MONITOROWANIE STRAT CIEPŁA INSTALACJI PRZEMYSŁOWYCH – POPRAWNOŚĆ WYKONYWANIA POMIARÓW TERMOWIZYJNYCH I ANALIZY TERMOGRAMÓW

MONITORING OF HEAT LOSSES OF INDUSTRIAL INSTALLATIONS – THE CORRECTNESS OF MEASURING AND ANALYZING INFRARED THERMAL IMAGES

SLAWOMIR ZATOR

POLITECHNIKA OPOLSKA WYDZIAŁ INŻYNIERII PRODUKCJI I LOGISTYKI

STRESZCZENIE

Pomiary termowizyjne są obecnie powszechnie wykorzystywanym narzędziem diagnostycznym. W praktyce jednak często nie ma możliwości wykonania ich w warunkach optymalnych, takich jak ustawienie kamery w stosunku do obiektu czy pełne skompensowanie wpływu otoczenia na pomiary. Prowadzi to do powstania dodatkowych błędów pomiaru temperatury. Opisano je w niniejszym referacie.

W rozdziale zaprezentowano także nowe sposoby fuzji różnych technik pomiarowych służących uzyskaniu poprawnych informacji na temat temperatury powierzchni obiektu. Ukazano również możliwość integracji danych przestrzennych z informacją termiczną oraz korzyści, jakie można w związku z tym uzyskać.

ABSTRACT

Thermal measurements are now commonly used diagnostic tool. However, in practice often is impossible to make measurements under optimal conditions, such the position the camera relative to the object or fully correction of environment influence on the measurements. This leads to additional temperature measurement errors, which were presented at this paper.

The article presents new opportunities by combining different measurement techniques to obtain correct information about the temperature object's surface. The study also shows possibilities due to data integration of spatial and thermal information and benefits that can therefore be obtained.

1.1. Wprowadzenie

Straty ciepła zawsze towarzyszą wytwarzaniu i przesyłowi energii cieplnej. Można je jedynie zmniejszyć poprzez modernizację osłon termicznych oraz w wyniku obniżenia temperatury medium wewnątrz instalacji. Jest to możliwe do pewnego poziomu strat ciepła, którego dalej już nie można zmniejszyć z powodu ograniczeń technologicznych.

Straty ciepła można oszacować metodami pośrednimi, np. obliczeniowo oraz bezpośrednimi – na podstawie pomiarów. Jedną z takich metod może być termografia i termowizja. Pomiary rozkładu temperatury pozwalają na uzyskanie informacji jakościowej i ilościowej. Diagnostyka termowizyjna dokonywana jest w celu wykrycia miejsc o temperaturze powierzchni wyższej od dopuszczalnej (np. wymaganej w PN-77/M34030), a także w celu określenia stanu izolacji cieplnej lub wyznaczenia jednostkowych strat ciepła.

W wielu przedsiębiorstwach używa się kamer termowizyjnych, jednakże ich użytkownicy często nie są przeszkoleni w ich obsłudze. Niejednokrotnie prowadzi to do sytuacji, w których wykonane pomiary są mało wiarygodne, choć samo ich wykonanie nie jest skomplikowane. Ważny jest wybór miejsca, z którego wykonywany jest pomiar, oraz poprawne ustawienie parametrów kamery i późniejsza interpretacja uzyskanych wyników. Nierzadko podstawowym błędem są nieodpowiednie warunki atmosferyczne lub "nieustawienie" parametrów środowiska pomiarowego, w którym kamera pracuje.

1.2 Pomiary i obliczenia strat ciepła

Straty ciepła można wyznaczyć metodami analitycznymi oraz pomiarowymi. W metodach analitycznych straty ciepła oblicza się z wykorzystaniem znanych zależności i metod obliczeniowych zazwyczaj za pomocą odpowiednich modeli matematycznych. Wykonanie obliczeń wymaga znajomości wymiarów geometrycznych obiektów i właściwości fizycznych materiałów, z których zostały wykonane.

Straty ciepła, oprócz tego, że rosną wraz ze wzrostem temperatury izolowanego obiektu, w największej mierze zależą od oporu cieplnego R_c . Całkowity opór cieplny – na drodze od wysokotemperaturowego medium do otaczającego powietrza zewnętrznego bądź gruntu – jest sumą cząstkowych wartości oporów przewodzenia i przejmowania ciepła, np. oporu przewodzenia ciepła przez izolację rurociągu albo oporu przejmowania ciepła na powierzchni osłony izolacji.

Strumień ciepła (moc strat) do otoczenia dla pojedynczego segmentu rurociągu czy przegrody płaskiej można obliczyć z zależności (1.1)

$$Q_s = A U \cdot (T_i - T_e), \qquad (1.1.)$$

w której:

A - pole powierzchni izolowanej, m²

U - współczynnik przenikania ciepła przez i-tą przegrodę, $W/(m^2 \cdot K)$

 T_i - średnia temperatura medium, K

T_e- temperatura zewnętrznej przegrody, K

$$U = \frac{1}{R_a + \sum R_s + R_e} \tag{1.2}$$

 R_a - opór przejmowania ciepła od medium, (m²·K)/W

 $R_{\rm s}$ - opór przewodzenia w kolejnych warstwach (ścianka, izolacja, płaszcz), (m²·K)/W

 R_{e} - opór przejmowania ciepła po stronie zewnętrznej, (m²·K)/W

Największym składnikiem w całkowitym oporze jest opór przewodzenia materiału izolacji, który np. dla izolacji rurociągów dochodzi średnio do 80%. Dlatego, ograniczając straty energii, należy zwiększyć grubość izolacji rurociągów do wartości ekonomicznie uzasadnionej.

Bezwzględna strata ciepła jest ilością energii traconej w określonym czasie wskutek przenikania ciepła od medium do otoczenia.

W pomiarach można wykorzystać prawo Fouriera, zgodnie z którym przez kolejne warstwy i powierzchnie przenika (w stanie ustalonym) taka sama energia. W pomiarach (np. współczynnika przewodzenia ciepła materiału) bada się temperaturę po obu stronach warstwy (izolacji, przegrody budowlanej). Jedną wartość temperatury w przypadku rurociągów można zmierzyć metodami termograficznymi. Oprogramowanie kamer termowizyjnych pozwala także oszacować straty ciepła – po wprowadzeniu temperatury zewnętrznej i przy założeniu konwekcyjnej wymiany ciepła.

Przy użyciu dedykowanych urządzeń pomiarowych można zmierzyć chwilowy strumienia ciepła na powierzchni izolacji ciepłociągu, aż do bezpośredniego pomiaru strat ciepła sieci kanałowych, gdy dostępne są powłoki izolacji rur (rysunek 1.1).



Rys. 1.1. Pomiar strumienia ciepła przenikający przez izolację [1]

Niepewność pomiaru strat ciepła jest tym mniejsza, im większe są różnice mierzonych temperatur. Nietrudno o to w przypadku np. rurociągów parowych, nawet jeśli niepewność pomiaru temperatury sięga poziomu $U_T = 2-3$ K.

W przypadku transportu ciepła rurociągami, straty ciepła można wyznaczyć także na podstawie bezpośrednich pomiarów lub założeń projektowych, korzystając z zależności (1.3)

$$Q_{S} = \int_{t_{1}}^{t_{2}} n [c_{w} (T_{P} - T_{K}) dt], \qquad (1.3)$$

w której: Q_s – straty ciepła, J

 Σ_s straty cropia, v

 p_{II} – strumień masy medium, kg/s c_w – ciepło właściwe medium, J/(kg·K) T_p – temperatura medium na początku rurociągu, K

 T_K – temperatura medium na końcu rurociągu, K

Metoda ta pozwala na proste (co nie oznacza, że tanie w realizacji) badanie całkowitych strat na przesyle. Ma ono jednak poważną wadę, gdyż wynik obliczeń strat ciepła może być obarczony dużą niepewnością pomiaru. Powodem jest zwykle niewielka różnica temperatury (T_P - $T_K \approx 5-10$ K), gdy wykorzystuje się standardowe czujniki jej pomiaru, zwłaszcza dla jej wysokich wartości (powyżej 500°C). Niepewność pomiaru temperatury wynosi wówczas od około 1,2 K dla termorezystorów (np. Pt500 klasy A, które bardzo trudno nabyć w tej klasie) do aż 2 K dla większości termoelementów klasy 1.

Tą metodą można dokonać pomiaru zestawem składającym się z pary czujników temperatury, indywidualnie wywzorcowanych w mierzonym zakresie temperatur, oraz np. przepływomierza ultradźwiękowego z nakładanymi z zewnątrz głowicami, uzupełnionego o rejestrator mierzonych wartości.

Oszacowania strat ciepła z obiektów można dokonać także z użyciem pomiarów termowizyjnych. Taką możliwość oferują niektóre kamery termowizyjne w odniesieniu do przegród budowlanych. Przy dokonywaniu pomiarów wewnątrz pomieszczeń i wprowadzeniu temperatury powietrza wewnętrznego, na zaznaczonym obszarze szacowane są jednostkowe straty ciepła w W/m². Aby określić rzeczywiste straty ciepła z całej powierzchni przegrody, powinno się ją podzielić na powierzchnie izotermiczne i dla każdej z nich, znając pole ich powierzchni A_k , mierząc temperaturę średnią powierzchni przegrody T_{sk} i przyjmując (np. z PN-EN ISO 6946) współczynnik przejmowania ciepła na wewnętrznej powierzchni przegrody h_{int} , obliczyć straty P (moc strat w W) z zależności (2.4) [2].

$$P = h_{\rm int} \sum_{k=1}^{N} A_k (T_{\rm int} - T_{sk})$$
(1.4)

Można też wyznaczyć dla każdej z powierzchni A_k współczynnik przenikania ciepła U_k , mierząc dodatkowo temperaturę powietrza na zewnątrz budynku T_{ext} , i korzystając z poniższej zależności (1.5).

$$U_{k} = \frac{h_{\text{int}}(T_{\text{int}} - T_{sk})}{T_{\text{int}} - T_{ext}}$$
(1.5)

1.3. Błędy pomiaru temperatury kamera termowizyjna

Pomiędzy kamerą termowizyjną a mierzonym obiektem występują czynniki zakłócające, którymi są powietrze, a także znajdująca się w nim para wodna i zanieczyszczenia. Aby je skompensować, przed pomiarem należy wprowadzić współczynnik tłumienia atmosfery wraz z odległością oraz wilgotność względną i temperaturę powietrza. W praktyce, w przypadku odległości nieprzekraczających 10 m, można pominąć uwzględnienie oddziaływania atmosfery.

Niezwykle istotnym parametrem, który także należy wprowadzić, jest temperatura obiektów otaczających ten badany teren. Uwzględnia się, niestety, tylko jedną wartość, a jej wybór znacząco wpływa na uzyskany pomiar. Poniżej dowiedziono, że dla niemal wszystkich rzeczywistych obiektów w mierzonym promieniowaniu występuje część promieniowania odbitego, gdyż wszystkie ciała mają współczynnik emisyjności mniejszy od jedności. Także w przypadku obiektów o wysokich wartościach współczynnika (np. $\varepsilon = 0,95$), gdy następuje odbicie obiektu o wysokiej temperaturze (np. ekran kotła) lub niskiej (niebo w bezchmurny dzień), wystąpi zafałszowanie wyniku, o ile nie wprowadzi się właściwej temperatury.

Problem jest większy, niż mogliby oczekiwać początkujący użytkownicy kamer termowizyjnych. Kierują je najczęściej tylko na interesujący ich obiekt, zwykle też z jednego punktu obserwacyjnego, co może stwarzać problemy z odbiciami. O ile to możliwe, powinno się wykonać kilka pomiarów z różnych punktów obserwacji, przy zachowaniu zasady związanej z kątem obserwacji (nie większym od 30°C). Należy również skierować kamerę na te obiekty, które będą się "odbijać" w termogramach, aby zmierzyć ich temperaturę.

Inne popełniane błędy to nieprawidłowa wartość współczynnika emisyjności (przyjęcie $\varepsilon = 1$). Zazwyczaj globalnie wprowadza się jedną wartość dotyczącą obiektu, którego temperaturę się mierzy. Współczynnik emisyjności powinien być każdorazowo wprowadzony w kamerze, o ile nie będzie możliwa późniejsza jego edycja. Jest to konieczna informacja wpływająca bezpośrednio na uzyskanie wiarygodnych danych pomiarowych [3].

Metoda praktyczna, która pozwala poprawnie oszacować emisyjność obiektu, wymaga zastosowania stykowego pomiaru temperatury obiektu. W termogramie tak należy zmieniać wartość emisyjności, aby wskazana temperatura była taka sama, jak z metody stykowej. Znane są też inne metody, polegające na wykorzystaniu lub stworzeniu obszaru zachowującego się jak ciało czarne. Mogą to być odpowiednio głębokie otwory [4]. Dopuszcza się też pokrycie obiektu – miejscowo – czarną matową farbą lub lakierem ($\varepsilon \approx 1$). Korygując współczynnik emisyjności, należy otrzymać temperaturę taką, jak w obszarze zbliżonym do ciała czarnego. Oczywiście, najpierw należy dokonać odczytu w tym punkcie, wprowadzając $\varepsilon = 1$. Oprogramowanie niektórych kamer pozwala lokalnie definiować obszary o różnych współczynnikach emisyjności, co w znaczącym stopniu ułatwia analizę termogramów. Jest to istotne zwłaszcza wtedy, gdy należy dokonać pomiarów temperatury obszarów o różnych współczynnikach emisyjności (rysunek 1.2).



Rys. 1.2. Termogram i histogramy rurociągów o różnych współczynnikach emisyjności płaszczy

Oprócz omawianych wyżej kwestii (termiczne odbicie obiektów), istotny jest jeszcze jeden problem związany z pomiarem termowizyjnym. Dla kątów obserwacji większych od 30°C ciała rzeczywiste nie spełniają w sposób ścisły prawa Lamberta odnoszącego się do ciał doskonale czarnych. Zgodnie ze wspomnianym prawem, natężenie promieniowania powierzchni widzianej pod kątem jest niezależne od tego kąta. Nawet dla materiałów o współczynniku emisyjności zbliżonym do jedności (0,98-0,99), zbyt duży kąt obserwacji powoduje pozorne zmniejszenie współczynnika emisyjności o 0,1, co wywołuje zaniżenie wyniku pomiaru temperatury z np. 40°C do 39°C. Dla powierzchni o mniejszym współczynniku emisyjności (np. 0,9) zaniżenie temperatury wyniesie już 2,4 K [5]. Efekt ten jest widoczny szczególnie w przypadku rurociągów o małej średnicy. Na termogramie i profilu temperatury zaprezentowanych na rysunku 1.3 obiekt miał na całej powierzchni jednakową temperaturę (43°C). Temperatura otoczenia była jednorodna i wynosiła 20°C.



Rys. 1.3. Rurociąg testowy, jego termogram i profil temperatury

1.4. Pomiar termowizyjny stanu izolacji

Stan izolacji cieplnej określany jest najczęściej jednostkowymi stratami ciepła z powierzchni izolacji, na podstawie których można zwykle wytypować zakres i kolejność prac remontowych czy termomodernizacyjnych. Także w przypadku nowo wykonanej izolacji prowadzi się badania termowizyjne dla sprawdzenia wartości strat ciepła i porównania ich z wartościami założonymi.

Oszacowania strat ciepła dokonuje się najczęściej na podstawie histogramów rozkładów temperatury wzdłuż reprezentatywnych odcinków na zarejestrowanych termogramach. Oprogramowanie do analizy termogramów dla większości kamer termowizyjnych pozwala także wyznaczać parametry statystyczne obszarów zamkniętych.

Podczas badań termowizyjnych rurociągów zaleca się przeprowadzanie pomiarów górnej części płaszcza, gdyż pokryta jest ona zanieczyszczeniami; jest też zwykle mocniej utleniona niż dolna. Z tego powodu współczynnik emisyjności jest większy, co potencjalnie zmniejsza błąd pomiaru, gdy otoczenie silnie wpływa na wynik pomiaru temperatury. Jednak w przestrzeni otwartej występuje często problem związany z odbiciem nieba [6] czy też – dodatkowo – z nagrzewaniem osłony promieniowaniem słonecznym.

Na wszystkich trzech histogramach (rysunek 1.4) przedstawiających rozkład temperatury w przekroju poprzecznym rurociągu widać wyraźnie niższą temperaturę górnej części płaszcza, dochodzącą do -40°C, spowodowaną odbiciem nieba o temperaturze -70°C. Z kolei rysunek 2.5 prezentuje termogram rurociągu o wysokim współczynniku odbicia. Z lewej strony podpory, na histogramie Li2, widać, że w obszarze cienia występuje o ponad 20°C niższa temperatura niż w pozostałych dwóch przekrojach, co jest spowodowane nagrzaniem osłony termicznej przez promieniowanie słoneczne. Średnia temperatura nasłonecznionych fragmentów płaszczy rurociągów jest o około 6°C wyższa.

Problem odbicia, zarówno obiektów o wyższej, jak i o niższej temperaturze, występuje także w przypadku przestrzeni zamkniętych [7].



Rys. 1.4. Zdjęcie, termogram i histogramy temperatury rurociągu o niskim współczynniku emisyjności płaszcza podczas słonecznego dnia



Rys. 1.5. Zdjęcie, termogram i histogramy temperatury rurociągu o wysokim współczynniku emisyjności płaszcza podczas słonecznego, zimowego dnia

Termogramy i histogramy, zarówno dla obiektów o stosunkowo niskim współczynniku emisyjności ($\varepsilon = 0,5$; rysunek 1.6), jak i dla wyższego współczynnika emisyjności ($\varepsilon = 0,7$; rysunek 1.7), dowodzą, że nieuwzględnienie odbicia prowadzić będzie do zawyżenia lub do zaniżenia wyników pomiarów temperatury. W obu przypadkach temperatura płaszcza wynosi około 50°C, a jak widać na histogramach, lokalnie występują kilkudziesięciostopniowe różnice.



Rys. 1.6. Efekt odbicia termicznego elementów armatury o wysokiej temperaturze w osłonie izolacji rurociągów parowych



Rys. 1.7. Odbicie elementów wysokotemperaturowych (z lewej strony) oraz konstrukcji hali (z prawej strony) w osłonie termicznej na termogramie

Nieuwzględnienie odbicia otoczenia podczas pomiarów prowadzić może do dużo większych błędów niż podawana przez producentów kamer termowizyjnych podstawowa niepewność pomiaru temperatury, zwykle wynosząca co najmniej 2 K. W takich przypadkach nie tylko diagnostyka stanu izolacji, ale tym bardziej próba wyznaczenia strat ciepła będzie wręcz niemożliwa.

1.5. Korekta pomiaru termowizyjnego w oparciu o trójwymiarowy model obiektu

Rozwijając zasygnalizowany już problem pozornej zmiany współczynnika emisyjności dla większych kątów obserwacji, podjęto próbę jego częściowego skompensowania dla obiektów typu walec. Charakterystyczne jest stopniowe obniżanie temperatury, lepiej widoczne na profilach temperaturowych. Rysunek 1.8 przedstawia uśrednione profile, na których obserwuje się stopniowe obniżanie temperatury wraz ze wzrostem odległości od osi obiektu, oraz wyznaczone pozorne zmiany współczynnika emisyjności ε w funkcji kąta obserwacji.



Rys. 1.8. Zmiany profili temperatury otrzymane z termogramu oraz wyznaczona pozorna zmiana współczynnika emisyjności w funkcji kąta obserwacji

W artykule pt. *Korekta pomiaru termowizyjnego w oparciu o trójwymiarowy model obiektu* [5] zaproponowano aproksymację opisującą pozorną zmianę współczynnika emisyjności i, opierając się na prawie Stefana-Boltzmana, dokonano korekty pomiaru. Efekt korekty zaprezentowano na rysunku 1.9. Dla badanego materiału o różnych barwach uzyskano różnice – pomiędzy wartością rzeczywistą a zmierzoną – mniejsze niż 0,6 K (dla kątów obserwacji dochodzących do 85-90°C).



Rys. 1.9. Profil temperatury powierzchni walca otrzymany z termogramu i skorygowany

Uzyskane wyniki były impulsem do rozpoczęcia prac nad praktycznym wykorzystaniem możliwości korygowania pomiarów termowizyjnych przez łączenie pomiaru termowizyjnego z chmurą punktów ze skanera 3D.

Do pomiarów geometrii został wykorzystany skaner laserowy Trimble FX, który wykonuje pomiary odległości metodą przesunięcia fazowego. Pomiaru rozkładu temperatury na powierzchni badanych obiektów dokonano kamerą VarioCAM Head z teleobiektywem, który pozwala – w połączeniu z obrotnicą dwuosiową – na szesnastokrotne zwiększenie rozdzielczości termogramu [8]. Metodą tą uzyskano termogramy lepszej jakości niż metodami rekonstrukcji obrazów wysokiej rozdzielczości z obrazów niskorozdzielczych [9].

Proces nadawania chromatyki punktom w oparciu o mapy rastrowe (termogramy) wymaga ich orientacji. Odbywa się to przez wskazanie tych samych punktów lub linii charakterystycznych na skanie oraz na termogramie, a także przez określenie parametrów optycznych aparatu (ogniskowa, kąty widzenia, rozdzielczość, współczynniki korekcyjne). Na ich podstawie ustalana jest orientacja mapy względem obiektu i kamery. Rysunek 2.10 przedstawia ideę tego procesu, a rysunek 2.11 – chmurę punktów przetworzoną na siatkę trójkątną z "nałożonym" termogramem elementu armatury.



Rys. 1.10. Idea nadawania chromatyki punktom



Rys. 1.11. Chmura punktów z nałożoną chromatyką z termogramu

Przykładową realizację przedstawionej idei prezentują kolejne rysunki ukazujące piec obrotowy w cementowni [10]. Pomiar temperatury odbywał się kamerą termowizyjną zamontowaną na obrotnicy. Ze względu na rozmiary pieca i ograniczoną wolną przestrzeń wokół niego, nie było możliwe uchwycenie

pieca na pojedynczym termogramie nawet z użyciem obiektywu szerokokątnego. Po wykonaniu kilku serii pomiarów termogramy połączono w całość (rysunek 1.12).



Rys. 1.12. Połączony termogram po wykonaniu poziomej serii pomiarów (widok od przodu)

Dzięki integracji termowizji i skaningu (rysunek 1.13) możliwe jest dokładne wskazanie miejsc, w których płaszcz ma zróżnicowaną temperaturę odzwierciedlającą także właściwości termiczne, w tym izolacyjne (rysunek 1.14).



Rys. 1.13. Geometria pieca obrotowego cementowni uzyskana na podstawie skanowania



Rys. 1.14. Skan 3D z nałożonym termogramem

Kolejne etapy prac zakładają połączenie obu zaprezentowanych typów badań. Pozwalają one korygować termogramy z uwzględnieniem otoczenia o zróżnicowanych temperaturach. Ma to szczególne znaczenie dla obiektów o prostych kształtach, jak prostopadłościan, walec i kula. Korzystając z metod stosowanych w renderingu, można także uwzględnić wzajemną wymianę energii pomiędzy powierzchniami o różnej temperaturze oraz korygowanie termogramów obiektów o złożonych kształtach.

1.6. Podsumowanie

Wykonanie badania termograficznego nie jest tylko i wyłącznie wykonaniem zdjęć z użyciem kamery termowizyjnej. Uzyskanie poprawnych wyników, pozwalających na ocenę ilościową, wymaga wiedzy na temat fizycznych podstaw wykorzystywanej techniki, na podstawie których można skorygować uzyskane pomiary bezpośrednie. Pomaga w tym oprogramowanie narzędziowe, dostarczane przez producenta kamery – dzięki niemu można uwzględnić wpływ otoczenia na uzyskane wyniki.

Termogramy oglądane na wyświetlaczach kamery służyć mogą do oceny jakościowej, jednak nie w każdym przypadku. Gdy konieczne jest oszacowanie strat energii czy współczynników przenikania ciepła, należy uwzględnić wiele dodatkowych czynników, które trzeba zmierzyć podczas wykonywania pomiarów (temperatura i wilgotność powietrza, temperatura otaczających obiektów, występowanie odbić etc.).

Wyznaczenie współczynnika emisyjności to jedno z podstawowych zadań, od którego zależy wynik pomiarów. Obiekty, dla których nie można optymalnie ustawić kamery, sprawiają dodatkowy problem – pozornej zmiany współczynnika emisyjności obiektu. W niniejszym rozdziale zaproponowano metodę, która może przyczynić się do poprawy dokładności pomiaru temperatury metodą termowizyjną.

LITERATURA

- [1] O. Niemyjski, *Straty ciepła w sieciach ciepłowniczych*, "Inżynier Budownictwa", dodatek specjalny *Ciepłownictwo i ogrzewnictwo*, 09/2013, s. 63-66.
- [2] T. Kisilewicz, A. Wróbel., A. Wróbel, *Inwentaryzacja rzeczywistych strat ciepła przez przegrody budynków z wykorzystaniem termografii*, "Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji", vol. 18, 2008, s. 231-240.
- [3] *Pomiary termowizyjne w praktyce*, pod red. H. Madury, "Pomiary Automatyka Kontrola", Warszawa 2004.
- [4] M. Rojek, *Metodologia badań diagnostycznych warstwowych materiałów kompozytowych o osnowie polimerowej*, vol. 2, Open Access Library, 2011.
- [5] S. Zator, M. Ryszczyk, *Korekta pomiaru termowizyjnego w oparciu o trójwymiarowy model obiektu*, "Przegląd Elektrotechniczny" 12/2008, s. 325-325.
- [6] T. Karwat, *Wpływ parametrów obserwacyjnych kamery termowizyjnej na uzyskane wyniki badań*, "Izolacje" 5/2009, s. 32-33.
- [7] T. Kruczek, A. Fic, *Wpływ radiacyjnej wymiany ciepła na rozkład temperatury na powierzchni płaszcza napowietrznego rurociągu ciepłowniczego w warunkach niskiej temperatury nieboskłonu,* "Modelowanie Inżynierskie" 6/2012, t. 12, z. 43, s. 121-130.
- [8] S. Zator, M. Lasar, *Uzyskiwanie termogramów wysokiej rozdzielczości*, "Pomiary Automatyka Kontrola" 12/2011, s. 1480-1482.
- [9] M., S. Alam, J. G. Bognar, R. C. Hardie, B. J. Yasuda, Infrared Image Registration and High-Resolution Reconstruction Using Multiple Translationally Shifted Aliased Video Frames, "IEEE Transactions on Magnetic", 2002, vol. 49, p. 915 – 923.