

doi:10.15199/48.2017.06.28

## Analiza wpływu temperatury na pracę różnych rodzajów źródeł światła z zakresu profesjonalnej techniki świetlnej

**Streszczenie.** Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie wpływu zmian temperatury otoczenia na pracę różnych typów źródeł światła z zakresu profesjonalnej techniki świetlnej. W ramach przeprowadzonych badań dokonano analizy zmian całkowitego strumienia świetlnego, mocy czynnej oraz skuteczności świetlnej dla źródła żarowego, lamp LED, fluorescencyjnych, sodowych oraz lampy metalohalogenkowej. Zebrane wyniki pozwoliły na określenie jaki zakres temperatur jest optymalny dla maksymalnej wydajności oraz sprawności energetycznej rozważanych źródeł światła.

**Abstract.** The purpose of this article is to present the impact of changes in ambient temperature on the operation of different types of light sources in the field of professional lighting technology. In the framework of the study the following indicators were tested: the total lumen output, active power and the efficiency of incandescent lighting source, LED lamps, fluorescent, sodium and metal halide lamps. The collected results allowed to determine which temperature range is optimal for maximum productivity and energy efficiency of the considered light sources. **The impact of changes in ambient temperature on the operation of different types of light sources**

**Słowa kluczowe:** skuteczność świetlna, strumień świetlny, wpływ temperatury, źródła światła

**Keywords:** light sources, luminous flux, luminous efficacy, temperature dependence

### Wstęp

Technika świetlna jest interdyscyplinarną dziedziną wiedzy, obejmującą zagadnienia związane ze źródłami światła, oprawami oświetleniowymi, kolorymetrią, techniką oświetleniową i fotometrią. Dzięki tej dziedzinie nauki, z roku na rok, pojawiają się nowe rozwiązania źródeł światła o lepszych wskaźnikach niezawodności i energooszczędności [1]. Źródła te, z uwagi na różnice w sposobie wytwarzania światła, charakteryzują się odmiennymi własnościami strumienia świetlnego takimi jak: wypełnienie widma, odporność na wahania napięcia [2], a także podatność na zmiany temperatury otoczenia [3],[4],[5].

Niniejszy artykuł powstał w wyniku współpracy firmy ES-SYSTEM S.A. – producenta energooszczędnych opraw oraz systemów oświetleniowych – z Akademią Górniczo-Hutniczą w Krakowie. Składa się on z 5 rozdziałów. Przegląd badanych źródeł światła stanowi zawartość rozdziału drugiego. W rozdziale trzecim zawarto opis stanowiska pomiarowego oraz omówiono procedurę badań. W rozdziale czwartym zamieszczono wyniki badań w komorze klimatycznej. Opracowanie kończy rozdział 5 prezentujący podsumowanie i wnioski.

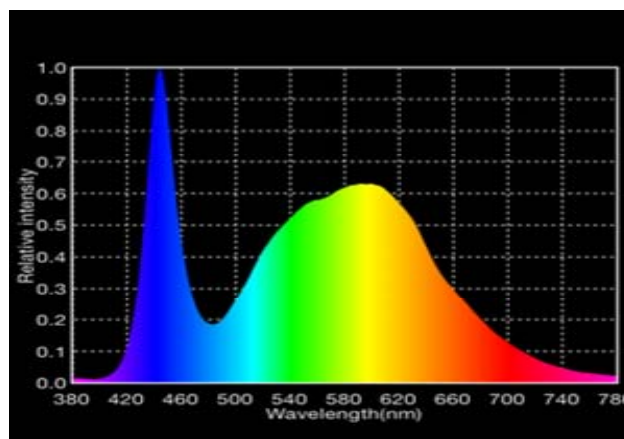
### Przegląd badanych źródeł światła

W źródle żarowym strumień świetlny powstaje w wyniku promieniowania cieplnego żarnika wykonanego ze skrętki wolframowej umieszczonej w szklanej bańce. Żarówki wykonywane są jako próżniowe (o mocy do 25 W) lub wypełnione azotem, argonem lub gazem obojętnym (o mocy powyżej 25 W) uzyskując dzięki temu wyższą temperaturę pracy żarnika [2]. W źródle żarowym znaczna część pobieranej mocy przekształcana jest na energię ciepłą.

Diody elektroluminescencyjne (ang. Light Emitting Diode – LED) są półprzewodnikowymi przyrządami optoelektronicznymi, które emitują promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie zarówno widzialnym, podczerwieni, jak i nadfioletu. Diody wytwarzają światło na zasadzie elektroluminescencji (wzbudzenie atomów lub cząstek odbywa się kosztem energii pola elektrycznego). Powstała w ten sposób energia jest wyzwalana zarówno w postaci ciepła nagrzewającego złącze półprzewodnikowe, jak i w postaci promieniowania.

Początkowo diody elektroluminescencyjne wytwarzały monochromatyczne promieniowanie i miały skuteczność świetlną rzędu 1 lm/W. Prace nad nowymi kompozycjami

materialów i procedurami ich domieszkowania doprowadziły do powstania diod świecących różnymi barwami. Wraz z poprawą skuteczności świetlnej LED rozpoczęła się ich ekspansja w kierunku techniki oświetleniowej. Najtrudniejszym okazała się produkcja diod emitujących białe światło o powtarzalnych parametrach. Początkowe wyniki uzyskania światła białego z połączenia trzech diod R, G, B w jednej obudowie okazały się nieskuteczne. Innym rozwiązaniem, które znalazło szerokie zastosowanie w produktach komercyjnych, jest domieszkowanie fosforem diody niebieskiej lub diod wytwarzających promieniowanie nadfioletowe. Przykładowe widmo strumienia świetlnego diody niebieskiej domieszkowanej fosforem przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Widmo strumienia świetlnego diody niebieskiej domieszkowanej fosforem

Lampy fluorescencyjne (ang. Fluorescent Lamp – FL) są niskoprężnymi lampami rtęciowymi, w których wykorzystywane jest promieniowanie rezonansowe atomów rtęci emitowane przy przejściu atomu ze stanu wzbudzenia bezpośrednio do stanu podstawowego. W wyniku zmiany poziomu energetycznego z wyższego na niższy powstaje promieniowanie elektromagnetyczne o długości fal klasyfikujących je w przedziale promieniowania UV. Promieniowanie nadfioletowe jest niewidzialne dla człowieka, dlatego konieczne jest zastosowanie luminoforu, który zmienia długość fali, tak aby znajdowała się w przedziale światła widzialnego.

Lampy sodowe wysokoprężne (ang. High Pressure Sodium-Tubular – HST) są wyładowczymi źródłami światła, w których promieniowanie emitowane jest z zachodzącego w jarzniku wyładowania w parach sodu pod wysokim ciśnieniem – rzędu 104 Pa. Jarznik jest centralnym elementem umieszczonym w szklanej, zamkniętej bańce o kształcie elipsowatym lub rurowym, w której panuje próżnia. Rozpoczęcie wyładowania następuje po podaniu impulsu napięciowego (jednego lub kilku) o wartości od 1 do 5 kV – w zależności od typu i mocy lampy. W pierwszej kolejności następuje wyładowanie w gazie zapłonowym (ksenonie), który stanowi główne medium gazowe wypełniające jarznik w zimnej lampie. Przed zapłonem sód i rtęć mają postać prawie całkowicie stałą. Wstępne wyładowanie w gazie zapłonowym powoduje nagrzanie jarznika oraz parowanie rtęci i sodu. W chwili po zapłonie lampa stanowi dla obwodu zwarcie, a prąd płynący przez nią jest ograniczony przez statecznik. W miarę upływu czasu jarznik nagrzewa się i rola czynnika wyładowczego przejmowana jest przez pary sodu i rtęci, co skutkuje zmniejszeniem wartości prądu, zwiększeniem napięcia i strumienia świetlnego.

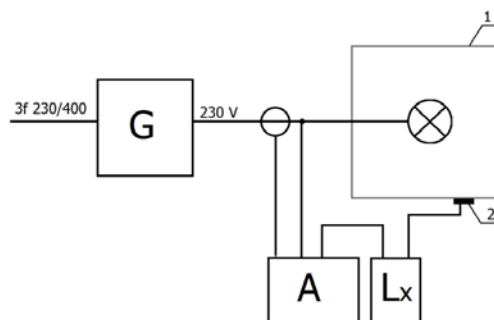
Lampy metalohalogenkowe (ang. Hydrargyrum Quartz Iodide – HQI) są źródłami światła o szczególnie dobrych właściwościach barwowych oraz dużej niezawodności. Budowa i zasada działania lamp metalohalogenkowych jest bardzo podobna do lamp sodowych. Źródłem promieniowania jest wyładowanie w gazach (rtęci i halogenków metali) umieszczonych w jarzniku. W początkowej fazie zapłonu wyładowanie zachodzi w gazie zapłonowym pomiędzy elektrodą główną i zapłonową. Wyładowanie to powoduje wzrost temperatury i odparowanie czynników wyładowczych. Gdy wewnątrz żarnika odpowiednio nagrzej się oraz odparuje wystarczająca ilość rtęci i halogenków metali, zainicjowane zostaje wyładowanie pomiędzy elektrodami głównymi. Rosnąca temperatura powoduje nagrzanie wyłącznika bimetalowego i odłączenie elektrody zapłonowej od obwodu.

### Opis stanowiska pomiarowego oraz procedury badań

Badane źródła światła umieszczano w komorze klimatycznej, a następnie poddawano wpływow zmian temperatury z przedziału  $-20^{\circ}\text{C}$  –  $60^{\circ}\text{C}$ . Do pomiaru temperatury badanej lampy wykorzystywano czujnik Pt100. Schemat ideowy stanowiska badawczego został przedstawiony na rysunku 2. Lampy zasilano z generatora programowalnego NSG1007, który wytwarzał napięcie sinusoidalne o wartości skutecznej  $U_N = 230\text{ V}$  i częstotliwości  $f = 50\text{ Hz}$ . Pomiar parametrów elektrycznych, w tym napięcia na wyjściu analogowym luksomierza, realizowany był analizatorem jakości energii PQ-Box 200. Wyniki pomiaru były uśredniane z okresem 1 s. Widok stanowiska badawczego przedstawiony został na rysunku 3.

Lista mierzonych obiektów obejmowała tradycyjne źródło żarowe, a także lampy przeznaczone głównie do zastosowań przemysłowych: LED średniej mocy, świetlówki liniowe, wysokoprężne lampy sodowe oraz lampę metalohalogenkową. Do badań wytypowano źródła o dwóch typach stateczników: indukcyjnym – KVG oraz elektronicznym – EVG oraz zasilaczach: prądowym i sekwencyjnym. Wykaz badanych źródeł zestawiono w tabeli 1.

Aby wykluczyć potencjalny wpływ zmian temperatury na pracę sondy luksomierza została ona umieszczona po zewnętrznej stronie drzwi komory klimatycznej.



Rys. 2. Schemat ideowy stanowiska badawczego: G – generator programowalny, A – analizator jakości energii elektrycznej, Lx – luksomierz, 1 – komora klimatyczna, 2 – sonda luksomierza



Rys. 3. Widok stanowiska badawczego

W pierwszym etapie dokonano oceny poziomu bezwładności zmian temperatury wewnątrz komory klimatycznej. Stwierdzono, że stabilizacja temperatury wewnątrz komory następuje w czasie około 4 minut (Rys. 4), wobec czego założono, że wystarczającym czasem pomiaru dla jednego stopnia temperatury powinno być 15 minut.

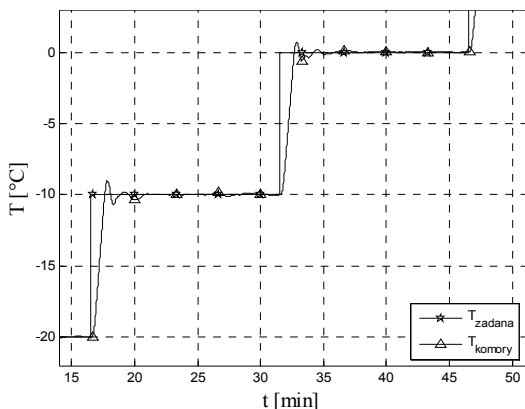
Tabela 1. Zestawienie badanych źródeł światła

Oznaczenie źródła	$P_N$ [W]	$\Phi_N$ [lm]	Zasilacz / Statecznik
Żarowe	100	1250	-
LED1	35	3400	prądowy
LED2	16	1600	sekwencyjny
FL1	36	2700	KVG
FL2	36	2700	EVG
FL3	62	5300	EVG
HST1	70	6000	KVG (kompensacja)
HST2	70	6000	EVG
HQI	400	42000	KVG (kompensacja)

Na etapie procedury przygotowawczej wykonano kalibrację układu luksomierz – kula fotometryczna, czyli wyznaczono zależność pomiędzy natężeniem oświetlenia mierzonego luksomierzem, a całkowitym strumieniem świetlnym źródła umieszczonego w komorze klimatycznej. Do tego celu wykorzystano referencyjne źródło żarowe o mocy 100 W, które najpierw umieszczono wewnątrz kuli Ulbrichta (rys. 5) w celu wyznaczenia wartości całkowitego strumienia świetlnego. Strumień świetlny zmierzonego w warunkach referencyjnych wzorca żarówki wyniósł  $\Phi_{ref} = 1250\text{ lm}$ . Znając tę wartość możliwe było wyznaczenie współczynnika komory klimatycznej  $w_k$  zgodnie z wzorem:

$$(1) \quad w_k = \frac{U}{\Phi_{ref}}$$

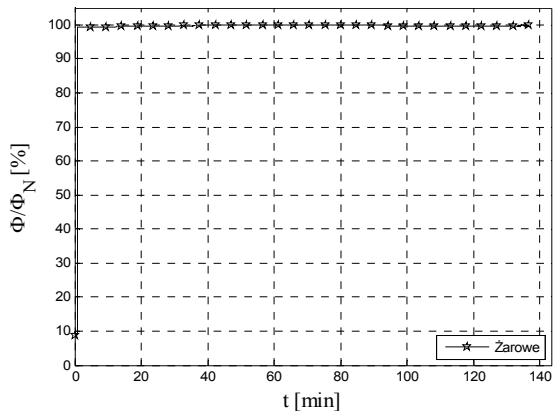
gdzie:  $U$  – napięcie na wyjściu luksomierza podczas pomiaru źródła referencyjnego umieszczonego w komorze klimatycznej w temp. 20 °C.



Rys. 4. Stabilizacja zmian temperatury w komorze



Rys. 5. Kula fotometryczna



Rys. 6. Względny strumień świetlny lampy żarowej

### Wyniki badań

Zamieszczone w niniejszym rozdziale przebiegi całkowitego strumienia świetlnego  $\Phi$  badanych źródeł, pracujących w różnych temperaturach otoczenia, zostały odniesione do jego wartości znamionowej ( $\Phi_N$ ) uzyskanej przez te źródła w temperaturze 20 °C. Wszystkie wykresy prezentowane są w skali czasu, która odpowiada rzeczywistej zmienności temperatury wewnątrz komory klimatycznej podczas badań. Ponadto na wykresach całkowitego strumienia świetlnego dodano przebieg temperatury komory klimatycznej  $T_{kom}$ .

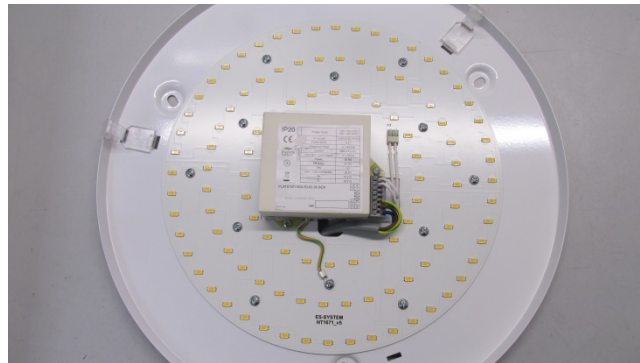
### Źródło żarowe

Analiza zarejestrowanych przebiegów (rys. 6) pozwala stwierdzić, że wpływ zmian temperatury na pracę żarowego źródła światła jest praktycznie niezauważalny. W zadanym

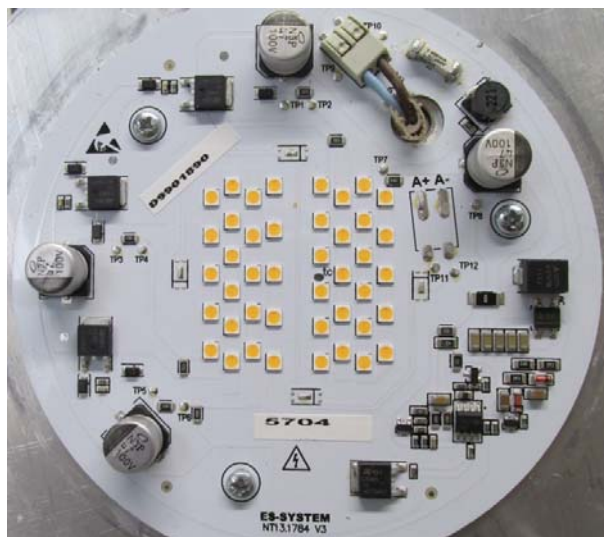
zakresie temperatur strumień świetlny utrzymuje się na stałym poziomie.

### Lampy LED

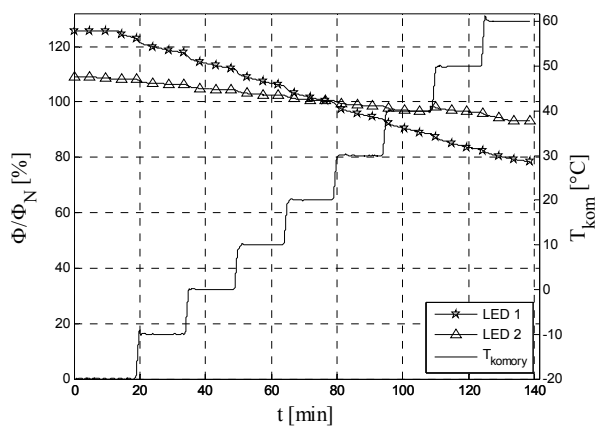
Zdjęcia badanych lamp LED zostały zaprezentowane na rysunkach 7 i 8. Na podstawie analizy przebiegów strumienia świetlnego (rys. 9) można stwierdzić, że elementy półprzewodnikowe, jakimi są diody LED, pracują najefektywniej w niskich temperaturach. Dla  $T_{kom} = -20$  °C strumień świetlny osiągał wartość 125%  $\Phi_N$  dla modułu LED1 oraz 110%  $\Phi_N$  dla modułu LED2. Z kolei w temperaturze  $T_{kom} = 60$  °C zmniejszył się on odpowiednio do wartości: 78%  $\Phi_N$  oraz 93%  $\Phi_N$ .



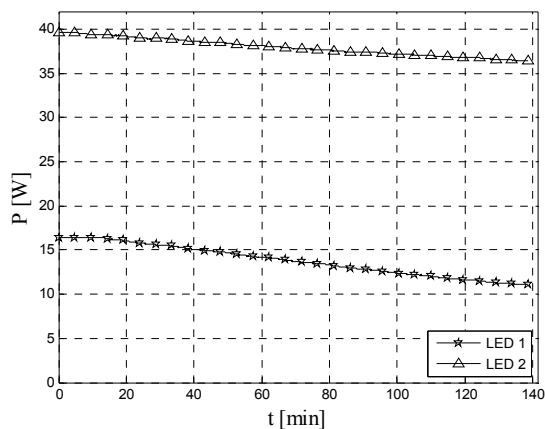
Rys. 7. Moduł LED1 średniej mocy wyposażony w zasilacz prądowy



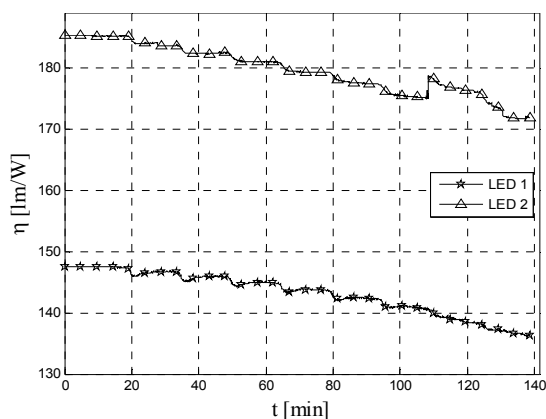
Rys. 8. Moduł LED2 średniej mocy wyposażony w zasilacz sekwencyjny



Rys. 9. Względny strumień świetlny lamp LED



Rys. 10. Moc czynna lamp LED



Rys. 11. Skuteczność świetlna lamp LED

Porównując zmiany mocy czynnej w całym zakresie pomiarowym można zauważyć, że jej pobór w przypadku obu lamp LED ulega zmniejszeniu wraz ze wzrostem temperatury. Różnica mocy czynnej  $\Delta P$  dla LED 1 wynosi 5,4 W natomiast dla LED 2  $\Delta P = 3$  W. Badane lampy LED osiągnęły najwyższą skuteczność świetlną rzędu  $\eta = 147$  lm/W (LED1) oraz  $\eta = 186$  lm/W (LED2) dla temperatury  $-20$  °C. Wraz ze wzrostem temperatury do  $60$  °C skuteczność świetlna obu lamp zmniejszyła się o odpowiednio do 7 oraz 7,5%  $\Phi_N$  (rys. 11).



Rys. 12. Oprawa oświetleniowa z zamontowanymi lampami FL1 i FL2 oraz statecznikami KVG i EVG

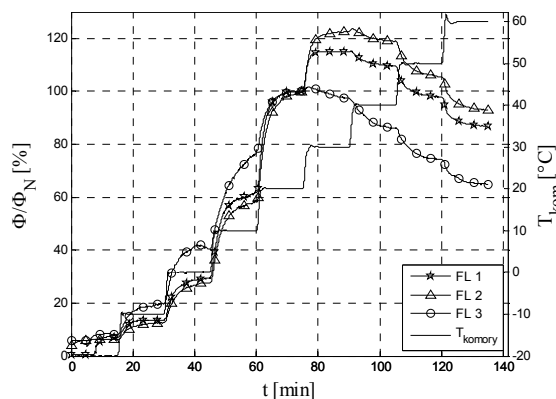
### Lampy fluorescencyjne

Badaniom w komorze klimatycznej zostały poddane następujące źródła fluoroscencyjne:

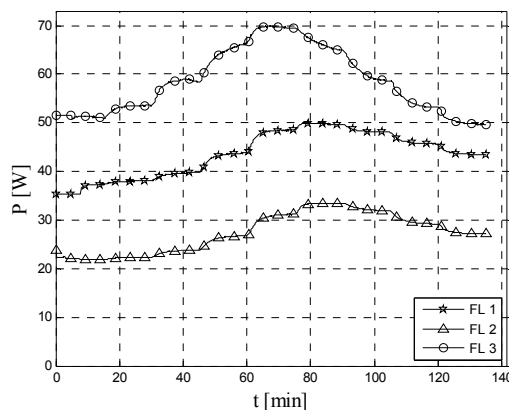
- Lampa FL1 (2x18 W) zasilona przez statecznik KVG,
- Lampa FL2 (2x18 W) zasilone przez statecznik EVG,
- Lampa FL3 (40+22 W) zasilona przez statecznik EVG.

Lampy FL1 i FL2 zawierały po dwie takie same świetłówki, lecz różniły się rodzajem zastosowanego statecznika (Rys. 12).

Analizując otrzymane wyniki można stwierdzić, że maksimum całkowitego strumienia świetlnego wynoszące – w zależności od modelu lampy – do 101 do 122%  $\Phi_N$  osiągnięte zostało dla temperatur z zakresu  $20 - 30$  °C (Rys. 13). W najniższej rozpatrywanej temperaturze  $-20$  °C strumień świetlny ustabilizował się na poziomie mniejszym niż 10%  $\Phi_N$ .



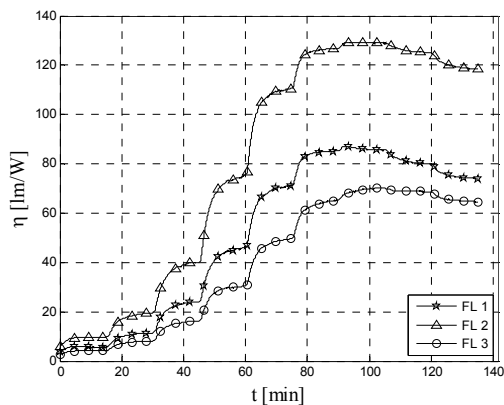
Rys. 13. Względny strumień świetlny lamp fluorescencyjnych



Rys. 14. Moc czynna lamp fluorescencyjnych

Najbardziej podatnym źródłem (pod względem zmiany mocy czynnej) na wpływ temperatury była lampa wyposażona w statecznik KV (FL1), dla którego  $\Delta P/P_N=0,403$  ( $\Delta P$  – różnica pomiędzy maksymalną a minimalną zarejestrowaną wartością mocy czynnej,  $P_N$  - znamionowa moc czynna). Dla lampy FL2 wskaźnik ten wyniósł  $\Delta P/P_N=0,323$ . Najbardziej odpornym układem na wpływ zmian temperatury okazała się lampa FL3  $\Delta P/P_N=0,306$ . Układ FL3 pobierał największą moc czynną w temperaturze  $20$  °C ( $P = 69,85$  W) natomiast układy FL1 i FL2 pobierały największą moc w temperaturze  $30$  °C (odpowiednio  $P = 49,83$  W oraz  $P = 33,45$  W).

Największa skuteczność świetlna lamp fluorescencyjnych (Rys. 15) została osiągnięta dla temperatur wnętrza komory z przedziału  $40-50$  °C. Najbardziej efektywnym w całym zakresie temperatur był układ FL2 natomiast najmniej efektywnym okazał się FL3. Należy zwrócić uwagę, iż te same świetłówki (FL1, FL2) w zależności od zastosowanego statecznika charakteryzowały się różnicami w poziomie pobieranej mocy czynnej, co przełożyło się bezpośrednio na skuteczność świetlną. W temperaturze  $30$  °C skuteczność świetlna lampy ze statecznikiem EVG była o 50% większa niż lampy ze statecznikiem KVG.



Rys. 15 Skuteczność świetlna lamp fluorescencyjnych

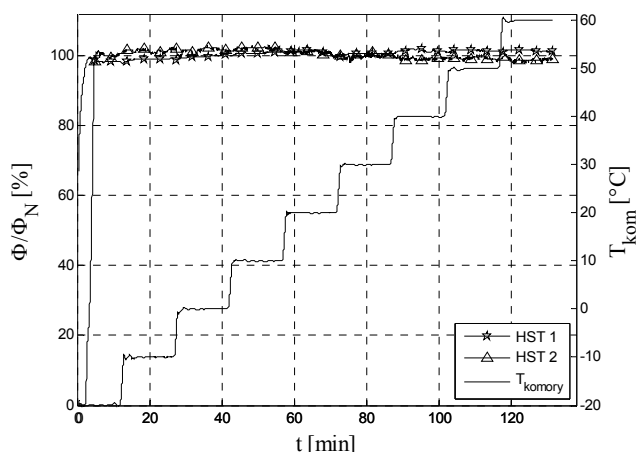
### Lampy sodowe

Badaniu zostały poddane dwie identyczne lampy sodowe wysokoprężne o mocy 70 W jednakże zasilane z dwóch różnych układów zapłonowych:

- HST1 zasilona przez statecznik KVG (Rys. 16),
- HST2 zasilona przez statecznik EVG.



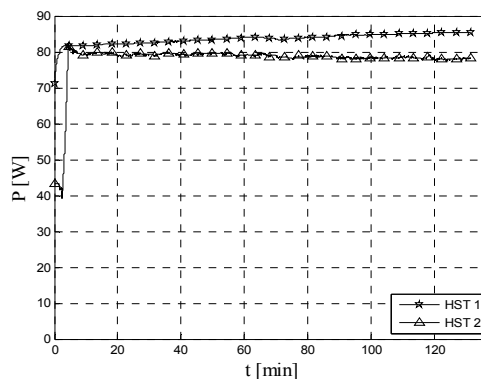
Rys. 16. Lampa sodowa wysokoprężna wraz z układem zapłonowym KVG



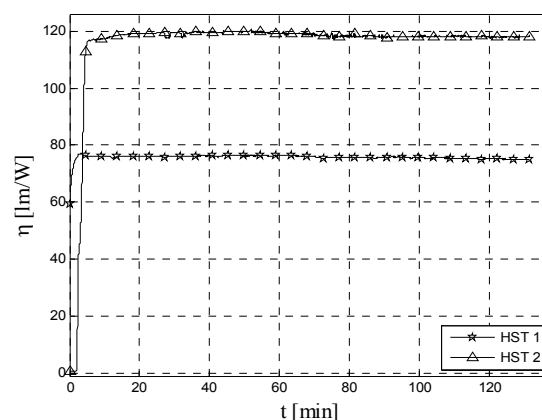
Rys. 17. Względny strumień świetlny lamp sodowych

Analizując wyniki pomiarów (Rys. 17) można stwierdzić, że zmiany temperatury otoczenia praktycznie nie wpływały na strumień świetlny. Dla lampy HST2 moc czynna zmniejszyła się o 2 W w całym zakresie temperatur, natomiast dla HST1 wzrosła o blisko 5 W (rys. 19). Podobnie jak w przypadku lamp fluorescencyjnych lepszą skuteczność świetlną osiągnął statecznik EVG (HST2) –

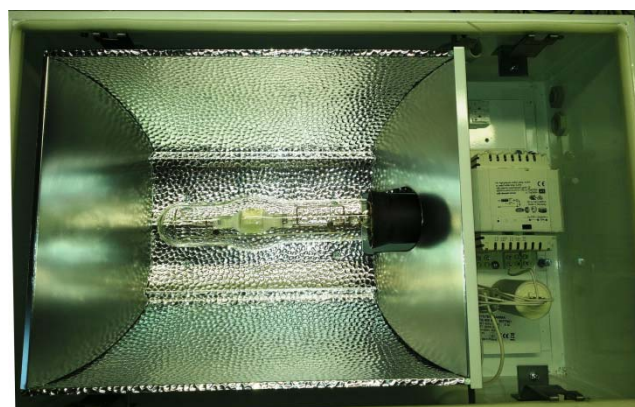
rys. 21. Skuteczność świetlna badanych lamp praktycznie nie zależała od temperatury otoczenia. Różnica pomiędzy skutecznością świetlną układów ze statecznikami EVG a KVG wynosiła blisko  $\Delta\eta = 42,5$  lm/W w całym zakresie temperatur.



Rys. 18. Moc czynna lamp sodowych



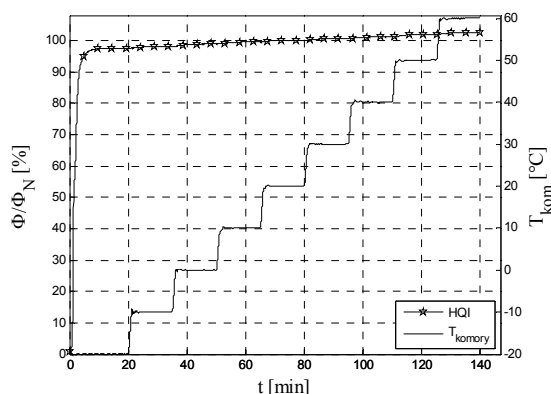
Rys. 19. Skuteczność świetlna lamp sodowych



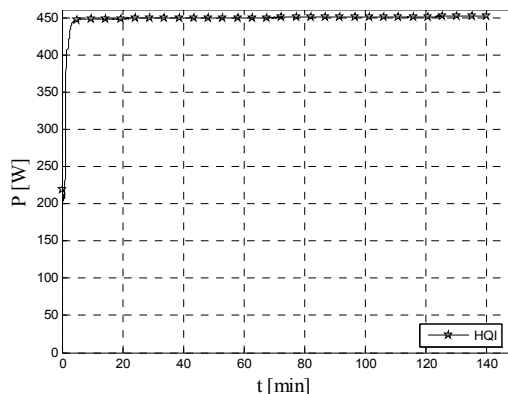
Rys. 20. Lampa metalohalogenkowa wraz ze statecznikiem KVG

### Lampa metalohalogenkowa

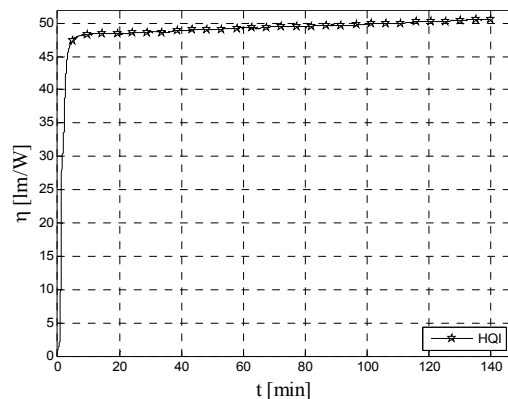
Ostatnim badanym źródłem światła była lampa metalohalogenkowa HQI o mocy 400 W (rys. 22). Otrzymane wyniki pomiarów przedstawiono na rysunkach 21 – 23. Stwierdzono, że wraz ze wzrostem temperatury względny strumień świetlny lampy HQI zwiększał się praktycznie liniowo od 97,5%  $\Phi_N$  do 102,5%  $\Phi_N$ . Temperatura otoczenia miała nieznaczny wpływ na wartości pobieranej mocy czynnej, której zmiana w rozważanym zakresie temperatur wyniosła 3,5 W co stanowi mniej niż 1% mocy znamionowej. Skuteczność świetlna badanej lampy metalohalogenkowej wraz ze wzrostem temperatury rosła liniowo od wartości  $\eta=48,4$  lm/W do  $\eta=50,5$  lm/W.



Rys. 21. Względny strumień świetlny lampy metalohalogenkowej



Rys. 22. Moc czynna lampy metalohalogenkowej



Rys. 23. Skuteczność świetlna lampy metalohalogenkowej

### Wnioski

W ramach przeprowadzonych badań dokonano analizy wpływu warunków klimatycznych na pracę wybranych źródeł światła z zakresu profesjonalnej techniki świetlnej. Porównując otrzymane przebiegi można zauważyć, że w zależności od rodzaju źródła światła, punkt szczytowej wartości strumienia świetlnego lub skuteczności świetlnej przypadać może dla innej temperatury, co przedstawiono w tabeli 2. Różny jest także poziom podatności tych źródeł na zmiany temperatury otoczenia.

Tabela 2. Podsumowanie wyników badań

Oznaczenie źródła	$T_{kom}$ dla której stwierdzono największe wartości:	
	$\Phi/\Phi_N$	$\eta$
Żarowe	cały zakres	cały zakres
LED	-20 °C	-20 °C
FL	35 °C	40 °C
HST	cały zakres	cały zakres
HQI	60 °C	60 °C

Źródła półprzewodnikowe największą wydajność osiągają w niskich temperaturach. Zwiększająca się temperatura powoduje zmniejszenie strumienia świetlnego oraz skuteczności świetlnej, gdyż spada skuteczność chłodzenia złącza półprzewodnikowego. Z tego powodu ciągle prowadzone są prace nad nowymi rozwiązaniami w zakresie kompensacji zmian temperatury [6],[7], a także chłodzenia tych obiektów [8],[9],[10]. Źródła świetlówkowe największy strumień oraz skuteczność świetlną osiągają w temperaturze 30 – 40 °C. Wpływ temperatury otoczenia (z zakresu -10 °C – 60 °C) na pracę źródeł wyładowczych (sodowych, metalohalogenkowych) jest znikomy – źródła pracują stabilnie w podanym zakresie temperatur.

Można wywnioskować, że każda grupa źródeł światła będzie najbardziej efektywnie pracowała w ściśle określonych warunkach pracy. Lampy LED – w warunkach niskiej temperatury (chłodnie, magazyny z żywnością), źródła fluorescencyjne – warunkach biurowych (pomieszczenia codziennego użytku), a źródła wyładowcze – pod zadaszeniami, w halach produkcyjnych, na drogach gdzie temperatury mogą zmieniać się w szerokim zakresie i osiągać wartości zarówno -20 °C, jak i 60 °C. Od poprawnego doboru rodzaju źródła światła do konkretnej aplikacji zależy zarówno poziom wydajności tego źródła jak i jego energooszczędności.

### Autorzy:

mgr inż. Piotr Łączny, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: piotrłaczny@gmail.com;

mgr inż. Piotr Sereżyński ES-SYSTEM S.A., ul. Przemysłowa 2, 30-701 Kraków, E-mail: piotr.serezynski@essystem.pl;

dr inż. Krzysztof Chmielowiec, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: kchmielo@agh.edu.pl;

mgr inż. Wojciech Butryn, ES-SYSTEM S.A., ul. Przemysłowa 2, 30-701 Kraków, E-mail: wojciech.butryn@essystem.pl.

### LITERATURA

- [1] Dupuis R., Krames M., History, Development, and Applications of High-Brightness Visible, Light-Emitting Diodes, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 26, NO. 9, MAY 1, 2008.
- [2] Kraśniewski J., Oleksy M., Badanie wpływu temperatury na parametry termiczne i elektryczne diod LED mocy, Przegląd Elektrotechniczny, 10/2011.
- [3] Swietoniowski P., Binkowski T., The influence of temperature on optical and electrical parameters of medium and high power LEDs, Przegląd Elektrotechniczny, 11/2014.
- [4] Gabryjelski Z., Pabjańczyk W., Sikora R., Markiewicz P., Wpływ warunków środowiskowych na pracę opraw z modułami LED, Przegląd Elektrotechniczny, 10/2010.
- [5] Mróz M., Hanzelka Z., Chmielowiec K., Voltage fluctuations in networks with distributed power sources, Przegląd Elektrotechniczny, 5/2014.
- [6] Qiu Jianping, He Lenian, A LED driver IC with Constant Current and Temperature Compensation, Computer Science and Information Technology (ICCSIT), 2010 3rd IEEE International Conference on (Volume: 5), 9-11 July 2010, 162 - 164
- [7] Zhenxu Zha, Hei Wong, Yan Han, An LED Driver with Thermal Control Function, Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSIT), 2014 12th IEEE International Conference on, 28-31 Oct. 2014, 1-3.
- [8] Sunho Jang, Moo Whan Shin, Thermal Analysis of LED Arrays for Automotive Headlamp With a Novel Cooling System, Device and Materials Reliability, IEEE Transactions on, 2008, Volume: 8, Issue:3, pages: 561 - 564.
- [9] Xiaobing Luo, Sheng Liu, A Microjet Array Cooling System for Thermal Management of High-Brightness LEDs.
- [10] Jing Wang, Xin-Jie Zhao, Yi-Xi Cai, Chung Zhang, Wei-Wei Bao, Thermal Model Design and Analysis of High-Power LED Headlamp Cooling Device Based on the Thermoelectric Effect, Components, Packaging and Manufacturing Technology, IEEE Transactions on, 2015, Volume: 5, Issue: 5, Pages: 641 - 649.