

## Modelowanie ograniczenia wykrywalności obiektów w obrazie termowizyjnym

*Modeling the limit of detectability of objects in a thermal image*

**Streszczenie.** W artykule zwrócono uwagę na zasadność badania warunków, w których nie jest możliwe wykrycie obiektów za pomocą analizy promieniowania podczerwonego. Opracowany został model matematyczny sygnałów pochodzących z dwóch różnych obiektów w zależności od ich temperatury, emisyjności, temperatury tła i emisyjności, a także właściwości radiacyjnych atmosfery. Należy zauważyć, że w celu uniknięcia wykrycia obiektów przez promieniowanie podczerwone, istotne jest zapewnienie związku między tymi parametrami badanych obiektów, a wartością różnicy temperatur równoważnych szumom (NETD) kamery podczerwonej wykorzystywanej w procesie pomiaru. W artykule symulowano gęstość promieniowania dla różnych wartości temperatury, współczynnika promieniowania, mocy promieniowania generowanego przez obiekty.

**Abstract.** The article "No Distinguishing objects by their infrared radiation" indicates the relevance of studying the conditions under which it is impossible to detect objects by infrared radiation. A mathematical model of signals from two different objects has been formed depending on their temperature, emissivity, temperature and emissivity of the background and the radiative properties of the atmosphere. It is noted that in order not to detect objects by infrared radiation, it is important to ensure the relationship between these parameters of the studied objects and the value of the Noise Equivalent Temperature Difference (NETD) of the infrared camera used in the measurement process. The article models the radiation density for different values of temperature, emissivity, and the radiation power generated by the objects.

**Słowa kluczowe:** emisyjność, gęstość strumienia promieniowania, temperatura, promieniowanie podczerwone, promieniowanie tła, przepuszczalność optyczna atmosfery.

**Keywords:** emissivity, radiant flux density, temperature, infrared radiation, background radiation, optical transmittance of the atmosphere.

### Wstęp

W nowoczesnych systemach obserwacji, wykrywania, ochrony i monitorowania coraz częściej wymagane jest zastosowanie, jako podstawowego modułu obserwacyjnej kamery termowizyjnej. W tych działaniach obserwacyjne kamery termowizyjne mogą być zastosowane do obserwacji, wykrywania, identyfikacji obiektów w trudnych warunkach pogodowych i oświetlenia, ograniczenia widoczności spowodowanych pyłem, kurzem, dymem, mgłą itp. Generalnie w systemach obserwacyjnych stosuje się kamery termowizyjne o dużej rozdzielczości przestrzennej (o wymiarach min. 640x480 detektorów podczerwieni), widmowym zakresie pracy w przedziale 3 – 5  $\mu\text{m}$  (MWIR) i 8 – 14  $\mu\text{m}$  (LWIR) oraz z detektorami chłodzonymi i niechłodzonymi.

Obserwacyjna kamera termowizyjna rejestruje rozkład promieniowania podczerwonego pochodzącego od obserwowanych obiektów i na tej podstawie wyznacza obraz obserwowanej sceny. Na wyznaczenie obrazu rozkładu promieniowania ma wpływ wiele czynników, do których należą emisyjność obserwowanego obiektu, temperatura otoczenia, transmisja i temperatura układu optycznego, temperatura kamery i detektora z uwzględnieniem samonagrzewania [2, 3, 6, 7, 8, 9, 10]. W celu wykrywania obiektów ważne jest zapewnienie różnicy w intensywności promieniowania docierającego do detektorów kamery termowizyjnej z powierzchni różnych obiektów A i B [2, 3, 8, 9, 10, 11]. Rozróżnienie obiektów wymaga spełnienia co najmniej jednego z następujących warunków:

$$(1) \quad \varepsilon_A \neq \varepsilon_B, T_A \neq T_B, M_A \neq M_B$$

gdzie  $\varepsilon$  - emisyjność, jako zdolność powierzchni ciała do emisji promieniowania cieplnego,  $T$  - temperatura powierzchni obiektu,  $M$  - gęstość mocy promieniowania różnych obiektów A i B.

Jednak w niektórych zastosowaniach potrzebne jest zmniejszenie rozróżnialności obiektów np. dla celów ich maskowania. Wówczas należy rozwiązać odwrotne zadanie polegające na odpowiedzi w jaki sposób i jakimi metodami zmniejszyć możliwość rozróżnienia przez kamerę termowizyjną obiektów o różnych formach i materiałach powierzchni albo różnej temperaturze. W tym celu należy dążyć do sytuacji, w której gęstość mocy promieniowania docierającego do detektorów kamery termowizyjnej z różnych obiektów A i B musi być jednakowa. Aby zapewnić taki efekt, ważne jest zapewnienie optymalnej zależności pomiędzy wartościami emisyjności a temperaturą powierzchni obiektów A i B.

Niniejsza praca jest poświęcona opracowaniu metod modelowania warunków, w których będzie możliwe ograniczenie widoczności (wykrywania) obiektów w obrazie termowizyjnym. Głównym celem pracy badawczej było określenie dla jakich warunków i parametrów jest możliwe wykrycie lub ukrycie obiektu w obrazie rejestrowanym przez kamerę termowizyjną.

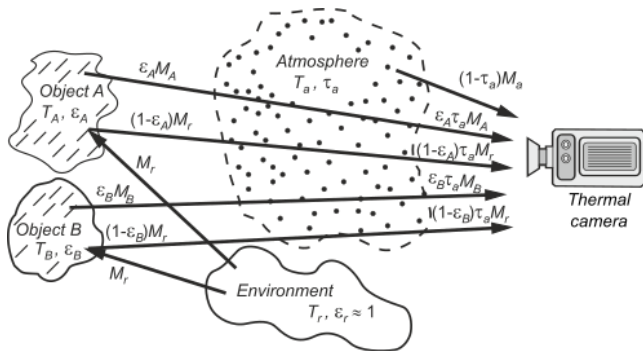
### Podstawowy model rejestracji promieniowania dwóch różnych obiektów A i B

Do kamery termowizyjnej dociera promieniowanie podczerwone pochodzące od obserwowanego obiektu, promieniowanie pochodzące od elementów otoczenia (ludzie, drzewa, budynki, pojazdy) i promieniowanie odbite od powierzchni obiektu [5, 6, 10, 11, 12, 14]). Ponadto wszystkie składniki promieniowania są tłumione przez atmosferę znajdującą się na drodze propagacji promieniowania. W kamerach termowizyjnych najczęściej przyjmuje się, że do kamery dociera promieniowanie podczerwone ze źródeł przedstawionych na rysunku 1.

Zgodnie z oznaczeniami na rysunku 1 są trzy składniki mocy promieniowania docierające do obiektywu kamery co można zapisać za pomocą wzoru [6, 7, 12]:

$$(2) \quad M_{C\lambda} = M_{o\lambda} + M_{r\lambda} + M_{a\lambda}$$

gdzie:  $M_{o\lambda}$  - gęstość widmowa mocy promieniowania obiektu,  $M_{r\lambda}$  - gęstość widmowa mocy promieniowania odbitego od obiektu,  $M_{a\lambda}$  - gęstość widmowa mocy promieniowania atmosfery.



Rys. 1. Źródła promieniowania podczerwonego w pomiarach termograficznych przyjmowane w algorytmie wyznaczenia temperatury

Gęstość widmową mocy promieniowania obiektu  $M$  można zapisać za pomocą wzoru [6, 7, 12, 14]:

$$(3) \quad M = \varepsilon_{o\lambda} \tau_{a\lambda} M_{\lambda}(T_o)$$

gdzie  $\varepsilon_{o\lambda}$  - emisyjność obiektu,  $\tau_{a\lambda}$  - współczynnik przepuszczalności atmosfery,  $T_o$  - temperaturą obiektu,  $M_{\lambda}$  - rozkład widmowy egzycytacji energetycznej ciała czarnego.

Gęstość widmową mocy promieniowania odbitego od obiektu  $M_{r\lambda}$  pochodzące ze źródeł w otoczeniu można zapisać za pomocą wzoru [6, 7, 12]:

$$(4) \quad M_{r\lambda} = \rho_{o\lambda} \tau_{o\lambda} M_{\lambda}(T_r) = (1 - \varepsilon_{o\lambda}) \tau_{o\lambda} M_{\lambda}(T_r)$$

gdzie  $\rho_{o\lambda}$  to współczynnik odbicia który dla ciał nie przezroczystych jest równy  $\rho_{o\lambda} = (1 - \varepsilon_{o\lambda})$ . Temperatura źródeł w otoczeniu wynosi  $T_r$ , przy czym całe otoczenie jest traktowane jako ciało doskonale czarne o emisyjności  $\varepsilon_r = 1$ .

Gęstość widmową mocy promieniowania atmosfery  $M_{a\lambda}$  można opisać wzorem [6, 7, 12]:

$$(5) \quad M_{a\lambda} = (1 - \tau_{a\lambda}) M_{\lambda}(T_a)$$

gdzie  $(1 - \tau_{a\lambda})$  jest emisyjnością atmosfery (przy założeniu, że  $\rho_{a\lambda} = 0$ ). Temperatura atmosfery wynosi  $T_a$ .

Całkowita gęstość widmowa mocy promieniowania odbierana przez kamerę wynosi [6, 7]:

$$(6) \quad M_{c\lambda} = \varepsilon_{o\lambda} \tau_{a\lambda} M_{\lambda}(T_o) + (1 - \varepsilon_{o\lambda}) \tau_{a\lambda} M_{\lambda}(T_r) + (1 - \tau_{a\lambda}) M_{\lambda}(T_a)$$

Zamontowany w kamerze termowizyjnej matrycowy detektor podczerwieni odbiera promieniowanie w paśmie długości fal  $\lambda \in \langle \lambda_1, \lambda_2 \rangle$ . Wówczas całkowita moc promieniowania odbierana przez kamerę wynosi [6, 7, 13]:

$$(7) \quad M_C = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left[ \begin{array}{l} \varepsilon_{o\lambda} \tau_{a\lambda} M_{\lambda}(T_o) + \\ + (1 - \varepsilon_{o\lambda}) \tau_{a\lambda} M_{\lambda}(T_r) + \\ + (1 - \tau_{a\lambda}) M_{\lambda}(T_a) \end{array} \right] d\lambda$$

Jeżeli przyjmujemy, że dla zakresu długości fali  $\lambda \in \langle \lambda_1, \lambda_2 \rangle$  wartość emisyjności obiektu i wartość transmisji atmosfery są stałe (nie zależą od długości fali) [6, 7]:

$$(8) \quad \varepsilon_{o\lambda} = \varepsilon_o = const, \quad \tau_{a\lambda} = \tau_a = const,$$

oraz przyjmując oznaczenie:

$$(9) \quad M(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda}(T) d\lambda,$$

to wówczas można zapisać:

$$(10) \quad M_C = \varepsilon_o \tau_a M(T_o) + (1 - \varepsilon_o) \tau_a M(T_r) + (1 - \tau_a) M(T_a)$$

Jeżeli w polu obserwacji występują dwa obiekty oznaczone jako A i B to każdego tych obiektów można wzór (10) zapisać w postaci:

$$(11) \quad M_{CA} = \varepsilon_A \tau_a M(T_A) + (1 - \varepsilon_A) \tau_a M(T_r) + (1 - \tau_a) M(T_a)$$

$$(12) \quad M_{CB} = \varepsilon_B \tau_a M(T_B) + (1 - \varepsilon_B) \tau_a M(T_r) + (1 - \tau_a) M(T_a)$$

Różnica pomiędzy mocą promieniowania obiektów A i B odbierana przez kamerę termowizyjną wynosi:

$$(13) \quad \Delta M_{CAB} = M_{CA} - M_{CB},$$

albo:

$$(14) \quad \Delta M_{CAB} = \varepsilon_A \tau_a M(T_A) - \varepsilon_B \tau_a M(T_B) + (\varepsilon_B - \varepsilon_A) \tau_a M(T_r)$$

W przypadku braku intensywnych źródeł promieniowania wokół badanych obiektów A i B, w szczególności w nocy, odbicie promieniowania można pominąć. W takim przypadku wzory (11), (12), (14) przyjmują postać:

$$(15) \quad M_{CA} = \varepsilon_A \tau_a M(T_A) + (1 - \tau_a) M(T_a),$$

$$(16) \quad M_{CB} = \varepsilon_B \tau_a M(T_B) + (1 - \tau_a) M(T_a),$$

$$(17) \quad \Delta M_{CAB} = \varepsilon_A \tau_a M(T_A) - \varepsilon_B \tau_a M(T_B).$$

Z analizy wzorów (14) i (17) wynika, że nierozróżnialność obiektów A i B za pomocą kamery termowizyjnej można uzyskać poprzez odpowiedni dobór temperatury obiektów, ich współczynników emisyjności i temperatury promieniowania tła.

#### Kryterium nierozróżnienia obiektu A od obiektu B w podczerwieni

W celu uzyskania stanu nierozróżniania obiektu A od obiektu B należy doprowadzić do sytuacji, w której wartość różnicy mocy promieniowania tych obiektów  $\Delta M_{CAB}$ , wyznaczona zgodnie ze wzorem (17), jest mniejsza od energii określonej przez Noise Equivalent Temperature Difference (NETD), czyli:

$$(18) \quad |\Delta M_{CAB}| < \frac{1}{2} \Delta M_{NETD}$$

gdzie:

$$(19) \quad \Delta M_{NETD}(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda}(T + NETD) d\lambda - \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda}(T) d\lambda$$

czyli:

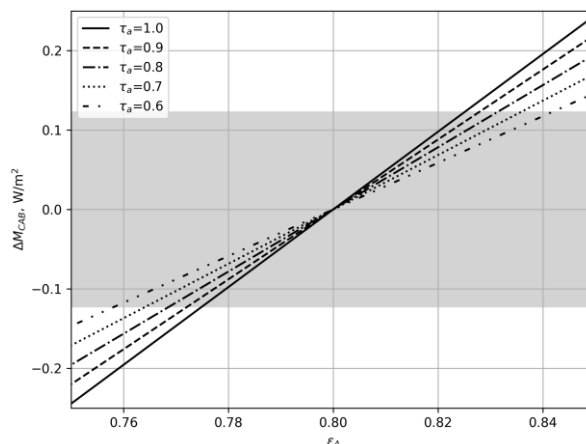
$$(20) \quad -\frac{1}{2} \Delta M_{NETD} < \Delta M_{CAB} < \frac{1}{2} \Delta M_{NETD}$$

### Wpływ różnych czynników na właściwości radiacyjne i emisyjność obiektów

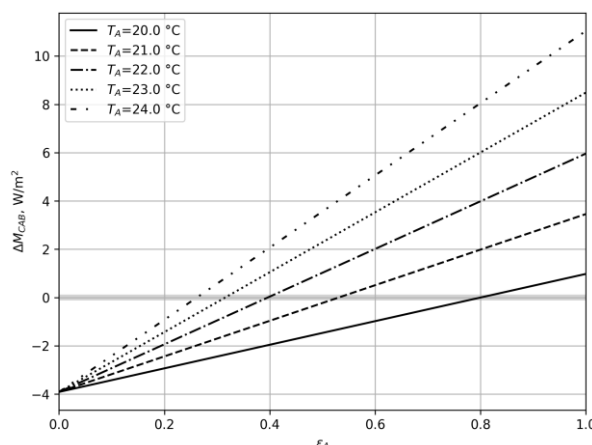
Ze wzoru (20) wynika, że w celu doprowadzenia do sytuacji, w której nie jest rozróżniany obiekt A od obiektu B należy skompensować promieniowanie pochodzące od obiektu A (przy założeniu niezmiennych parametrów obiektu B). Taką kompensację można przeprowadzić poprzez zmianę emisyjności obiektu A, zmianę temperatury obiektu A albo obu tych czynników jednocześnie. Skutecznie przeprowadzenie procedury kompensacji wymaga znajomości konkretnych, wymaganych wartości zmiany emisyjności i temperatury obiektu. Z tego powodu zostały przeprowadzone badania i symulacje jak zmiana tych czynników wpływa na rozróżnialność obiektów. W tym celu na podstawie ww. zależności został opracowany model numeryczny w postaci programu w języku Python. Oprogramowanie pozwoliło na przeanalizowanie wielu przypadków wartości emisyjności i temperatury dla obiektów A i B oraz ocenę ich wpływu na rozróżnienie obiektów w podzervieni.

Na rysunkach 2 – 6 zostały przedstawione przykładowe wyniki symulacji, w których przyjęto następujących wartości parametrów: zakres widmowy od 8 do 14  $\mu\text{m}$ , temperatura otoczenia wynosi  $T_r = 18^\circ\text{C}$ . Na rysunkach kolorem szarym został wyróżniony obszar mocy promieniowania w zakresie od  $-\frac{1}{2} \Delta M_{NETD}(T)$  do  $\frac{1}{2} \Delta M_{NETD}(T)$ . Pierwszym analizowanym czynnikiem była różnica mocy generowanej przez obiekty  $\Delta M_{CAB}$  w funkcji emisyjności  $\varepsilon_A$  obiektu A dla różnych wartości transmisji atmosfery  $\tau_a$ . W wyniku symulacji okazało się, że transmisja atmosfery ma niewielki wpływ na zmianę rozróżnialności. Zmiana transmisji o 40% wymaga niewielkich korekt emisyjności, wynoszących mniej niż 0,02, aby obiekty były nierozróżnialne. Uzyskane wyniki zostały przedstawione na rysunku 2. Następnym analizowanym czynnikiem była różnica mocy generowanej przez obiekty  $\Delta M_{CAB}$  w funkcji emisyjności  $\varepsilon_A$  obiektu A dla różnych wartości temperatury  $T_A$  obiektu A. W wyniku przeprowadzonych badań okazało się, że zmiana temperatury obiektu A w zakresie od 19,0°C do 23,0°C jest możliwa do skompensowania przez zmianę emisyjności w zakresie od 0,25 do 1. Szerszy zakres temperatury nie jest możliwy do skompensowania co zostało przykładowo przedstawione na rysunku 4. Uzyskane wyniki zostały przedstawione na rysunkach 3 i 4. Ostatnim analizowanym przypadkiem była różnica mocy generowanej przez obiekty  $\Delta M_{CAB}$  w funkcji temperatury  $T_A$  obiektu A dla różnych wartości emisyjności  $\varepsilon_A$  obiektu A. W wyniku przeprowadzonej symulacji okazało się, że zmiana emisyjności w zakresie od 0,6 do 1 może zostać skompensowana przez zmianę temperatury obiektu A

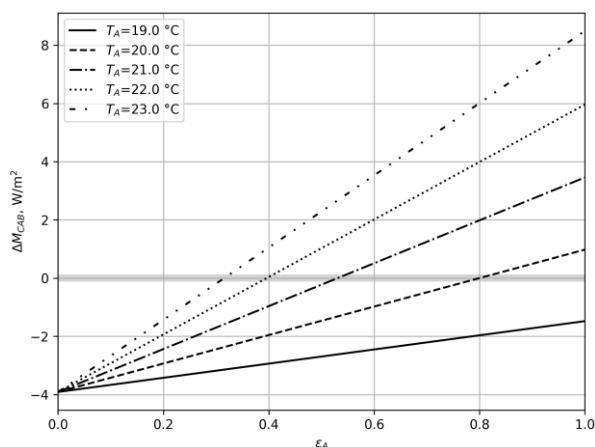
w zakresie od 19,6°C do 20,6°C. Oznacza to, że znaczna zmiana emisyjności wymaga niewielkich zmian temperatury. Przy czym w celu utrzymania stanu nierozróżniania obiektów temperatura obiektu A musi być ustawiana ze znaczną precyzją. Wyniki symulacji zostały przedstawione na rysunkach 5 i 6 (dla różnych zakresów temperatury).



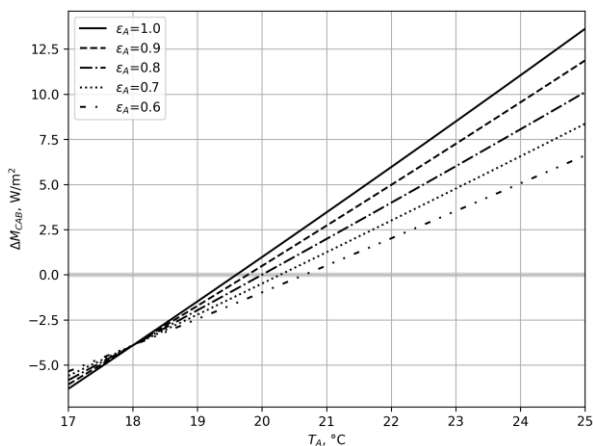
Rys. 2. Różnica mocy generowanej przez obiekty w funkcji emisyjności  $\varepsilon_A = (0,76 \div 0,84)$  dla różnych wartości transmisji atmosfery  $\tau_a = (0,6 \div 1,0)$



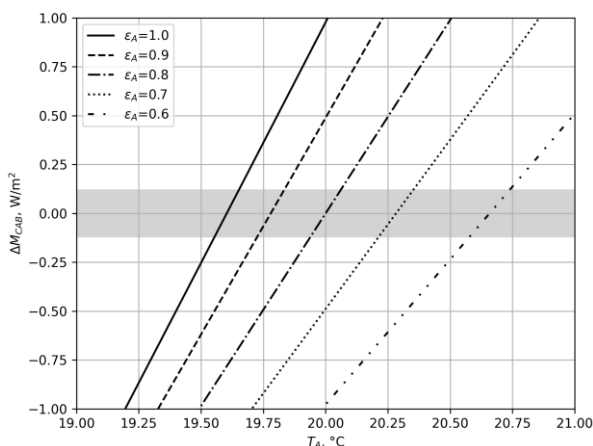
Rys. 3. Różnica mocy generowanej przez obiekty w funkcji emisyjności  $\varepsilon_A = (0,0 \div 1,0)$  dla różnych wartości temperatury  $T_A = (20 \div 24)^\circ\text{C}$



Rys. 4. Różnica mocy generowanej przez obiekty w funkcji emisyjności  $\varepsilon_A = (0,0 \div 1,0)$  dla różnych wartości temperatury  $T_A = (19 \div 23)^\circ\text{C}$  (dla  $T_A = 19^\circ\text{C}$  nie jest możliwa kompensacja)



Rys. 5. Różnica mocy generowanej przez objekty w funkcji temperatury  $T_A = (17+25) \text{ }^\circ\text{C}$  dla różnych wartości emisyjności  $\varepsilon_A = (0,6+1,0)$



Rys. 6. Różnica mocy generowanej przez objekty w funkcji temperatury  $T_A = (19+21) \text{ }^\circ\text{C}$  dla różnych wartości emisyjności  $\varepsilon_A = (0,6+1,0)$

W celu sprawdzenia poprawności opracowanego modelu przeprowadzono rejestrację mocy promieniowania dla powierzchni o różnej emisyjności. Jako źródło promieniowania zastosowano test złożony z ośmiu różnych powierzchni zamocowanych na jednej wspólnej powierzchni odniesienia. Każda z powierzchni (także powierzchnia odniesienia) miała inną emisyjność zmierzoną laboratoryjnie. Wartości emisyjności dla poszczególnych powierzchni w zakresie LWIR przedstawiono w tabeli 1. Konstrukcja testu i sposób zamontowania powierzchni został tak rozwiązany, aby można było ustawić temperaturę identyczną dla wszystkich powierzchni. Widok testu został przedstawiony na rysunku 7.

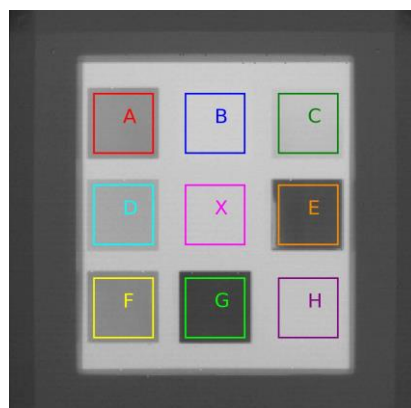
Dla określonej (ustawionej) temperatury testu została przeprowadzona rejestracja obrazu termograficznego w zakresie długofalowym za pomocą kamery termowizyjnej. W czasie rejestracji termogramu rejestrowano także temperaturę atmosfery ( $T_a$ ). Przykładowy termogram testu (powierzchni o różnej emisyjności) zarejestrowany dla temperatury obiektu/testu ( $T_o$ ) równej  $32^\circ\text{C}$  i przy temperaturze atmosfery ( $T_a$ ) równej  $22^\circ\text{C}$  został przedstawiony na rysunku 8.

Dla identycznych warunków jak w czasie pomiarów zostały obliczone moce promieniowania dla poszczególnych obiektów za pomocą opracowanego modelu. Zmierzone i obliczone wartości egzytancji zostały przedstawione w tabeli 1.

Z przedstawionych wyników wynika, że opracowany i zastosowany model promieniowania ciała o zadanej emisyjności i temperaturze dobrze przybliża warunki rzeczywiste. Jednocześnie można zauważyć, że im mniejsza różnica promieniowania danej powierzchni (A-H) z powierzchnią odniesienia (X) tym mniejsza rozróżnialność obiektów.



Rys. 7. Widok testu z powierzchniami o różnej emisyjności



Rys. 8. Termogram testu z zaznaczonymi obszarami pomiarowymi dla powierzchni o różnej emisyjności zarejestrowany dla temperatury obiektu ( $T_o$ ) równej  $32^\circ\text{C}$  przy temperaturze atmosfery ( $T_a$ ) równej  $22^\circ\text{C}$

Tabela 1. Wyniki pomiarów i symulacji dla powierzchni o różnej emisyjności zarejestrowany dla temperatury obiektu ( $T_o$ ) równej  $32^\circ\text{C}$  przy temperaturze atmosfery ( $T_a$ ) równej  $22^\circ\text{C}$

Nazwa	Emisyjność	Egzytancja zmierzona, $\text{W/m}^2$	Egzytancja obliczona, $\text{W/m}^2$
A	0,61	71,90	71,22
B	0,98	76,50	75,91
C	0,86	75,35	74,39
D	0,74	73,45	72,87
X	0,93	75,99	75,28
E	0,22	66,82	66,28
F	0,55	71,06	70,46
G	0,15	65,88	65,40
H	0,91	75,59	75,02

### Wnioski

Jak wynika ze wzorów (11) – (20), spełnienie warunku nierozróżniania obiektów zależy istotnie od dwóch głównych parametrów badanych obiektów: temperatury i emisyjności. Jednak, aby zapewnić efekt nierozróżniania obiektów w zakresie podczerwieni za pomocą kamery termowizyjnej, ważne jest zapewnienie optymalnej zależności pomiędzy wartościami emisyjności a temperaturą poszczególnych punktów powierzchni obiektu, kątem widzenia przekroju obiektu, temperaturą i intensywnością promieniowanie tła.

Z przeprowadzonych symulacji wynika, że w celu uzyskania efektywnego nierozróżniania obiektów temperatura jednego z nich powinna być zmieniana precyzyjnie w niewielkim zakresie wartości. Szybka i precyzyjna zmiana temperatury w warunkach rzeczywistych jest trudna do osiągnięcia. W szczególności, gdy obiekty mają znaczną masę zmiana temperatury jest czasochłonna i wymaga dostarczenia lub odebrania znacznej ilości ciepła.

Tabela 2. Czynniki wpływające na wartość współczynnika emisyjności

Główne czynniki	Czynniki wpływające na wartość współczynnika emisyjności
Właściwości fizyczne powierzchni badanego obiektu	Materiał powierzchni
	Obróbka i stan materiału powierzchniowego
	Temperatury powierzchni
	Kąt promieniowania powierzchni materiału
	Długość fali promieniowania
Promieniowanie tła	Dyfuzyjność odbicia powierzchniowego
Parametry metrologiczne kamery termowizyjnej	Zakres widmowy kamery termowizyjnej
	Szybkość wykonania pomiaru
	Czułość temperaturowa
	Kąt bryłowy percepcji promieniowania

W związku z tym w celu kompensacji różnicy promieniowania obiektów łatwiej jest zmieniać współczynnik emisyjności. W szczególności współczynnik emisyjności zależy od wielu czynników, z których główne zostały przedstawione w tabeli 2. W rzeczywistym systemie ukrywania obiektu zasadniczym problemem jest znalezienie sposobu zmiany emisyjności powierzchni obiektu w wymaganym zakresie. Pierwszym zadaniem, które należy podjąć jest przeprowadzenie badań różnych materiałów pod kątem możliwości zmiany do regulacji emisyjności. Opracowany w pracy model może posłużyć do określenia zakresu zmienności emisyjności powierzchni oraz do określenia teoretycznej skuteczności metody ukrywania obiektów.

**Autorzy:** Nataliya Hots, Tetiana Bubela, Oleksiy Mochurad, Lviv Polytechnic National University, Institute of Computer Technology, Automation and Metrology; Tomasz Sosnowski, Mariusz Kastek, Military University of Technology, Institute of Optoelectronics

#### LITERATURA

- [1] Fujin Hou, Yan Zhang, Yong Zhou, Mei Zhang, Bin Lv, Jianqing Wu. Review on Infrared Imaging Technology, Sustainability 2022, 14(18), 11161; <https://doi.org/10.3390/su141811161>.
- [2] Strakowska, M.; Chatzipanagiotou, P.; De Mey, G.; Chatziathanasiou, V.; Więcek, B. Multilayer thermal object identification in frequency domain using IR thermography and vector fitting, *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 2020, DOI: 10.1002/cta.2845, part of ISSN: 1097007X 00989886/
- [3] Felczak, M.; Mey, G.D.; Więcek, B.; Chatzipanagiotou, P.; Chatziathanasiou, V., Dynamic thermal heat pipes analysis: Thermal impedance in start-up condition, *Microelectronics Journal*, 2019, DOI: 10.1016/j.mejo.2019.104639, Part of ISSN: 00262692.
- [4] Gralewicz, Grzegorz; Wiecek, Boguslaw. Active Thermography in Qualitative Evaluation of Protective Materials, *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 2009, WOS:000273181000002.
- [5] Papagiannakis, A.; Chatziathanasiou, V.; Papagiannopoulos, I.; DeMey, G.; Wiecek B., Electrothermal analysis of overhead power lines, 2012 IEEE International Conference on Industrial Technology, ICIT 2012, Proceedings 2012, DOI: 10.1109/ICIT.2012.6209984, EID: 2-s2.0-84863957241.
- [6] Felczak M., Sosnowski T., Strąkowski R., Bieszczad G., Gogler S., Stępień J., Więcek B. Electrothermal analysis of a TEC-less IR microbolometer detector including self-heating and thermal drift. *Quantitative InfraRed Thermography Journal* 2023;0:1–25. <https://doi.org/10.1080/17686733.2023.2179280>.
- [7] Sosnowski, T.; Kastek, M.; Sawicki, K.; Ligienza, A.; Gogler, S.; Więcek, B. High-Accuracy Calibration Method of a Thermal Camera Using Two Reference Blackbodies. *Sensors* 2024, 24, 5831. <https://doi.org/10.3390/s24175831/>
- [8] Ligienza A., Kastek M., Sosnowski T., Firmanty K., Nieselektywne powierzchnie referencyjne w teledetekcji hiperspektralnej w zakresie dalekiej podczerwieni, „Pomiary Automatyka Robotyka”, R. 28, Nr 2/2024, 107-112, DOI: 10.14313/PAR\_252/107.
- [9] Ligienza A., Bieszczad G., Sosnowski T., Bartosewicz B., Firmanty K., Nowatorskie pokrycia powierzchni ciał czarnych dla zakresu dalekiej podczerwieni, „Pomiary Automatyka Robotyka”, R. 25, Nr 4/2021, 77-82, DOI: 10.14313/PAR\_242/77.
- [10] Hots N., Przystupa K., Mikhalewa M., Ruslan, B. Simulation of the influence of multiple reflections of background radiation on the thermography results, *Przeegląd Elektrotechniczny* 98(3), (2022), pp. 117–120.
- [11] G. López ·L.A. Basterra ·L. Acuña ·M. Casado. Determination of the Emissivity of Wood for Inspection by Infrared Thermography, 2013, *Journal of Nondestructive Evaluation* 32(2), DOI:10.1007/s10921-013-0170-3
- [12] Chang-Da Wen and Issam Mudawar. Experimental Investigation of Emissivity of Aluminum Alloys and Temperature Determination Using Multispectral Radiation Thermometry (MRT) Algorithms. 2002, *Journal of Materials Engineering and Performance* ,11(5):551-562, DOI:10.1361/105994902770343818
- [13] Lukáš Muzika, Jirí Tesar , Michal Švantner , Jirí Skála and Petra Honnerová. Comparison of Methods for Emissivity Influence Suppression on Thermographic Data, *Buildings* 2023, 13(1), 69; <https://doi.org/10.3390/buildings13010069>
- [14] Holst G.C., Electro-optical imaging system performance, SPIE, Fifth wyd., 2008, ISBN 978-0-8194-7406-3