

Antoni RÓŻOWICZ  
Krzysztof BARAN

## ODDZIAŁYWANIE TERMICZNE POMIĘDZY ŹRÓDŁAMI HP LED ZAINSTALOWANYMI NA WSPÓLNYM RADIATORZE

**STRESZCZENIE** *W artykule zaprezentowano model matematyczny pozwalający wyznaczyć temperaturę radiatora, na którym może być zainstalowana dowolna ilość sprzężonych ze sobą termicznie źródeł ciepła. Na podstawie modelu symulacyjnie wyznaczono temperaturę płyty aluminiowej, na której zainstalowano źródła światła LED, będące źródłami ciepła. Symulację przeprowadzono dla kilku przypadków, w których zmieniana była ilość, moc oraz odległość pomiędzy źródłami LED. Oszacowany w ten sposób rozkład temperatury radiatora może być wykorzystany do obliczenia temperatury złącza, która wpływa na podstawowe parametry źródeł LED.*

**Słowa kluczowe:** *LED, źródło ciepła, sprzężenia termiczne, temperatura złącza, model matematyczny*

### 1. WSTĘP

---

Półprzewodnikowe źródła światła LED dzięki swoim licznym zaletom zyskują coraz większe grono zwolenników. Wysoka skuteczność świetlna, długa żywotność, łatwość sterowania kolorem, a także duża odporność mechaniczna sprawiają, że w coraz większym stopniu źródła te stają się zamiennikami klasycznych źródeł światła. Wysoka skuteczność świetlna powoduje, że LEDy stają się najbardziej energooszczędnymi źródłami światła dostępnymi na rynku, pozwalającymi uzyskać do 80% oszczędności

---

**dr hab. inż. Antoni RÓŻOWICZ, prof. PŚk**  
e-mail: rozowicz@tu.kielce.pl

Politechnika Świętokrzyska, Katedra Urządzeń Elektrycznych i Techniki Świetlnej  
al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce

**mgr inż. Krzysztof BARAN**  
e-mail: kbaran@prz.edu.pl

Politechnika Rzeszowska, Katedra Energoelektroniki i Elektroenergetyki  
ul. Wincentego Pola 2, 35-959 Rzeszów

w zużyciu energii elektrycznej, w porównaniu do źródeł temperaturowych, wytwarzających przybliżoną wartość strumienia świetlnego [1]. Szacuje się, że do 2025 r. źródła światła LED staną się dominującą technologią w technice oświetleniowej [2]. Niestety, oprócz wymienionych zalet, źródła LED posiadają również wady, które w znacznym stopniu ograniczają szersze zastosowanie w technice oświetleniowej. Jedną z głównych wad źródeł LED, a w szczególności źródeł LED wysokiej mocy, są problemy termiczne związane z wysoką temperaturą złącza, która wpływa na podstawowe parametry świetlne, jak również na żywotność diody [3].

Ważnym zagadnieniem przy projektowaniu źródeł LED, pozwalającym na zachowanie zadowalających parametrów oraz długiej żywotności, jest optymalne zarządzanie ciepłem, poprzez uwzględnienie oporów termicznych poszczególnych elementów i dobór odpowiedniego radiatora, który zapewnił będzie skuteczny przepływ ciepła. W przypadku systemów oświetleniowych zawierających wiele źródeł LED zainstalowanych na wspólnym radiatorze, uwzględnić należy również wzajemne sprzężenia termiczne, występujące pomiędzy diodami.

W artykule przedstawiono model matematyczny, pozwalający wyznaczyć rozkład temperatury na powierzchni radiatora, na którym zainstalowanych i sprzężonych termicznie jest ze sobą dowolna ilość źródeł ciepła. Następnie na podstawie modelu wyznaczono symulacyjnie temperaturę na powierzchni radiatora, w miejscu zainstalowania źródeł ciepła. Przedstawiono kilka przykładów, w których zmieniana była ilość, odległość oraz moc diod, zainstalowanych na płycie aluminiowej, która pełniła funkcję radiatora.

## 2. LED – ŹRÓDŁO CIEPŁA

Dioda LED należy do elementów półprzewodnikowych, wykorzystujących zjawisko elektroluminescencji, podczas którego emitowany jest strumień świetlny. Niestety, tylko część mocy zamieniana jest na strumień świetlny, natomiast pozostała część tracona jest w postaci ciepła, co przedstawia poniższy wzór:

$$P_{th,LED} = (1 - \eta)U_F \cdot I_F \quad (1)$$

gdzie:

$P_{th,LED}$  – moc wydzielona w postaci ciepła,

$\eta$  – sprawność diody,

$U_F, I_F$  – znamionowa wartość napięcia oraz prądu zasilania diody.

Obecnie sprawność źródeł LED szacuje się na poziomie  $0,15 \div 0,3$ ; z czego wynika, że około  $70 \div 80\%$  mocy pobranej ze źródła zamieniane jest na ciepło, które następnie odprowadzone jest do otoczenia [3, 4, 5]. Zdecydowana większość ciepła wydzielana jest w złączu p-n, w trakcie przepływu przez nie prądu przewodzenia  $I_F$ . Charakterystyczna jest stosunkowo mała powierzchnia chipu, na której ciepło to jest wydzielane. Konsekwencją tego są bardzo duże gęstości cieplne i związane z tym problemy odprowadzenia takiej ilości ciepła do otoczenia.

Sprawność odprowadzania ciepła z diody LED wysokiej mocy zależy od wypadkowej rezystancji termicznej całego modułu. Na sumaryczną rezystancję termiczną

składa się rezystancja, jaka występuje pomiędzy chipem diody i jej obudową, pomiędzy obudową a radiatorzem oraz między powietrzem a radiatorzem. Każda z tych rezystancji powinna być możliwie jak najmniejsza, co zapewni zminimalizowanie temperatury złącza.

W przypadku zainstalowania wielu źródeł LED na wspólnym radiatorze, ważnym zagadnieniem termicznym jest uwzględnienie wzajemnych sprzężeń cieplnych pomiędzy diodami. Zainstalowane w tak bliskiej odległości od siebie źródła LED wzajemnie oddziałują na siebie, podnosząc temperaturę złącza poszczególnych źródeł. Przykładem, gdzie mogą występować wzajemne sprzężenia termiczne, jest np. oprawa drogowa, w której na wspólnym radiatorze w bliskiej odległości zainstalowanych może być nawet kilkaset źródeł HP LED. Na rysunku 1 została pokazana przykładowa lampa uliczna o mocy 252 W, na której w bliskim sąsiedztwie zainstalowano 126 diod o mocy 2 W każda [6].

**Rys. 1. Lampa uliczna z zainstalowanymi diodami LED w bliskim sąsiedztwie**

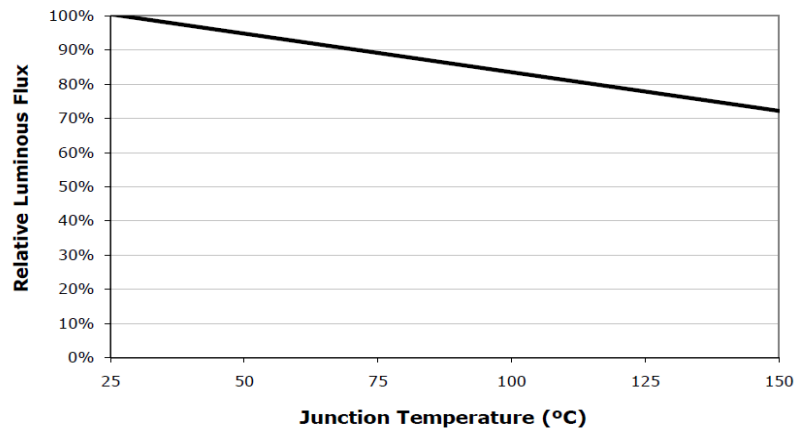


### 3. WPLYW TEMPERATURY NA WYBRANE PARAMETRY PÓLPRZEWODNIKOWYCH ŹRÓDEŁ ŚWIATŁA

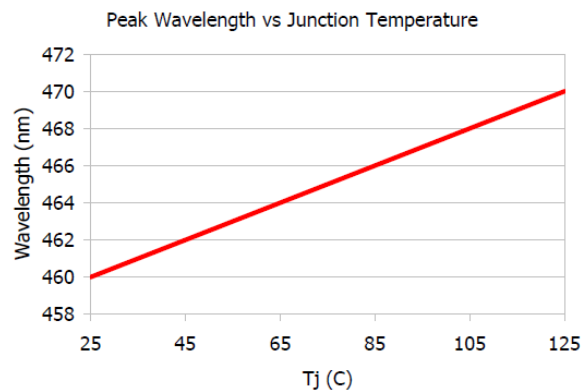
---

W wybranych pozycjach literatury [7, 8, 9, 10] dostępne są częściowo informacje na temat wpływu temperatury na podstawowe parametry źródeł LED. Większość parametrów źródeł LED, takich jak strumień świetlny, luminancja, widmo optyczne czy długość życia, jak wykazuje dotychczasowa praktyka, uzależniona jest zarówno od temperatury otoczenia  $T_a$ , jak również od temperatury wnętrza  $T_j$ , będącej sumą temperatury otoczenia oraz temperatury związanej z samonagrzewaniem elementu półprzewodnikowego [7].

Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono wpływ temperatury złącza na wartość strumienia świetlnego i widmo dla przykładowego źródła LED [11, 12]. Z danych tych wynika, że wartość strumienia świetlnego maleje liniowo wraz ze wzrostem temperatury złącza. Dla temperatury złącza  $T_j = 150^\circ\text{C}$  wartość strumienia świetlnego zmniejszyła się do ok. 70% wartości strumienia przy temperaturze złącza  $25^\circ\text{C}$ . Natomiast z danych (rys. 3), wynika że wraz ze wzrostem temperatury złącza zmienia się długość fali dominującej, konsekwencją czego jest zmiana barwy źródła LED.



Rys. 2. Wpływ temperatury złącza  $T_j$  na wartość strumienia świetlnego



Rys. 3. Wpływ temperatury złącza  $T_j$  na długość fali dominującej

## 4. WIELOPUNKTOWE ŹRÓDŁA CIEPŁA ZAINSTALOWANE NA WSPÓLNYM RADIATORZE – MODEL MATEMATYCZNY

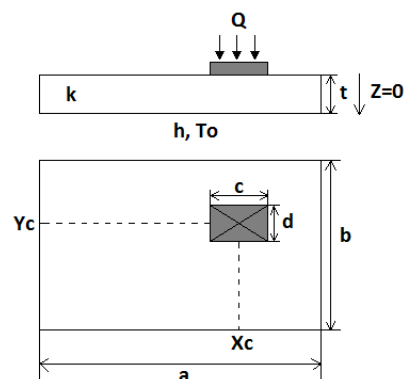
W publikacji [13] przedstawiony został model matematyczny pozwalający wyznaczyć temperaturę radiatora, na którym zainstalowanych może być dowolna ilość źródeł ciepła. Model ten uwzględnia wzajemne sprzężenia termiczne pomiędzy źródłami. Jeśli do modelu temperaturowego wprowadzi się rezystancję termiczną analizowanej struktury, to możliwe jest wyznaczenie temperatury rzeczywistej złącza zainstalowanych źródeł ciepła.

### 4.1. Pojedyncze źródło ciepła – model matematyczny

Opis matematyczny rozkładu temperatury na radiatorze (płyce montażowej) o wymiarach i parametrach jak na rysunku 4, wykonano przy założeniu, że zainstalowane jest pojedyncze źródło ciepła.

Poszczególne parametry rysunku zostały oznaczone następująco:

- $a$  – długość radiatora [m];
- $b$  – szerokość radiatora [m];
- $c$  – długość źródła ciepła [m];
- $d$  – szerokość źródła ciepła [m];
- $h$  – współczynnik przenikania ciepła [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ];
- $k$  – przewodność cieplna radiatora [ $\text{W}/\text{mK}$ ];
- $Q$  – strumień ciepła [W];
- $t$  – grubość radiatora [m];
- $T_o$  – temperatura otoczenia [ $^{\circ}\text{C}$ ];
- $(X_c, Y_c)$  – współrzędne źródła ciepła [m, m].



**Rys. 4. Model radiatora z pojedynczym źródłem ciepła**

Średni wzrost temperatury na powierzchni radiatora ponad temperaturę otoczenia  $T_o$ , w miejscu zainstalowania źródła ciepła, można wyznaczyć z poniższego równania [12, 13]:

$$\begin{aligned} \bar{\theta} = \bar{\theta}_{1D} + 2 \sum_{m=1}^{\infty} A_m \frac{\cos(\lambda_m X_c) \sin(\frac{1}{2} \lambda_m c)}{\lambda_m c} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{\cos(\delta_n Y_c) \sin(\frac{1}{2} \delta_n d)}{\delta_n d} \\ + 4 \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \frac{\cos(\delta_n Y_c) \sin(\frac{1}{2} \delta_n d) \cos(\lambda_m X_c) \sin(\frac{1}{2} \lambda_m c)}{\lambda_m c \delta_n d} \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie  $m$  i  $n$  są indeksami kolejnych przybliżeń.

$$\bar{\theta}_{1D} = A_0 = \frac{Q}{ab} \left( \frac{t}{k} + \frac{1}{h} \right) \quad (3)$$

$$\lambda = m\pi / a \quad (4)$$

$$\delta = n\pi / b \quad (5)$$

$$\beta = \sqrt{\lambda^2 + \delta^2} \quad (6)$$

$$\phi(\zeta) = \frac{\zeta \sinh(\zeta t) + h/k \cosh(\zeta t)}{\zeta \cosh(\zeta t) + h/k \sinh(\zeta t)} \quad (7)$$

gdzie  $\zeta$  jest zastępowana odpowiednio przez  $\lambda, \delta$  oraz  $\beta$ .

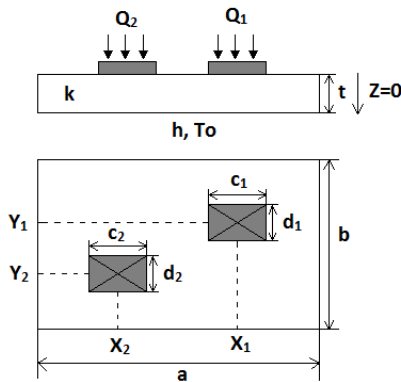
Współczynniki  $A_m, A_n, A_{mn}$  zależne od geometrii mocowania źródła ciepła na radiatorze.

## 4.2. Wielopunktowe źródło ciepła – model matematyczny

W przypadku zainstalowania więcej niż jednego źródła ciepła, (jak pokazano na rys. 5), rozkład temperatury na powierzchni radiatora można wyznaczyć metodą superpozycji. Dla  $n$  punktowych źródeł ciepła rozkład temperatury będzie wynosił:

$$T(x, y, 0) - T_o = \sum_{i=1}^n \theta_i(x, y, 0) \quad (8)$$

gdzie  $\theta_i$  jest nadwyżką temperatury dla każdego źródła oddzielnie.



**Rys. 5. Model radiatora z dwoma źródłami ciepła**

o współrzędnych  $X_j, Y_j$  obliczona jest na podstawie uwzględnienia współczynników  $A_0^i, A_m^i, A_n^i, A_{mn}^i$  dla każdego  $i$ -tego źródła ciepła.

Dla  $j$ -tego źródła ciepła, średnia temperatura na powierzchni radiatora może być wyznaczona następująco:

$$\bar{T}_j - T_o = \sum_{i=1}^N \bar{\theta}_i \quad (9)$$

gdzie:

$\theta_i$  – zależność uwzględniająca wszystkie źródła ciepła i geometrię radiatora.

Równanie (9) uwzględnia wpływ wszystkich źródeł ciepła do obliczenia średniej temperatury dla zadanej lokalizacji. Średnia temperatura dla źródła o wymiarach  $c_j, d_j$  zainstalowanego

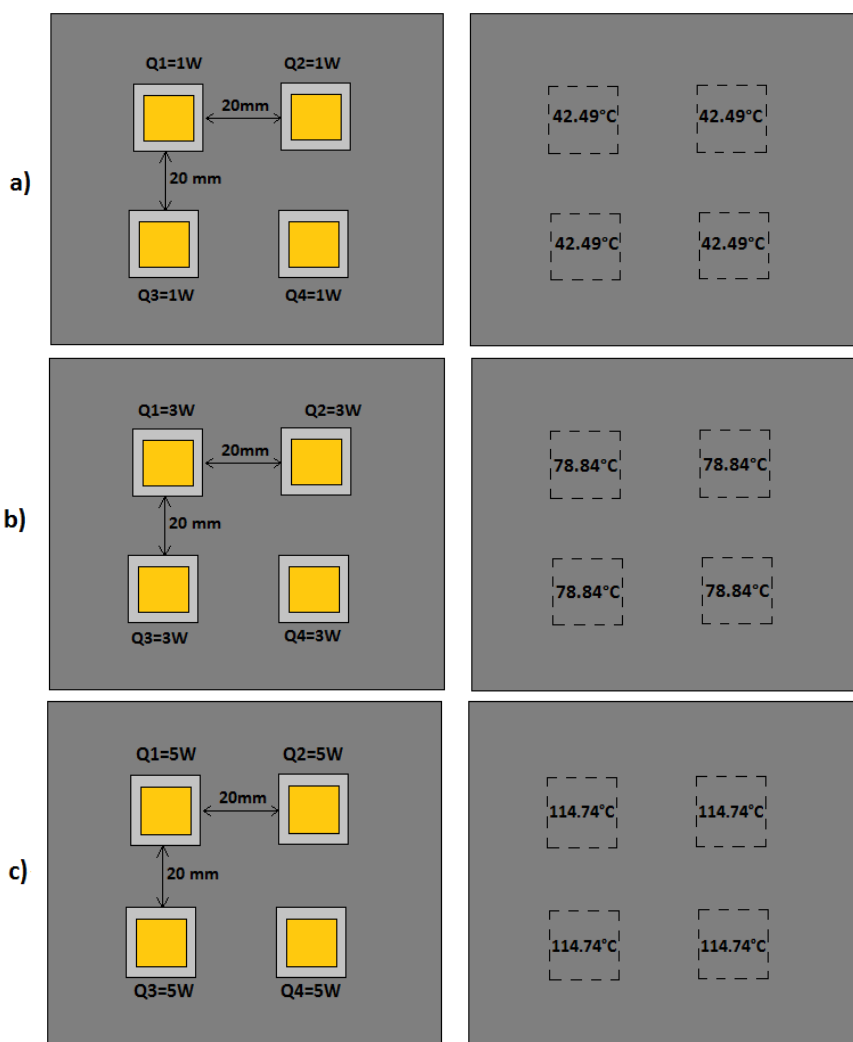
## 5. BADANIA SYMULACYJNE

Korzystając z przedstawionego powyżej modelu matematycznego, symulacyjnie wyznaczono rozkład temperatury na powierzchni radiatora w miejscu zainstalowania źródeł ciepła. Do badań symulacyjnych przyjęto jako źródło ciepła diody HP LED o wymiarach  $c = d = 20$  mm. Temperaturę wyznaczono dla kilku przypadków, w której zmieniana była moc cieplna, ilość oraz odległość pomiędzy zainstalowanymi źródłami ciepła. Funkcję radiatora w symulacji pełniła płyta aluminiowa o wymiarach: długość  $a = 150$  mm, szerokość  $b = 150$  mm i grubość  $t = 10$  mm. Pomiedzy źródłem ciepła a radiatorom występowała wymiana ciepła w postaci przewodzenia cieplnego, natomiast pomiedzy radiatorom a otoczeniem wymiana ciepła odbywała się poprzez konwekcję. Istotnym zagadnieniem związany z obliczaniem przepływu ciepła jest poprawne oszacowanie współczynnika przenikania ciepła  $h$ . Współczynnik ten może przyjmować różne wartości w zależności od warunków brzegowych, geometrii układu itp. Dla naturalnej konwekcji współczynnik ten zazwyczaj przyjmuje wartość w granicach  $5 \div 20$  W/m<sup>2</sup>K, podczas gdy dla konwekcji wymuszonej, może wynosić 100 W/m<sup>2</sup>K dla powietrza oraz do 10000 W/m<sup>2</sup>K dla wody. Zwykle w przypadku naturalnej konwekcji w powietrzu, do wstępnych obliczeń nie popełniając większego błędu można założyć współczynnik  $h$  wynoszący 10 W/m<sup>2</sup>K [5]. W badaniach symulacji przyjęto współczynnik przenikania ciepła  $h = 10$  W/m<sup>2</sup>K oraz współczynnik przewodzenia ciepła dla aluminium  $k = 200$  W/mK. Temperatura na powierzchni płyty  $T_f$  miała wartość ustaloną i była równa temperaturze otoczenia, która wynosiła  $T_o = 25^\circ\text{C}$ . Obliczenia symula-

cyjne wykonano w środowisku matematycznym Maple [15], przyjęto 50 kolejnych przybliżeń, zarówno do pojedynczego sumowania w celu wyznaczenia współczynników  $A_m$ ,  $A_n$ , jak i podwójnego sumowania do wyznaczenia współczynnika  $A_{mn}$ .

### 5.1. Wpływ mocy źródeł ciepła na rozkład temperatury na powierzchni radiatora

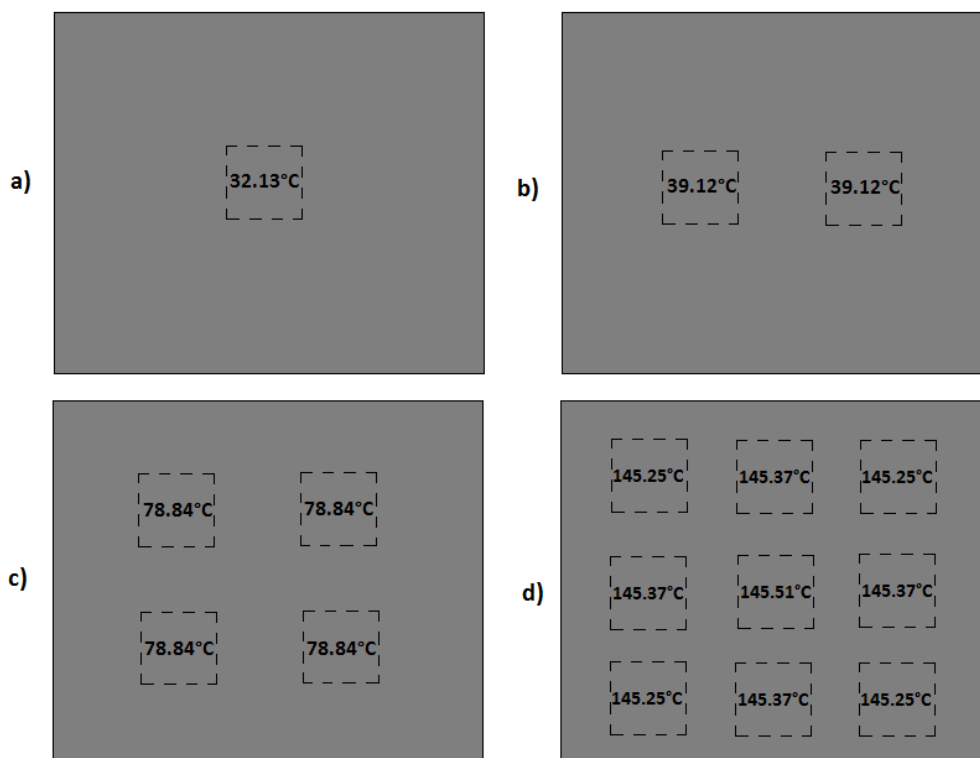
W pierwszym przypadku na płycie aluminiowej zainstalowano cztery źródła LED o mocy cieplnej wynoszącej odpowiednio 1 W, 3 W oraz 5 W (rys. 6.). Odległość pomiędzy źródłami była stała i wynosiła 20 mm. Średnia obliczona temperatura na powierzchni radiatora przyjmowała taką samą wartość w miejscach zainstalowania źródeł ciepła, co związane jest z symetrycznym rozmieszczeniem tych źródeł. Wraz ze wzrostem mocy źródeł, temperatura rosła i wyniosła odpowiednio: 42, 49°C dla źródeł o mocy 1 W; 78, 84°C dla źródeł o mocy 3 W oraz 114,74°C dla źródeł o mocy 5 W.



Rys. 6. Rozkład temperatury na powierzchni radiatora dla źródeł o mocy: a) 1 W, b) 3 W, c) 5 W

## 5.2. Wpływ ilości zainstalowanych źródeł ciepła na rozkład temperatury na powierzchni radiatora

W drugim przypadku, na płycie aluminiowej zainstalowano najpierw jedno, w następnej kolejności dwa, cztery oraz dziewięć źródeł ciepła o stałej mocy źródła wynoszącej 3 W. Odległość pomiędzy źródłami była stała i wynosiła 20 mm (rys. 7).



**Rys. 7. Rozkład temperatury na powierzchni radiatora dla zainstalowanego:**  
a) jednego źródła, b) dwóch źródeł, c) czterech źródeł, d) dziewięciu źródeł ciepła

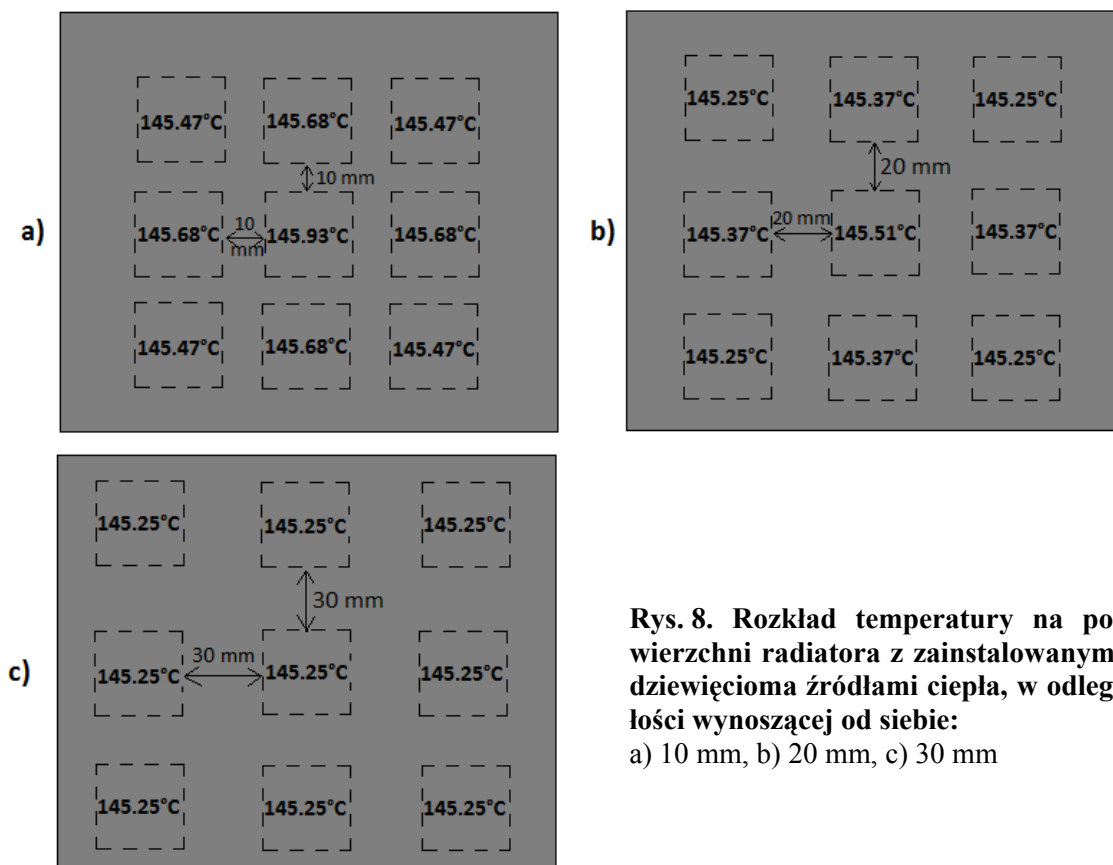
Wraz ze wzrostem ilości zainstalowanych źródeł LED rosła średnia temperatura na powierzchni płyty aluminiowej. Temperatura obliczona na powierzchni radiatora dla zainstalowanego jednego źródła o mocy cieplnej 3 W wyniosła 32,13°C, natomiast dla zainstalowanych dziewięciu źródeł temperatura wzrosła do wartości ponad 145°C. W przypadku, gdy symulowanych było dziewięć źródeł ciepła, temperatura obliczona dla źródeł w środkowej kolumnie oraz środkowym wierszu była nieznacznie wyższa od temperatury obliczonej dla skrajnych źródeł ciepła.

## 5.3. Wpływ odległości pomiędzy zainstalowanymi źródłami ciepła na rozkład temperatury na powierzchni radiatora

W trzecim przypadku zasymulowano zmianę odległości pomiędzy dziewięćma źródłami ciepła zainstalowanymi na płycie aluminiowej. Początkowa odległość



między źródłami o mocy 3 W wynosiła 30 mm, następnie odległość ta była zmniejszona do 20 mm, a w ostatnim kroku wynosiła 10 mm (rys. 8).



**Rys. 8. Rozkład temperatury na powierzchni radiatora z zainstalowanymi dziewięcioma źródłami ciepła, w odległości wynoszącej od siebie:**

a) 10 mm, b) 20 mm, c) 30 mm

Najwyższa obliczona średnia temperatura na powierzchni radiatora, w miejscu zainstalowania źródeł ciepła, wyniosła dla najmniejszej odległości pomiędzy zainstalowanymi źródłami ciepła. Wzrost ten jednak, w stosunku do temperatury radiatora, gdy odległość pomiędzy źródłami wynosiła 30 mm, był nieznaczny. Dla odległości wynoszącej 10 mm oraz 20 mm, temperatura radiatora dla środkowych źródeł była wyższa od temperatury dla źródeł skrajnych. Natomiast dla maksymalnej odległości pomiędzy źródłami ciepła wynoszącej 30 mm, obliczona temperatura na powierzchni płyty aluminiowej przyjmowała taką samą wartość dla wszystkich źródeł ciepła.

## 6. PODSUMOWANIE

Półprzewodnikowe źródła światła HP LED oprócz wielu zalet posiadają również pewne ograniczenia, wynikające głównie z wysokiej temperatury złącza. Temperatura ta wpływa na podstawowe parametry źródeł LED i jest technicznie trudna do bezpośredniego zmierzenia.

Przedstawiony w artykule model matematyczny pozwala na wyznaczenie temperatury na powierzchni radiatora, na którym zainstalowanych może być dowolna licz-

ba sprzężonych ze sobą termicznie źródeł ciepła. Znając wartość rezystancji termicznej całej struktury, możliwe jest oszacowanie temperatury złącza poszczególnych źródeł.

Podczas symulacji, na wartość temperatury na powierzchni płyty aluminiowej wpływała moc, ilość oraz w mniejszym stopniu odległość pomiędzy zainstalowanymi źródłami. Wartość temperatury na powierzchni radiatora uzależniona jest również od jego wymiarów i materiału, z jakiego został wykonany. Optymalne dobranie wszystkich powyższych parametrów pozwoli ograniczyć wzrost temperatury złącza do bezpiecznych granic, co w konsekwencji zapewni dłuższą żywotność oraz stabilność głównych parametrów świetlnych, takich jak strumień świetlny czy temperatura barwowa.

## LITERATURA

1. Wiśniewski A.: Lampy LED – ocena podstawowych parametrów. Przegląd elektrotechniczny, nr 5a, str. 166-168, 2012.
2. Alan M.: Lighting: the progress & promise of LEDs', III-V Rev., str. 39-41, 2004.
3. Domke K., Skrzypczak P.: Analiza cieplna układu: elektroluminescencyjna dioda mocy – element Peltiera – radiator. Przegląd elektrotechniczny, nr 10, str. 101-103, 2009.
4. Cheng T., Luo X., Huang S., Liu S.: Thermal analysis and optimization of multiple LED packaging based on a general analytical solution, International Journal of Thermal Sciences, nr 49, str. 196-201, 2010.
5. Cree – XLamp Thermal Management.
6. Karta katalogowa lampy ulicznej LED CGA126A.
7. Górecki K., Górecka K.: Wpływ zjawisk cieplnych na właściwości diody LED mocy. Przegląd elektrotechniczny, nr. 7, str. 144-147, 2011.
8. Górecki K., Zarębski J.: Wpływ wybranych czynników na właściwości półprzewodnikowych źródeł światła. Elektronika, nr. 8, str. 73-77, 2008.
9. Pabjańczyk W., Sikora R., Markiewicz P., Gabryjelski Z.: Wpływ warunków środowiskowych na pracę opraw z modułami LED. Przegląd elektrotechniczny, nr 11, str. 226-228, 2009.
10. Wiczyński G.: Wpływ temperatury na widmo optyczne diody LED. Elektronika, nr 6, str. 211-213, 2008.
11. Karta katalogowa diody LED Cree XLamp X-PG.
12. Jacobs D.: LEDs and Heat: Managed or Micromanaged?. Optek Technology, January 2010.
13. Muzychka Y.S., Culham J.R., Yovanovich M.M.: Thermal spreading resistance of eccentric heat sources on rectangular flux channels. ASME J. Electron. Packag, nr. 125, str. 178-185, 2003.
14. Luo X., Xiong W., Cheng T., Liu S.: Temperature estimation of high-power light emitting diode street lamp by a multi-chip analytical solution. IET Optoelectron., Vol. 3, str. 225-232, 2009.
15. [www.maplesoft.com](http://www.maplesoft.com).

## THERMAL INTERACTION BETWEEN THE HP LED SOURCES INSTALLED ON A COMMON RADIATOR

Antoni RÓŻOWICZ, Krzysztof BARAN

**ABSTRACT** *The article presents the mathematical model allowing to determine the temperature of the radiator, on which there can be installed any number of heat sources coupled with each other. Based on the model, the temperature of the aluminium plate with installed LED light sources (being the sources of heat) was determined by simulation. The simulation was performed for several cases, in which the amount, power and the distance between LED sources was different. Thus estimated distribution of the radiator can be used to calculate the temperature of the junction, which influences the basic parameters of LED sources.*

**Keywords:** *LED, heat source, thermal coupling, junction temperature, mathematical model*

**Dr hab. inż. Antoni RÓŻOWICZ, prof. PŚk** – pracuje w Katedrze Urządzeń Elektrycznych i Techniki Świetlnej Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach. Studia wyższe ukończył na Wydziale Elektrycznym Politechniki Częstochowskiej w Częstochowie. Doktoryzował się w 1987 r. na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej. Jest autorem wielu publikacji i opracowań naukowo-badawczych z zakresu elektroenergetyki i oświetlenia elektrycznego.



**Mgr inż. Krzysztof BARAN** – pracuje w Katedrze Energoelektroniki i Elektroenergetyki Politechniki Rzeszowskiej. Studia wyższe ukończył w 2011 r. na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej. Obecnie jest uczestnikiem studiów doktorskich i przygotowuje rozprawę doktorską z zakresu techniki świetlnej.

