

## Systemowe podejście do analizy niezawodności infrastrukturalnych opraw LED

**Streszczenie.** Jednym z najbardziej podstawowych czynników decydujących o wyborze źródła światła jest trwałość. W artykule przedstawiono systemowe podejście do oceny trwałości oprawy infrastrukturalnej. Opisano najbardziej krytyczne elementy oprawy oraz mechanizmy uszkodzenia, które najczęściej spotykane.

**Abstract.** One of the most basic decision factors for light source selection is lifetime. The systematic approach of an infrastructure luminaire reliability estimation is presented in the article. The most critical elements and the most common fault modes are described. (**The systematic approach of an infrastructure luminaire reliability estimation**).

**Słowa kluczowe:** oprawa LED, niezawodność, dioda LED, zasilacz .

**Keywords:** LED luminaire, reliability, LED diode, LED driver.

### Wstęp

Od czasów prehistorycznych sztuczne światło jest niezwykle istotne w życiu ludzi. Sztuczne światło pozwala zwiększać bezpieczeństwo i wydłużać godziny funkcjonowania. Dlatego technologie sztucznego oświetlenia intensywnie się rozwijają zwiększając komfort użytkownika i zmniejszając zużycie zasobów. Metody oświetlenia zmieniły się od palenia drewna w ogniskach, użycia świec i lamp naftowych po oświetlenie elektryczne (żarówki, lampy wyładowcze, diody LED) [1] – [3].

Oświetlenie przy użyciu diod LED zaczęło intensywnie rozwijać się na początku XXI wieku i obecnie jest dominującą technologią w oświetleniu. Wielka popularność oświetlenia LED na rynku jest spowodowana wysoką efektywnością i relatywnie wysoką niezawodnością. Również regulacje prawne wymuszają stosowanie bardziej ekologicznych rozwiązań, narzucając minimalną efektywność energetyczną [4], [5] i ograniczając stosowanie szkodliwych substancji chemicznych, na przykład takich jak rtęć i ołów [6]. Do doskonalenia znanych rozwiązań przyczyniają się też wymagania rynkowe, np. przy oświetleniu infrastrukturalnym często wymagana jest gwarancja na oprawę na 10, a nawet 15 lat. Z drugiej strony oprawy infrastrukturalne muszą pracować w trudnych warunkach: w szerokim zakresie zmian temperatur, przy narażeniach na wibracje, wilgotność, kurz, piasek, wyładowania atmosferyczne, czy narażeniach na sól (w obszarach nadmorskich).

Oczekiwania klienta oraz wymogi prawne zmuszają producentów oświetlenia do analizy możliwości ulepszenia swoich produktów oraz implementacji w nich najnowszych osiągnięć naukowych. Zastosowanie inteligentnych systemów sterowania oświetleniem pozwala poprawić komfort i bezpieczeństwo użytkowników, efektywniej zarządzać całą infrastrukturą poprzez racjonalizację oświetlenia przestrzeni oraz świadome planowanie akcji serwisowych, co jest szczególnie ważne w takich obszarach jak oświetlenie drogowe i oświetlenie obiektów krytycznych.

Większość opracowań naukowych poświęconych niezawodności urządzeń oświetleniowych ogranicza się do opisu jedynie poszczególnych mechanizmów uszkodzenia nie rozpatrując oprawy oświetleniowej jako całościowego produktu [9, 10, 11, 12, 13] lub skupia się na metodach testowania produktów w celu potwierdzenia niezawodności produktów [14-17]. Jednak producenci opraw nie są w stanie wykonywać nawet przyspieszonych testów przy każdej podmianie komponentów oprawy na zamienniki

dokonywanej w przypadku braku dostępu do oryginalnych komponentów lub przy optymalizacji cenowej. Dlatego często proponowane w naukowych opracowaniach podejścia do weryfikacji niezawodności mają ograniczone zastosowanie w praktyce. W celu zapewnienia wysokiej jakości produktów oraz zwiększenia komfortu i bezpieczeństwa użytkowników warto dokonać kompleksowej analizy czynników wpływających na okres życia produktu.

### Definicja uszkodzenia oprawy oświetleniowej

W celu wyznaczenia parametrów niezawodnościowych urządzenia należy zdefiniować czym jest uszkodzenie. Uszkodzenie to utrata zdolności obiektu do wypełniania wymaganej funkcji [7]. W przypadku opraw oświetleniowych LED z reguły wyróżnia się dwie kategorie uszkodzeń:

a) uszkodzenie całkowite – urządzenie przestaje działać. Na przykład uszkodzenie, na skutek którego strumień świetlny jest zerowy.

b) uszkodzenie stopniowe – urządzenie wciąż działa, ale nie spełnia nominalnych parametrów. Na przykład wystąpiło obniżenie strumienia świetlnego, zmiana barwy światła, czy chociażby zwiększenie współczynnika migotania światła.

### Podsystemy oprawy oświetleniowej

Zgodnie z definicją podaną w [7] system to zbiór wzajemnie ze sobą powiązanych lub wzajemnie na siebie oddziałujących elementów [8]. W literaturze proponuje się różne sposoby dekompozycji systemu oprawy oświetleniowej na elementy w celu analizy niezawodności. W [18] zostały wydzielone następujące podsystemy: optyczny, elektryczny i termiczny. Natomiast w [19] jako główne składowe wpływające na niezawodność oprawy wymieniono: diody LED, zasilacz, optykę główną (soczewki, lustra, klosze) i dodatkowe odbłyśniki. W [20] został zaproponowany jeden z najbardziej szczegółowych sposobów dekompozycji oprawy na podsystemy: pakiety LED; połączenia (luty, połączenia termiczne); złącza; komponenty elektroniczne; system chłodzenia; elementy optyczne (soczewki, odbłyśniki, lakierowanie); uszczelki; systemy mocowania. Jednak rozwój technologii i coraz częstsze stosowanie inteligentnych systemów sterowania oświetleniem wnosi jeszcze jedną składową, która wpływa na niezawodność opraw. W przypadku współczesnych opraw oświetleniowych zawierających elementy sterowania przy ocenie niezawodności należy uwzględnić wpływ

oprogramowania wbudowanego na niezawodność oprawy. Rozpatrując oprawę oświetleniową jako system i uwzględniając obecne kierunki rozwoju technologii oświetleniowej możemy wydzielić następujące podsystemy:

1. optyczny (pakiety LED, soczewki, odbłyśniki),
2. elektryczny (zasilacze, kontrolery, czujniki, zabezpieczenia przeciwprzepięciowe),
3. mechaniczny (elementy montażowe, złącza, uszczelki),
4. termiczny (radiator, elementy termoprzewodzące),
5. oprogramowanie.

Ze względu na coraz częstsze stosowanie w oprawach infrastrukturalnych elementów sterowania, jak na przykład kontrolery LUG Light Factory iBLOC lub eBLOC, które umożliwiają zdalne sterowanie oprawą i monitorowanie elektrycznych parametrów [8], pojawiają się awarie systemu, które nie prowadzą ani do całkowitego uszkodzenia ani do uszkodzenia stopniowego. Awariami systemu można nazwać takie sytuacje, kiedy to oprogramowanie ze względu na występujące w nim defekty, powoduje, że cały system oświetlenia nie może realizować funkcji do których został stworzony. Przykładem takich awarii może być utrata komunikacji z oprawą, błędny odczyt parametrów elektrycznych oprawy itp.

Wówczas będziemy mieli do czynienia z częściową utratą funkcjonalności systemu oświetleniowego. Często naprawa takiego stanu może odbywać się zdalnie lub system może powrócić do normalnej pracy bez ingerencji operatora. Nie zaliczamy do awarii systemu całkowitych uszkodzeń oprawy, spowodowanych błędami w oprogramowaniu (np. wysterowanie modułów LED zbyt wysokim prądem wskutek błędnego działania oprogramowania), ponieważ do całkowitego uszkodzenia wskutek niepoprawnego działania oprogramowania dochodzi bardzo rzadko, dlatego zostanie to pominięte przy dalszej analizie niezawodności opraw infrastrukturalnych.

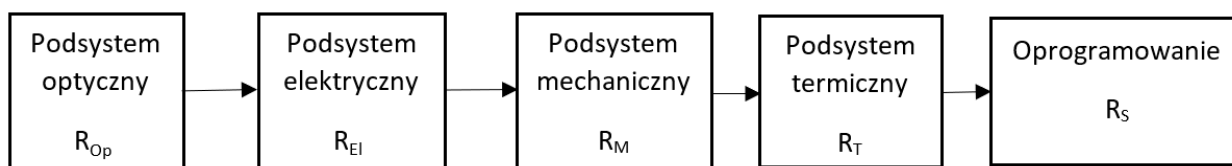
Uwzględniając zdefiniowane wcześniej pojęcia uszkodzenia i awarii systemu oprawą oświetleniową możemy przedstawić jako szeregowe połączenie podsystemów, co oznacza, że uszkodzenie lub awaria jednego podsystemu prowadzi do uszkodzenia lub awarii całego systemu (Rys. 1).

Na podstawie modelu niezawodnościowego oprawy oświetleniowej LED prawdopodobieństwo braku uszkodzeń przed czasem  $t$  całego systemu będzie wynosiło

$$(1) \quad R_{system} = R_{Op} \cdot R_{El} \cdot R_M \cdot R_T \cdot R_S,$$

gdzie  $R_{Op}$ ,  $R_{El}$ ,  $R_M$ ,  $R_T$ ,  $R_S$  – prawdopodobieństwo braku uszkodzenia/awarii przed czasem  $t$  odpowiednio podsystemów: optycznego, elektrycznego, mechanicznego, termicznego oraz oprogramowania.

W celu poprawy niezawodności systemu należy zwiększyć niezawodność poszczególnych elementów lub zastosować redundancję. W przypadku opraw oświetleniowych dublowanie poszczególnych podsystemów jest nieuzasadnione ekonomicznie, ponieważ istotnie



Rys. 1. Model niezawodnościowy oprawy oświetleniowej LED

zwiększyłyby to cenę produktu i często byłoby trudne w realizacji. Dlatego w tego rodzaju produktach należy skupić się na przyczynach uszkodzeń oraz ulepszeniu niezawodności poszczególnych podsystemów oprawy.

### Analiza przyczyn uszkodzeń podsystemu optycznego

Do podsystemu optycznego zaliczamy wszystkie elementy, które mają bezpośredni wpływ na jakość światła: pakiety LED, soczewki, odbłyśniki, klosze. Uszkodzenia w tym podsystemie z reguły prowadzą do zmiany natężenia oświetlenia, barwy światła lub bryły fotometrycznej. Najbardziej typowym rodzajem uszkodzenia jest stopniowy spadek strumienia w czasie. Ten parametr często jest definiowany jako osobne wymaganie w zamówieniach przetargowych. Często też niepoprawnie używa się go jako charakterystykę czasu życia całej oprawy.

Normy ANSI/IEC LM-80 oraz IEC 62717 definiują warunki badania utrzymania parametrów światła diod LED. Norma ANSI/IEC LM-80 została opracowana przez Illuminating Engineering Society of North America. Natomiast IEC 62717 została opracowana przez Międzynarodową Komisję Elektrotechniczną i dotyczy ona modułów zbudowany z diod LED. IEC 62717 oprócz definicji warunków badań daje wskazówki jak należy ekstrapolować dane otrzymane w wyniku badań (np.  $L_x B_y$ ). Do ekstrapolacji danych otrzymanych w wyniku badań wg LM-80 stosuje się z reguły metodykę opisaną w TM-21 Technical Memorandum: Projection Long-term Lumen, Photon, and Radiant Flux Maintenance of LED Light Sources (ostatnia edycja TM-21-19).

Trwałość diod LED w dużym stopniu zależy od temperatury złącza  $T_j$  [21]. Diody LED wytwarzają światło, gdy przez złącze chipa przepływa prąd. Choć diody LED są obecnie bardzo wydajne, duży ułamek mocy wejściowej generuje ciepło, a nie światło. Wygenerowane ciepło, które nie zostanie w porę rozproszone, będzie miało nie tylko natychmiastowy negatywny wpływ na skuteczność świetlną, ale także z czasem zmniejszy skuteczność świetlną diody LED i może spowodować przedwczesne uszkodzenie.

$T_j$  diody LED nie można zmierzyć bezpośrednio; można ją obliczyć przy użyciu poniższego równania:

$$(2) \quad T_j = T_S + \theta_{th} P_{total},$$

gdzie  $T_S$  – temperatura zmierzona w punkcie lutowania;  $\theta_{th}$  – termiczna rezystancja diody,  $P_{total}$  – całkowity pobór mocy diody LED.  $P_{total}$  oblicza się mnożąc prąd wejściowy ( $I_f$ ) przez napięcie przewodzenia ( $V_f$ ) [22].

Ze wzoru (2) wynika, że temperatura i prąd są głównymi czynnikami zewnętrznymi definiującymi trwałość diody LED ponieważ napięcie na diodzie zmienia się w niewielkim stopniu przy zmianie prądu. Czym wyższa temperatura  $T_S$  i czym wyższym prądem sterowana jest dioda, tym większa jest temperatura złącza  $T_j$  i tym niższy jest czas życia diody, czyli w przypadku diody LED, szybszy spadek strumienia świetlnego.

Analizując raporty LM-80 wiodących producentów diod LED można stwierdzić, że przy odpowiednim doborze prądu i systemu chłodzenia współczesne diody wykazują zmniejszenie strumienia świetlnego do poziomu 90% (L90) po 100 000 godzinach pracy [23, 24]. Dlatego głównymi zadaniami producentów opraw są: weryfikacja jakości zakupywanych diod LED, zaprojektowanie odpowiedniego systemu chłodzenia i dobrane optymalnego prądu sterowania diodą.

Innymi przyczynami uszkodzenia diod LED są czynniki chemiczne i wyładowania elektrostatyczne. W tym przypadku obserwujemy szybki spadek strumienia i/lub zmianę barwy światła, a następnie często całkowite uszkodzenie diody LED. W celu uniknięcia chemicznego uszkodzenia diod LED należy stosować się do wskazań producentów [25 – 27] i rzetelnie weryfikować podzespoły oprawy oświetleniowej takie jak uszczelki, dławiki, stosowane kleje oraz uważnie analizować miejsce aplikacji opraw. Narażenie diod LED (a także innych półprzewodnikowych podzespołów elektroniki) na wyładowanie elektrostatyczne prowadzi do powstania mikropęknięć i uszkodzenia podzespołów w początkowym okresie użytkowania. W celu wyeliminowania uszkodzeń spowodowanych wyładowaniami elektrostatycznymi należy odpowiednio zabezpieczyć proces magazynowania komponentów i produkcji opraw oraz używać stosownych zabezpieczeń przy serwisie opraw.

### **Analiza przyczyn uszkodzenia podsystemu elektrycznego**

Osprzęt elektryczny taki jak zasilacze, kontrolery, czujniki, złącza, zabezpieczenia przeciwprzepięciowe to podstawowe elementy podsystemu elektrycznego. Jednym z kluczowych elementów oprawy oświetleniowej jest urządzenie, które stanowi interfejs pomiędzy siecią zasilającą a podsystemem optycznym. Oprawy infrastrukturalne w Europie zasilane są energią elektryczną z sieci prądu przemiennego o napięciu 230 ( $\pm 10\%$ ) voltów i częstotliwości 50 Hz [6] chociaż rośnie również odsetek opraw (np. solarnych) zasilanych napięciem stałym, najczęściej 24 V. Dlatego zasilacze stosowane w oświetleniu LED dzieli się na 2 podstawowe kategorie – zasilacze AC/DC i zasilacze DC/DC. Budowa zasilaczy może istotnie się różnić w zależności od wymaganej funkcjonalności. Najprostsze modele zapewniają na wyjściu określone parametry napięcia i prądu, bardziej złożone modele pozwalają na sterowanie natężeniem oświetlenia, barwą światła, obsługę czujników (np. czujników ruchu), posiadają opcję utrzymania strumienia w czasie (ang. Constant Lumen Output) i in. Niezawodność poszczególnych modeli może istotnie się różnić. Niezależnie od różnic w blokach funkcjonalnych, kluczowym czynnikiem wpływającym na niezawodność zasilaczy jest temperatura. Szczególnie wpływ temperatury na trwałość zasilacza można zaobserwować w zasilaczach LED z kondensatorem elektrolitycznym.

W układach zasilających AC/DC nawet 60% uszkodzeń jest związanych z uszkodzeniem kondensatora elektrolitycznego [34]. Uszkodzenia kondensatorów elektrolitycznych również dzielą się na parametryczne i całkowite. Parametryczne uszkodzenie oznacza zmianę pojemności, współczynnika rozproszenia lub prądu upływu. W kondensatorach elektrolitycznych wyróżnia się następujące rodzaje uszkodzeń: zwarcie, rozwarcie, spadek pojemności, wzrost współczynnika rozproszenia, wzrost prądu upływu, uszkodzenie wentylu i/lub uszczelki, wyciek elektrolitu. Trwałość kondensatorów elektrolitycznych w dużej mierze zależy od sposobu ich aplikacji w układzie. Oprócz już wymienionej temperatury na trwałość tego

rodzaju kondensatorów mają wpływ czynniki środowiskowe takie jak wilgotność, ciśnienie atmosferyczne i wibracje oraz czynniki elektryczne (napięcie pracy, prąd ładowania i rozładowania oraz wartość tętnień prądu). Jeśli kondensatory są używane w typowym obwodzie filtrującym, temperatura otoczenia i nagrzewanie spowodowane tętnieniami prądu są kluczowymi czynnikami określającymi trwałość [35, 36].

Często w praktyce przyjmuje się uproszczoną regułę, że trwałość elektrolitycznego kondensatora podwaja się przy obniżeniu temperatury o 10°C. Jednak proces degradacji jest bardziej skomplikowany i najlepiej korzystać z modeli predykcji trwałości opracowanych przez producenta kondensatora.

Problem ograniczonego czasu życia kondensatorów elektrolitycznych jest na tyle istotny, że wciąż pojawiają się opracowania dotyczące testowania i metod predykcji trwałości, jak na przykład [34, 37, 38]. Takie opracowania mają na celu zwiększenie dokładności estymacji życia kondensatora i odpowiednio całego produktu. W przypadku opraw infrastrukturalnych często jest istotne zaplanowanie i przeprowadzenie w odpowiednim czasie konserwacji [39]. Dlatego możliwość wczesnego wykrycia pojawiających się problemów związanych z kondensatorem elektrolitycznym i zaplanowania wymiany zasilacza jest szczególnie atrakcyjna w przypadku oświetlenia drogowego. Opracowany przez zespół firmy LUG Light Factory zasilacz impulsowy z układem pomiaru degradacji pojemności kondensatora elektrolitycznego pozwala na wczesne przygotowanie się do czynności konserwacyjnych [40].

Innym sposobem zwiększenia niezawodności zasilaczy AC/DC jest stosowanie topologii pozwalającej na rezygnację z kondensatora elektrolitycznego, jak na przykład topologie opisane w [41, 42, 43]. Jednak na rynku trudno znaleźć takie rozwiązania, szczególnie do oświetlenia infrastrukturalnego.

Pozostałe komponenty zasilacza, jak na przykład diody, tranzystory MOSFET, komponenty indukcyjne również mogą powodować uszkodzenie urządzenia lecz rzadko charakteryzują się uszkodzeniami stopniowymi i przy zastosowaniu ich zgodnie ze zaleceniami producenta wykazują trwałość dłuższą lub podobną do pakietów LED [44, 45]. Wpływ na niezawodność pozostałych komponentów zasilaczy musi być analizowany indywidualnie. Natomiast elementem wspólnym dla wszystkich komponentów podsystemu elektrycznego, który tak jak kondensator elektrolityczny może istotnie ograniczyć życie urządzeń jest połączenie lutowane [28].

Przejsie na stopy bezołowiowe przyczyniło się do zmniejszenia niezawodności połączeń lutowniczych. Częściej powstają wady lutowania takie jak tworzenie mostków, występowanie luźnych rozproszonych kulek na powierzchni płytki, występowanie kulek lutu pod podzespołami R/C, efekt nagrobkowy, wciąganie lutu pod końcówkę, powstanie pustych przestrzeni w połączeniu lutowanym, wady połączeń lutowanych ukrytych pod obudową podzespołów, takich jak PBGA, mikro-BGA, CSP. Dodatkowo w przypadku lutowania bezołowiowego częściej powstają zjawiska nie wiążące się bezpośrednio z połączeniem lutowanym takie jak wasy (wiskersy) cyny, powstanie dróg przewodzenia w dielektryku (ang. Conductive Anodic Filaments), pelzająca korozja, zaraza cynowa [29]. Do zapewnienia odpowiedniej jakości należy dokładnie kontrolować proces lutowania, na przykład poprzez stosowanie automatycznych optycznych systemów kontroli (AOI) lub automatycznej kontroli rentgenowskiej [29, 30]. Dodatkowo jakość oraz parametry niezawodnościowe połączeń lutowniczych można ocenić

poprzez wykonanie testów przyspieszonych. Takie testy opisano w [28, 31, 32, 33].

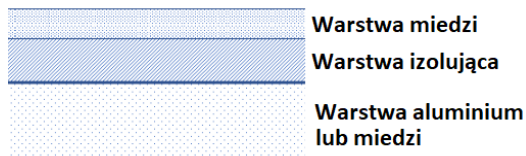
Do szacowania niezawodności urządzeń elektronicznych oprócz testów, powszechnie używa się obliczeń wg standardów przemysłowych. Najbardziej popularnymi standardami są Mil-Hdbk-217 i Telcordia Special Report SR-332. Jednak te metody są mniej wiarygodne i bez dodatkowych testów i analiz nie mogą być użyte do definicji parametrów gwarancji.

Rozpatrując podsystem elektryczny w kontekście opraw infrastrukturalnych należy zadbać o jego zabezpieczenie przed oddziaływaniem czynników środowiskowych. Do takich zabezpieczeń należą różnego rodzaju zalewy, najczęściej stosowane w przypadku zasilaczy oraz zabezpieczenia lakiernicze, które z reguły stosuje się na powierzchniach płytek drukowanych w różnego rodzaju kontrolerach do sterowania oświetleniem. Niewłaściwa aplikacja takich zabezpieczeń może również wpływać na trwałość urządzeń. Żeby tego uniknąć należy dokładnie kontrolować proces technologiczny.

W oświetleniu infrastrukturalnym częstymi przyczynami uszkodzeń są przepięcia w obwodzie zasilania. Prawidłowe zaprojektowanie systemu zabezpieczenia przeciwprzepięciowego pozwala znacznie zwiększyć  $R_{Op}$  i  $R_{El}$  [46].

### Analiza przyczyn uszkodzenia podsystemu termicznego

Do podsystemu termicznego odnosimy system chłodzenia komponentów elektroniki (moduły LED, zasilacz). Standardowo w oprawach oświetleniowych stosuje się pasywny system chłodzenia, a radiatorem jest korpus oprawy. W przypadku modułów LED elementem podsystemu termicznego jest płyta drukowana. W celu poprawy termoprzewodności często stosuje się specjalne płytki drukowane na bazie metalu – aluminium lub miedzi (Rys. 2).



Rys.2. Struktura płytki drukowanej na bazie metalu

Najczęstszymi przyczynami uszkodzeń podsystemu termicznego jest naruszenie połączeń pomiędzy różnymi komponentami, na przykład pomiędzy modułem LED a radiatorem, zbyt wysoki udział pustych przestrzeni w połączeniach lutowanych, przesunięcie elementów termoprzewodzących (np. pianek termoprzewodzących). Uszkodzenie podsystemu termicznego najczęściej prowadzi do uszkodzenia elementów podsystemów elektrycznego i optycznego. Często naruszenie połączeń pomiędzy różnymi komponentami podsystemu termicznego jest spowodowane uszkodzeniem elementów mechanicznych.

### Analiza przyczyn uszkodzenia podsystemu mechanicznego

Do podsystemu mechanicznego zaliczamy elementy montażowe, złącza, uszczelki, elementy zabezpieczające komorę optyczną i komorę zasilacza. Te elementy zapewniają właściwe mocowanie oprawy (na przykład na słupie), ochronę użytkownika przed porażeniem prądem elektrycznym, ochronę elementów podsystemów optycznego, elektrycznego i termicznego przed oddziaływaniem czynników zewnętrznych (warunki atmosferyczne, wibrację, udary, promieniowanie słoneczne). Dlatego częstymi wymaganiami do opraw

infrastrukturalnych są stopnie ochrony IP65 i IK09. Typowymi mechanizmami uszkodzeń są zmęczenie, korozja i zużycie trybologiczne. W celu potwierdzenia jakości i odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa wykonuje się symulacje komputerowe oraz szereg testów opisanych w normach EN 60598-1, EN 60068-2-6, 60068-2-75, EN 62262, EN 60529 i innych. Najczęściej korpusy opraw infrastrukturalnych wykonuje się ze stopów aluminium ze względu na małą rezystancję cieplną oraz wysoki stosunek wytrzymałości do ciężaru właściwego. Z tego względu szczególną uwagę przy konstrukcji opraw należy zwrócić na dobór materiałów, żeby uniknąć korozji elektrochemicznej, oraz na jakość stosowanych zabezpieczeń powierzchni, takich jak lakierowanie. Elementy wykonane z tworzyw sztucznych, które mogą być narażone na działania promieni słonecznych, muszą być odporne na działania UV.

### Niezawodność oprogramowania

Rozwój techniki oraz dążenie do budowy inteligentnych miast powoduje, że elementy infrastrukturalnych opraw oświetleniowych zawierają coraz bardziej skomplikowane oprogramowanie. Awaria oprogramowania jest nie mniej istotna niż uszkodzenie sprzętowe, ponieważ również prowadzi do utraty zdolności urządzenia do wypełniania wymaganych funkcji. W niezawodności oprogramowania wyróżnia się defekt, błąd i awarię. Defektem nazywamy wady oprogramowania (np. niewłaściwa obsługa bufora danych). Defekty w oprogramowaniu nie zawsze zostają ujawnione (może nie dojść lub bardzo rzadko dochodzić do wykonania takiego fragmentu kodu programu). Błąd to nieoczekiwany stan programu, który nie może być potraktowany jako poprawny. Oprogramowanie powinno zawierać mechanizmy detekcji takich niepożądanych stanów. Awaria powstaje na skutek obecności w programie defektów i błędów, co prowadzi do niemożliwości realizowania swoich funkcji. Niezawodność w oprogramowaniu często definiuje się jako zdolność programu do takiej obsługi defektów i błędów aby nie prowadziły one do występowania awarii [47]. Czynniki, które wpływają na niezawodność oprogramowania są:

- właściwości produktu, na przykład złożoność produktu;
- ryzyka produktowe, są to rzeczy, które utrudniają tworzenie oprogramowania;
- ludzie i narzędzia, czyli czynniki, które pomagają specjalistom zajmującym się oprogramowaniem być bardziej produktywnymi w opracowywaniu i testowaniu oprogramowania;
- proces, czyli czynniki, które zapewniają, że sposób tworzenia oprogramowania może być powtarzany w następnych projektach oprogramowania;
- techniki, czynniki reprezentujące specyficzne metody stosowane przez inżynierów oprogramowania podczas opracowywania specyfikacji, projektu, planów testów itp. Nie należy ich mylić z procesem tworzenia oprogramowania.

Warto podkreślić, że awaria oprogramowania często jest pierwotną przyczyną uszkodzenia produktu, a testy nie pozwalają wykryć wszystkich defektów i błędów znajdujących się w oprogramowaniu. W celu zwiększenia niezawodności oprogramowania oprócz testowania można zastosować metodę FMEA (ang. Failure Mode and Effects Analysis) oraz stosować rekomendacje opisane w IEEE 1633: Recommended Practice on Software Reliability.

W przypadku oceny oprogramowania do łączenia opraw oświetleniowych w system warto postawić się takim pojęciem jak wiarygodność oprogramowania (ang. dependability), które jest szerszym pojęciem niż niezawodność. Wiarygodność oprogramowania zawiera w

sobie takie elementy jak niezawodność, dostępność, odporność (ang. robustness), integralność (ang. integrity), bezpieczeństwo [48]. Wytyczne do osiągania wiarygodności w działaniu oprogramowania zależnie od metod zarządzania, procesów projektowania i środowisk zastosowania można znaleźć w normie EN 62628 „Wytyczne dotyczące wiarygodności oprogramowania”.

Potwierdzeniem jakości oprogramowania będzie posiadanie przez producenta odpowiednich certyfikatów lub badań, na przykład zgodność z protokołem DALI.

## Podsumowanie

Rozwój technologii przyczynia się do zwiększenia komfortu, bezpieczeństwa i energooszczędności. Powoduje to również wzrost złożoności produktów. Nacznym przykładem takiego produktu jest oprawa oświetleniowa wykonana w technologii LED. Na czas życia oprawy LED wpływa wiele czynników, z których sama jakość diody LED często nie jest gwarancją długiego bezawaryjnego czasu pracy oprawy. Szczególnie istotne to jest w przypadku opraw infrastrukturalnych, gdzie niezawodność jest jednym z podstawowych parametrów przy doborze oprawy ze względu na koszty obsługi i bezpieczeństwo. W celu efektywnego zarządzania jakością można zastosować systemowe podejście do zapewnienia wymaganych parametrów niezawodności produktu.

Przy systemowym podejściu do oceny niezawodności produkt jest rozpatrywany jako zbiór połączonych podsystemów. Sposób połączenia definiuje wpływ poszczególnych podsystemów na niezawodność produktu. W tej pracy infrastrukturalna oprawa oświetleniowa LED została zdekomponowana na 5 podsystemów połączonych szeregowo. Zaproponowana dekompozycja oprawy oświetleniowej na podsystemy pozwoliła w łatwy sposób zdefiniować najbardziej krytyczne komponenty oraz mechanizmy ich uszkodzeń. Zaproponowane podejście pozwala również wyznaczyć wpływ uszkodzeń poszczególnych podsystemów na inne oraz na pracę całego produktu, usprawnia współpracę poszczególnych działów odpowiedzialnych za projektowanie i dobór różnych komponentów oprawy, ułatwia opracowanie efektywnej procedury kontroli jakości oraz procedury zamiany komponentów z zachowaniem wymaganego poziomu niezawodności.

Systemowe podejście do analizy niezawodności opraw umożliwia wyznaczenie kierunków doskonalenia produktów, szacowanie ich wpływu na jakość oraz przyczynia się do skracania czasu wdrożenia, koncentrując się na weryfikacji kluczowych elementów. Takie podejście pozwala LUG Light Factory Sp. z o.o. na produkcję wysokiej jakości produktów oraz opracowanie innowacyjnych rozwiązań w zakresie racjonalizacji oświetlenia, łącząc tradycyjne potrzeby klientów z postępem technologicznym w branży i zapewniając jednocześnie równowagę między jakością światła a efektywnością energetyczną. W latach 2017 – 2020 LUG Light Factory Sp. z o.o. realizowała projekt naukowo – badawczy pn. „Innowacyjny zestaw specjalistycznych opraw oświetleniowych do współpracy z inteligentnym systemem zarządzania - od badań do prototypów” (Nr Umowy RPLB.01.01.00-08-0076/16-00), którego głównym celem było opracowanie i zwalidowanie prototypów opraw oświetleniowych wraz z rozwiązaniami elektronicznymi, umożliwiającymi włączenie ich do inteligentnych systemów sterowania oświetleniem. Projekt realizowany w ramach Osi Priorytetowej 1. Gospodarka i innowacje, Działania 1.1 Badania i innowacje Regionalnego Programu Operacyjnego – Lubuskie 2020, współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego. W efekcie realizacji projektu

badawczo – rozwojowego uzyskano zakładane rezultaty: opracowano i przygotowano do wdrożenia 46 prototypów nowych opraw oświetleniowych, z tego przygotowano 26 zgłoszeń wzorów przemysłowych, celem ochrony własności intelektualnej oraz 4 europejskie zgłoszenia patentowe, głównie związane z rozwiązaniami konstrukcyjnymi w nowych oprawach.

**Autorzy:** dr inż. Olena Hebda, LUG Light Factory Sp. z o.o., Dywizja Badawczo-Rozwojowa , ul. Gorzowska 11, 65-127 Zielona Góra, E-mail: olena.hebda@lug.com.pl.

## LITERATURA

- [1] Guarnieri M., The Rise of Light, *ICOHTEC/IEEE International History of High-Technologies and their Socio-Cultural Contexts Conference (HISTELCON)* (2015), 1-14.
- [2] Guarnieri M., An Historical Survey on Light Technologies, *IEEE Access*, vol. 6 (2018), 25881-25897.
- [3] Weisbuch Cl., Historical perspective on the physics of artificial lighting, *Comptes Rendus Physique*, vol. 19 (2018), issue 3, 89-112.
- [4] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/125/WE z dnia 21 października 2009 r. ustanawiająca ogólne zasady ustalania wymogów dotyczących ekoprojektu dla produktów związanych z energią (Dz. Urz.UE L 285 z 31.10.2009, str. z późn. zm.).
- [5] Rozporządzenie Komisji (UE) 2019/2020 z dnia 1 października 2019 r. ustanawiające wymogi dotyczące ekoprojektu dla źródeł światła i oddzielnego osprzętu sterującego na podstawie dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/125/WE oraz uchylające rozporządzenia Komisji (WE) nr 244/2009, (WE) nr 245/2009 i (UE) nr 1194/2012.
- [6] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2011/65/UE z dnia 8 czerwca 2011 r. w sprawie ograniczenia stosowania niektórych niebezpiecznych substancji w sprzęcie elektrycznym i elektronicznym (Dz. Urz.UE L 174 z 01.07.2011, str.88, z późn. zm.).
- [7] PN-EN 60812:2009 Techniki analizy nieuszkodzalności systemów Procedura analizy rodzajów i skutków uszkodzeń (FMEA).
- [8] BIOT Sp. z o.o., <https://biotcloud.com/en/hardware/> data dostępu: 19.01.2022.
- [9] Lan S., Ming Tan Ch., Wu K., Reliability study of LED driver – A case study of black box testing, *Microelectronics Reliability*, Vol. 52 (2012), Issues 9–10, 1940-1944.
- [10] Moon-Hwan Chang, Diganta Das, Varde P.V., Pecht M., Light emitting diodes reliability review. *Microelectronics Reliability* vol. 52 (2012), Issue 5, 762-782.
- [11] Chen Zhaohui, Zhang Qin, Wang Kai, Luo Xiaobing, Liu Sheng Reliability test and failure analysis of high power LED package, *Journal of Semiconductors*, vol. 32, Nr. 1 (2011).
- [12] Niu H., Wang S., Ye X., Wang H., Blaabjerg F., Lifetime prediction of aluminum electrolytic capacitors in LED drivers considering parameter shifts, *Microelectronics Reliability*, vol. 88–90 (September 2018), 453-457.
- [13] Guoguang Lu; Shaohua Yang; Yun Huang, Analysis on failure modes and mechanisms of LED., *2009 8th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety*, July 2009, Chengdu, China, 20-24.
- [14] Hongyu Tang, Yang D. G., Zhang G. Q., Fengze Hou, Miao Cai, Zaifu Cui, Multi-physics simulation and reliability analysis for LED luminaires under step stress accelerated degradation test, *2012 13th International Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems*, 2012, 1/5-5/5.
- [15] Villanueva Ignacio, Lázaro Isidro, Anzurez Juan, Reliability analysis of LED-based electronic devices, *International Meeting of Electrical Engineering Research ENIINVE-2012, Procedia Engineering* 35 (2012), 260 – 269.
- [16] W. Tian et al., Test procedure of indoor lighting LED luminaires based on step-stress accelerated degradation test, *2015 16th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*, 2015, 793-798.
- [17] J. Lynn Davis, Michael Lamvik, James Bittle, Sarah Shepherd, Robert Yaga, Nick Baldasaro, Eric Solano, Georgiy Bobashev, Insights into accelerated aging of SSL luminaires, *Proc. SPIE*

- 8835, *LED-based Illumination Systems*, 88350L (30 September 2013).
- [18] Shailesh K, Kurian C, Kini S. Understanding the reliability of LED luminaires. *Lighting Research & Technology*, 50(8) (2018), 1179-1197.
- [19] Report Hammer Testing Findings for Solid-State Lighting Luminaires. LED Systems Reliability Consortium and the U.S. Department of Energy, December 2013
- [20] Van Driel W.D., Evertz F.E., Zaal J.J.M., Nápoles O.M., Yuan C.A. An Introduction to System Reliability for Solid-State Lighting. In: van Driel W., Fan X. (eds) *Solid State Lighting Reliability. Solid State Lighting Technology and Application Series*, vol 1. Springer, New York, NY (2013).
- [21] Military Handbook Reliability Prediction of Electronic Equipment 217 F.
- [22] Solder-Point Temperature Measurement of XLamp® LEDs, [https://cree-led.com/media/documents/Solder\\_Point\\_Temp.pdf](https://cree-led.com/media/documents/Solder_Point_Temp.pdf), data dostępu: 30.01.2022.
- [23] Cree LED Components IES LM-80-2008 Testing Results Revision: 76 (January 17, 2022), [https://cree-led.com/media/documents/LM80\\_Results.pdf](https://cree-led.com/media/documents/LM80_Results.pdf), data dostępu: 30.01.2022.
- [24] Duris S8 White ( CCT 2200 K – 6500 K) ANSI/IES LM-80-15 Test report No. 200120W7
- [25] XLamp® LEDs Chemical Compatibility, [https://cree-led.com/media/documents/XLamp\\_Chemical\\_Comp.pdf](https://cree-led.com/media/documents/XLamp_Chemical_Comp.pdf), data dostępu: 30.01.2022.
- [26] Chemical compatibility of LEDs Application Note No. AN122 Osram.
- [27] LUXEON Rebel Platform Assembly and Handling Information, <https://lumileds.com/wp-content/uploads/files/AB32.pdf>, data dostępu: 30.01.2022.
- [28] Kloosterman J., Kregting R., Erinc M., van Driel W.D. (2013) Solder Joint Reliability in Solid-State Lighting Applications. In: van Driel W., Fan X. (eds) *Solid State Lighting Reliability. Solid State Lighting Technology and Application Series*, vol 1. Springer, New York, NY.
- [29] K. Bukat, H. Hackiewicz Lutowanie bezołowiowe, wydawnictwo BTC, Warszawa 2007.
- [30] A Guide to Lead-free Solders. Physical Metallurgy and Reliability, Werner Engelmaier, Springer – Verlag London Limited, 2007.
- [31] IPC-SM-785 Guidelines for Accelerated Reliability Testing of Surface mount Solder Attachments.
- [32] IPC-9701A Performance Test Methods and qualification Requirements for surface Mount solder Attachments.
- [33] Zhang J., Zhang G.Q. Advances in LED Solder Joint Reliability Testing and Prediction. In: van Driel W., Fan X., Zhang G. (eds) *Solid State Lighting Reliability Part 2. Solid State Lighting Technology and Application Series*, vol 3. (2018), Springer, Cham.
- [34] Pang H.M, Pong M. H. Bryan A life prediction scheme for electrolytic capacitors in power converters without current sensor, *The 25th Annual IEEE Applied Power Electronics conference and Exposition (APEC 2010)*, Palm Springs, CA., 21 – 25 February 2010. In *Proceedings of the 25th APEC*, 2010, 973 – 979.
- [35] Aluminium electrolytic capacitors cat. No. E1001V 2021 Nippon-Chemicon, <https://www.chemicon.co.jp/products/relatedfiles/capacitor/catalog/al-all-e.pdf>, data dostępu: 03.02.2022
- [36] Electrolytic Capacitor Lifetime Estimation , A. Albertsen, Jianghai Europe Electronic Components GmbH <https://jianghai-europe.com/wp-content/uploads/Jianghai-Europe-E-Cap-Lifetime-Estimation-long-AAL-2018-09-18.pdf> dostępu: 03.02.2022
- [37] Wang H., Blaabjerg F., Reliability of Capacitors for DC-Link Applications in Power Electronic Converters—An Overview, *in IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 5, 3569-3578, Sept.-Oct. 2014.
- [38] Dasgupta A., Sinha K., Herzberger J. Reliability Engineering for Driver Electronics in Solid-State Lighting Products. In: van Driel W., Fan X. (eds) *Solid State Lighting Reliability. Solid State Lighting Technology and Application Series*, vol 1. Springer, New York, NY(2013).
- [39] Górczewska M., Skrzypczak P., Czyżewski D. Współczynnik utrzymania oświetlenia dróg opawami led, *Poznan university of technology academic journals. Electrical Engineering* No 92, (2017), str. 251 -259.
- [40] Lewandowski W., Wilczyński A., Kramarski S., Szajdecki A., Awramik R., Zgłoszenie patentowe EPO nr. 18460077.3 Zasilacz impulsowy.
- [41] Sun B., Fan X., van Driel W.D., Zhang G.Q. Reliability Prediction of Integrated LED Lamps with Electrolytic Capacitor-Less LED Drivers. In: van Driel W., Fan X., Zhang G. (eds) *Solid State Lighting Reliability Part 2. Solid State Lighting Technology and Application Series*, vol 3. Springer (2018).
- [42] Fang P., Sheng B., Webb S., Zhang Y., Liu Y. -F., LED Driver Achieves Electrolytic Capacitor-Less and Flicker-Free Operation With an Energy Buffer Unit, *in IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 7, pp. 6777-6793, July 2019.
- [43] Wang, S; Ruan, XB; Yao, K; Tan, SC; Yang, Y; Ye, ZH A flicker-free electrolytic capacitor-less AC-DC LED drive, *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 27 n. 11, (2012), p.4540-4548.
- [44] MIL – Hdbk -217F Reliability prediction of electronic equipment, 1995.
- [45] Reliability Prediction Procedure electronic equipment Special Report SR -332, Issue 4, March 2016, Telcordia.
- [46] Agbemuko A., van Meurs J., van Driel W.D. Lightning Effects on LED-Based Luminaires. In: van Driel W., Fan X., Zhang G. (eds) *Solid State Lighting Reliability Part 2. Solid State Lighting Technology and Application Series*, vol 3. Springer (2018).
- [47] Sobczak M. Jakość oprogramowania. Podręcznik dla profesjonalistów. Helion, 2020
- [48] Schenkelaars D., van Driel W.D., Duijve R. The Next Frontier: Reliability of Complex Systems. In: van Driel W., Fan X., Zhang G. (eds) *Solid State Lighting Reliability Part 2. Solid State Lighting Technology and Application Series*, vol 3. Springer (2018)