu na poziomie 40% mocy znamionowej może z całą pewnością powodować poważne problemy z uzyskaniem certyfikacji na zgodność z normami EMC, co zostało potwierdzone w wyniku prowadzonych w tym zakresie badań. Rozsył światłości dla oprawy L230 został zaprezentowany na Rys. 2. W oprawie uzyskano maksymalny strumień światłny na poziomie 360 cdklm⁻¹, co jest ewidentnie efektem samonagrzewania się źródeł LED przy zdefiniowanym punkcie pracy.

Wpływ analizowanych zjawisk termicznych został dodatkowo potwierdzony przy realizacji oprawy specjalnej o mocy czynnej 266 W zaprojektowanej w celu uzyskania strumienia światelnego na poziomie 20 000 lm. Przy

porównywalnym prądzie zasilania lampy (1,25 A) uzyskano skuteczność świetlną oprawy na poziomie 75 lm/W przy maksymalnej światłości ponownie na poziomie 360 cdklm⁻¹.



Rys.2. Rozsył światłości z oprawy L230.

Poglądowe zdjęcie prezentujące konstrukcję analizowanych opraw oświetleniowych zostało zaprezentowane na Rys. 3. Warto w tym miejscu wspomnieć o doskonałych właściwościach optycznych tworzyw poliwęglanowych Makrolon®. Zastosowanie tego typu dyfuzorów eliminuje całkowicie efekty związane z oślepianiem charakterystycznym dla źródeł LED, co jest szczególnie istotne przy konstrukcji opraw do oświetlania stanowisk pracy, w szczególności przeznaczonych do zadań specjalnych do pracy w ekstremalnie trudnych warunkach oświetleniowych.



Rys. 3 Zdjęcie przykładowej oprawy serii VIKING.

Analizowany wpływ temperatury pracy złącza diody LED na wartość strumienia światelnego ma zasadniczy wpływ na żywotność źródeł LED, co jest zagadnieniem intuicyjnym dla zespołów pracujących w tematyce technologii półprzewodnikowej, a często pomijanym przez konstruktorów opraw oświetleniowych wykorzystujących diody LED, ponieważ tego typu dane nie są często zamieszczone w kartach katalogowych diod świecących LED. W dobrym przybliżeniu należy założyć, że skrócenie czasu życia diody pracującej w temperaturach do 40°C jest efektem pomijalnym. Wzrost temperatury pracy złącza do 60°C będzie jednak redukował żywotność tego typu źródeł o około 75%, a dalszy wzrost temperatury złącza do

wartości 80°C będzie prowadził do obniżenia żywotności o 85% w porównaniu ze wspomnianą temperaturą referencyjną na poziomie 40°C [2]. Na podstawie tych danych można wnioskować, że wszelkie zabiegi związane ze skutecznym odprowadzaniem ciepła ze struktury półprzewodnikowej diody LED poprzez dobór odpowiedniego materiału na płytki drukowane, sam projekt płytki drukowanej, sposób montażu płytki drukowanej do obudowy oprawy oświetleniowej, a także rozmieszczenie diod na płytce drukowanej będą miały decydujący wpływ na żywotność źródeł w projektowanych oprawach oświetleniowych. Wzrost temperatury pracy złącza sprzyja generacji i migracji defektów w strukturze półprzewodnikowej, pękaniu struktur półprzewodnikowych na skutek różnych współczynników rozszerzalności termicznej materiałów tworzących strukturę diody LED, dyfuzji domieszek tworzących złącze półprzewodnikowe, przyspieszonej elektromigracji atomów tworzących kontakty elektryczne do struktury półprzewodnikowej, interdyfuzji materiałów tworzących te kontakty oraz degradacji połączeń drutowych w obudowie oraz degradacji samej obudowy diody LED wykonanej z tworzywa sztucznego. Cykliczne stropy termiczne mogą też prowadzić do delaminacji materiałów tworzących diodę LED, pękania soczewek wyjściowych i uszkodzeń luminoforu odpowiedzialnego za przetwarzanie promieniowania z zakresu widzialnego lub promieniowania UV na światło białe, a w skrajnych przypadkach nawet do zmiany struktury połączeń lutowanych pomiędzy diodą LED i płytką drukowaną prowadzącej do modyfikacji parametrów elektrycznych takiego połączenia [2].

Wszystkie opisywane powyżej efekty nakładają się na naturalny mechanizm starzenia się źródła LED, który w przypadku diod o najwyższej jakości skutkuje obniżeniem strumienia świetlnego źródła światła o około 10% po czasie 10 000 godzin pracy w temperaturze nie przekraczającej 40°C.

Podsumowanie

W ramach prowadzonych prac badawczo-rozwojowych porównano dwie oprawy ze źródłami LED przeznaczone do oświetlania specjalistycznych miejsc pracy. Oprawa L226 została zaprojektowana pod kątem uzyskania maksymalnej wartości skuteczności świetlnej poprzez dobór odpowiedniego punktu pracy diod LED przy określonych parametrach termicznych oprawy oświetleniowej. W wyniku prowadzonych badań uzyskano wartość na poziomie 130 lm/W przy zasilaniu źródeł światła wartością mocy równą 20% mocy nominalnej źródeł, co stanowi bardzo dobry wynik w porównaniu z produktami konkurencyjnymi. Zwiększanie mocy wydzielanej w źródłach LED prowadzi nieuchronnie do samonagrzewania struktury i proporcjonalnego ograniczenia skuteczności świetlnej oprawy oświetleniowej, co wykazano na przykładzie oprawy L230, a w efekcie do skrócenia żywotności źródeł światła. Dalsze prace prowadzone są w kierunku poprawy rozpraszania ciepła poprzez zabiegi zmierzające do ograniczenia rezystancji termicznej wewnątrz oprawy oświetleniowej na drodze od źródeł LED do aluminiowej obudowy, która powinna stanowić naturalny radiator dla pracujących wewnątrz oprawy źródeł światła. Zmiana źródeł światła ze świetlówek kompaktowych na źródła LED pozwoliła w znaczny sposób zredukować moc pobieraną

przez oprawę oświetleniową przy jednoczesnej poprawie jej parametrów użytkowych, z odpornością na wibracje i udary włącznie. Zamiana świetlówek kompaktowych na nowoczesne źródła LED pozwoliła ponad pięciokrotnie zwiększyć strumień światła oprawy oświetleniowej przy określonej mocy elektrycznej źródła światła i ponad dwukrotnie zwiększyć czas pomiędzy wymianą źródeł światła w oprawie. W przypadku zoptymalizowanej oprawy oświetleniowej L226 można bezpiecznie deklarować żywotność źródeł światła na poziomie 40 000 godzin pracy przy temperaturze otoczenia na poziomie 30°C, a nawet przy temperaturze 50°C przy nieznacznie obniżonym strumieniu świetlnym, co jest praktycznie niezauważalne z punktu widzenia użytkownika w porównaniu z parametrami opraw wykorzystujących świetlówek kompaktowe.

Poza zastosowaniami specjalnymi miniaturowe przetwornice napięcia o bardzo wysokiej sprawności energetycznej są sporadycznie stosowane w oprawach oświetleniowych ze względu na koszty nowoczesnych rozwiązań zasilania. Rozwiązania takie przyjmują się przede wszystkim w przypadku przenośnych opraw oświetleniowych korzystających z zasilania bateryjnego ze względu na wydłużenie czasu pracy źródeł światła bez konieczności wymiany i doładowywania akumulatorów, w tym także akumulatorów zewnętrznych, które nie stanowią integralnej części oprawy oświetleniowej. Nowej generacji zasilacze pozwalają dodatkowo na wyraźne obniżenie masy kompletnej oprawy oświetleniowej.

Szansą rynkową jest przede wszystkim standaryzacja magistrali zasilających oprawy oświetleniowe wykorzystujące źródła LED w budynkach mieszkalnych oraz budynkach użyteczności publicznej, a w szczególności w pomieszczeniach biurowych stanowiących infrastrukturę wieżowców, gdzie koszty implementacji i amortyzacji wdrażania tego typu rozwiązań mogą być w sposób globalny optymalizowane. Rozwoju tego typu technologii upatruje się obecnie w instalacjach elektrycznych sprzężonych z instalacjami fotowoltaicznymi z uwagi na jeszcze wyższą sprawność energetyczną przekształtników energoelektronicznych z grupy DC/DC.

Prace zostały zrealizowane w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Mazowieckiego na lata 2014-2020, Działanie 1.2 „Działalność badawczo-rozwojowa przedsiębiorstw” w projekcie „Opracowanie przez spółkę Teknosystem wielozadaniowej, ledowej oprawy oświetleniowej, przeznaczonej do oświetlania specjalistycznych miejsc pracy”

Autorzy: dr hab. inż. Mariusz Sochacki, Politechnika Warszawska, Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: Msochack@elka.pw.edu.pl, Teknosystem Sp. z o.o., ul. Małowiejska 25, 04-962 Warszawa, mgr inż. Piotr Giemza, Teknosystem Sp. z o.o., ul. Małowiejska 25, 04-962 Warszawa, E-mail: piotr.giemza@teknosystem.com.pl

LITERATURA

- [1] Thielemans S., Di Zenobio D., Touhafi A., Lataire P., Steenhaut K., DC grids for smart LED-based lighting: The EDISON solution, *Energies*, 10 (2017), 1454.
- [2] Chang M-H., Das D., Varde P.V. Pecht M., Light emitting diodes reliability review, *Microelectronics Reliability*, 52 (2012), 762-782.