

Magdalena Prochalska
Andrzej Wróbel

OPRACOWANIE ROZWINIĘCIA OBRAZÓW TERMOGRAFICZNYCH KOMINA PRZEMYSŁOWEGO ¹⁾

Streszczenie. Wskazane jest, aby opracowanie termograficzne przedstawiało rozkład temperatury na obserwowanej powierzchni bez widocznych zniekształceń zarówno wartości temperatury, jak też geometrii jej rozkładu. Obraz powierzchni walcowej lub stożkowej można przedstawić bez zniekształceń geometrycznych, jedynie na jego rozwinięciu.

Do wykonania rozwinięcia wykorzystuje się punkty kontrolne. Potrzebna jest znajomość ich położenia na termogramie oraz na powierzchni rozwiniętej. Problem polega na tym, iż sygnalizacja fotopunktów termalnych jest bardzo utrudniona, natomiast termogram z reguły nie posiada zbyt wielu wyraźnych szczegółów, które można by wykorzystać jako punkty kontrolne. Rozkład temperatury na powierzchni obiektu charakteryzuje się bowiem tym, że nie ma ostrych granic zmiany temperatury, a obiekty typu komin najczęściej mają w miarę jednorodną powierzchnię o nie zmieniającej się nagle temperaturze.

W czasie prac doświadczalnych wypracowano metodę wyznaczenia fotopunktów oraz sprawdzono różne metody przetwarzania obrazu termograficznego w celu otrzymania jego rozwinięcia.

1. Wstęp

Widzialny obraz rozkładu temperatury na obserwowanej powierzchni - termogram - powstaje na drodze optoelektronicznej. Odpowiada on obrazowi w rzucie środkowym zwizualizowanym w barwach umownych. Zawiera informacje o temperaturze powierzchni obiektu jak też o geometrii jej rozkładu.

Ponieważ termogram tworzony jest jako rzut środkowy, obrazy obiektów są zniekształcone w stosunku do rzutu ortogonalnego lub rozwinięcia powierzchni tych obiektów [Wróbel A. 2001].

1) Praca została wykonana w ramach badań statutowych AGH

2. Sposób przedstawienia wyników opracowań termograficznych kominów

przemysłowych.

Najprostszym rozwiązaniem jest zaprezentowanie zbioru termogramów uzupełnionych o skalę barwną przedstawiającą przyporządkowanie wartości temperatury poszczególnym kolorom. Może to być praktykowane jedynie w takim przypadku, gdy opracowanie termograficzne obejmuje mały fragment obiektu, który został zobrazowany na jednym lub tylko kilku termogramach. W sytuacji, gdy opracowanie ma dotyczyć całości obiektu, korzystanie z takiego zbioru termogramów będzie niewygodne.

Często wykonuje się montaż termogramów wykonanych z jednego stanowiska, tak, aby uzyskać jeden obraz termalny obiektu, obserwowanego z tego stanowiska. Warunkiem podstawowym jest oczywiście wykorzystanie do montażu termogramów opracowanych w jednolitej barwnej skali temperatur. Montowane termogramy muszą być poddane przekształceniom geometrycznym obrazu (kadrowanie, zmiana skali, obrót, zmiana zniekształcenia perspektywicznego) aby utworzyć jednolity obraz. Należy pamiętać, że tak uzyskany fotoszkieł będzie w przybliżeniu obrazem perspektywicznym, a nie rzutem ortogonalnym lub rozwinięciem powierzchni obiektu. Interpretacja obrazu termograficznego będzie łatwiejsza, gdy zmontowane w ten sposób termogramy uzupełnimy zdjęciami fotograficznymi wykonanymi z tego samego stanowiska.

Najkorzystniej jest, jeżeli opracowanie termograficzne przedstawia rozkład temperatury na obserwowanej powierzchni bez widocznych zniekształceń zarówno wartości temperatury, jak też geometrii jej rozkładu.

Obraz rozkładu temperatury powierzchni walcowej lub stożkowej można przedstawić bez zniekształceń geometrycznych, jedynie na rozwinięciu tych powierzchni. Uzyskanie rozwinięcia wymaga przetworzenia obrazu, ponieważ termogram jest rzutem środkowym.

3. Wykonanie rozwinięcia obrazu termograficznego

Rozwinięcie polega na przekształceniu obrazu w rzucie środkowym na obraz w rzucie normalnym do powierzchni obiektu. Dla obiektów walcowych i stożkowych nie jest to zagadnienie skomplikowane, wymaga jednak pewnego nakładu pracy. W ramach badań statutowych poszukiwano optymalnej metody wykonania rozwinięcia obrazu termograficznego. Dużą część tych badań przeprowadzono w ramach pracy dyplomowej [Prochalska M. 2002].

Rozwinięcie obrazu można wykonać w sposób uproszczony lub też ścisły. Do wykonania opracowania powierzchni walcowej, w sposób uproszczony, wystarczy dobry program graficzny. Polega ono na podzieleniu obrazu tej powierzchni na paski równoległe do tworzącej i odpowiedniej zmiany skali każdego z nich, w kierunku prostopadłym do tworzącej. Wielkość korekcji skali obrazu można wyznaczyć na podstawie znajomości odległości od stanowiska kamery do powierzchni obiektu walcowego, średnicy walca oraz wysokości przetwarzanego fragmentu w stosunku do podstawy obiektu. Przed zmontowaniem przeskalowanych pasków należy jeszcze usunąć na nich zniekształcenie wynikające z rzutu środkowego, a powodujące

zakrzywienie linii przebiegających po obwodzie walca oraz zbieżność linii równoległych do siebie na obiekcie. Przybliżona korekcja błędów geometrycznych jest działaniem pracochłonnym, a uzyskany efekt tylko w przybliżeniu odpowiada opracowaniu ścisłemu. Wykonanie rozwinięcia powierzchni stożkowej w sposób uproszczony jest również możliwe, ale bardziej pracochłonne w porównaniu do powierzchni walcowej.

Do wykonania rozwinięcia w sposób ścisły potrzebne jest specjalistyczne oprogramowanie, ale wykonanie opracowania jest stosunkowo łatwe i szybkie.

3.1. Przetwarzanie metodą ścisłą

Pierwszym etapem procedury przetwarzania jest powiązanie układu obrazów termograficznych z układem obiektu. Dokonać tego można za pomocą zidentyfikowanych na termogramach fotopunktów o znanych współrzędnych w układzie obiektu.

3.1.1. Powiązanie układu termogramu z układem obiektu

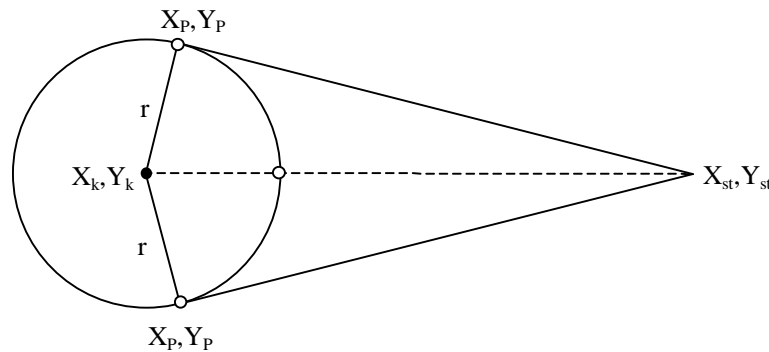
W opracowaniach termograficznych sygnalizacja fotopunktów na rejestrowanym obiekcie jest bardzo utrudniona. Punkty dostosowania powinny się bowiem wyróżniać termicznie od sąsiadującej z nimi powierzchni. Wprowadzenie takiej sygnalizacji, oprócz konieczności pokonania nieraz dużych trudności technicznych, jest kosztownym przedsięwzięciem. Umieszczenie punktów kontrolnych na powierzchni wysokich obiektów (np. komin) wiązałoby się np. z zatrudnieniem ekipy alpinistycznej.

Dla zdjęć fotogrametrycznych często jako fotopunkty przyjmuje się naturalne, łatwe do jednoznacznej identyfikacji szczegóły obiektu. W przypadku obrazów termalnych postępowanie takie jest przeważnie utrudnione lub wręcz niemożliwe. Wynika to z faktu, iż charakterystyczne miejsca znajdujące się na powierzchni rejestrowanego obiektu z reguły nie są widoczne na termogramie, ponieważ odzwierciedla on jedynie rozkład temperatury, a nie obraz w zakresie promieniowania widzialnego. Poza tym rozkład temperatury jest najczęściej płynny bez ostrych kontrastów, co dodatkowo utrudnia dokładną identyfikację punktów charakterystycznych.

W przeprowadzonym eksperymencie przyjęto sztucznie wyznaczone punkty dostosowania. Analiza termogramów wykazała, że jedynymi możliwymi do jednoznacznej identyfikacji są miejsca przecięcia wyróżniających się termalnie linii złączeń elementów konstrukcyjnych z tworzącymi komina położonymi na skrajach obrazu komina. Znaczna różnica temperatury pomiędzy powierzchnią komina, a jego otoczeniem powodowała, iż zarejestrowany na termogramie obiekt wyraźnie odcinał się od tła. Tak zdefiniowanych punktów nie można jednak było zidentyfikować na powierzchni komina. Należało w sposób analityczny wyznaczyć ich położenie na obiekcie.

Na mapie obiektu zidentyfikowano położenie stanowisk kamery termograficznej, co umożliwiło określenie ich współrzędnych. Na podstawie

dokumentacji projektowej wyznaczono wysokości widocznych na termogramach linii złączeń, średnice komina na poszczególnych wysokościach, oraz współrzędne osi komina. Dane te pozwoliły na obliczenie terenowych współrzędnych punktów dostosowania.



Rys 1. Zasada wyznaczenia terenowych współrzędnych punktów dostosowania

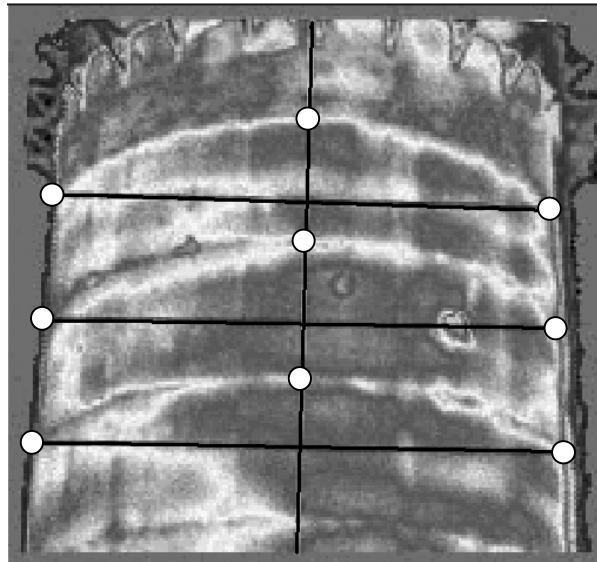
Dla zwiększenia ilości punktów dostosowania przyjęto postanowiono dodatkowo wykorzystać miejsca przecięcia obrazu elementów konstrukcyjnych z tworzącymi znajdującymi się w osi komina. (rys. 2). Oś komina na obrazie termograficznym wyznaczono jako środek geometryczny odcinka łączącego skrajne punkty dostosowania, położone na tym samym poziomie komina. Gdyby obraz termograficzny był tak wykonany, iż oś komina nie mogłaby być reprezentowana przez środek odcinka, należałoby uwzględnić poprawkę perspektywiczną. Konieczność taka występuje jednak dość rzadko, ponieważ do opracowań termograficznych kominów stosuje się długoogniskowe obiektywy kamer, a rozdzielczość obrazów termograficznych, a zatem i dokładność pomiaru na nich nie jest zbyt wysoka.

Na podstawie wybranych punktów dostosowania wyznaczano parametry funkcji DLT opisującej powiązanie układu obrazu termograficznego z układem współrzędnych obiektu.

$$x = \frac{AX + BY + CZ + D}{EX + FY + GZ + I} \quad (1)$$

$$y = \frac{HX + IY + JZ + K}{EX + FY + GZ + I}$$

Do wyznaczenia współczynników funkcji DLT przeważnie wykorzystywano dziewięć punktów na termogram. Średnie błędy wpasowania fotopunktów wynosiły na poszczególnych termogramach od 0.2 piksela do 1.0 piksela, w zależności od tego z jaką dokładnością, na obrazie termalnym powierzchni komina, można było identyfikować szczegóły.

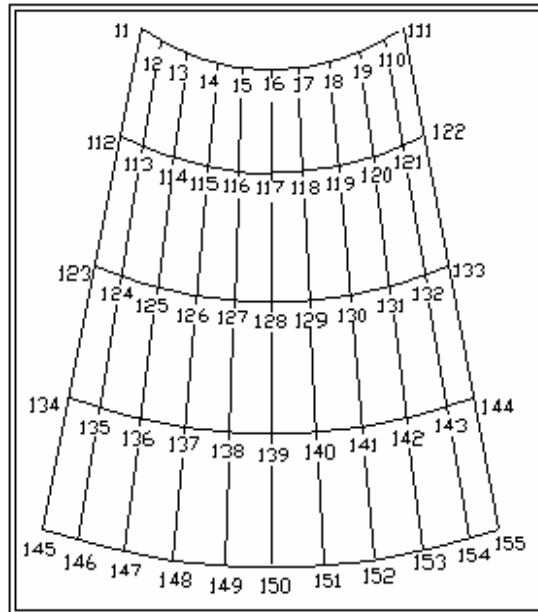


Rys. 2. Przykład wyboru punktów dostosowania na termogramie

3.1.2. Wyznaczenie punktów opisujących kształt powierzchni komina

Jak już wspomniano przetwarzanie obrazu, w celu otrzymania jego rozwinięcia, można wykonać wykorzystując funkcje wielomianowe lub metodę elementów skończonych. W obydwu przypadkach potrzebny jest zbiór punktów o znanych współrzędnych obrazowych i współrzędnych na rozwinięciu – opisujący kształt obiektu. Przy funkcjach wielomianowych punkty te służą do wyznaczenia ich parametrów, natomiast w metodzie elementów skończonych są to wierzchołki trójkątów elementarnych. Przy opracowywaniu zdjęć fotogrametrycznych, punkty opisujące kształt obiektu, często uzyskuje się przez ich pomiar na stereogramie zdjęć. Punkty te wyznaczyć można również poprzez wykorzystanie numerycznego modelu powierzchni.

Opracowanie na podstawie zdjęć fotogrametrycznych umożliwiłoby dokładne odwzorowanie kształtu płaszcza komina. Trzeba jednak sobie zdać sprawę, że obrazy termograficzne nie cechują się bardzo wysoką rozdzielczością, a i sam rozkład temperatury na kominie zmienia się w sposób płynny. Ponieważ wykonywanie zdjęć fotogrametrycznych powodowałoby znaczne przedłużenie czasu prac terenowych i podniesienie kosztów opracowania jego stosowanie nie jest opłacalne. Do opracowania pomiarów termograficznych wystarczy zatem wykorzystanie numerycznego modelu powierzchni komina opracowanego na podstawie dokumentacji projektowej.



Rys. 3. Przykład rozmieszczenia punktów opisujących stożkową powierzchnię komina

W przeprowadzanych badaniach wykorzystano dokumentację projektową komina. Opisane w niej parametry kształtu powierzchni pozwoliły na wyznaczenie współrzędnych (w układzie obiektu) punktów opisujących kształt powierzchni. Punkty te utworzyły na przetwarzanym fragmencie komina regularną siatkę (rys. 3).

Następnie obliczono współrzędne tych punktów na rozwinięciu powierzchni. Ponieważ komin był stożkiem ściętym rozwinięcie wykonywano na fragment powierzchni stożkowej.

Kolejnym etapem było wyznaczenie współrzędnych punktów w układzie termogramu. Wykorzystano do tego wyznaczone wcześniej współczynniki funkcji DLT.

3.2. Wykonanie przetwarzania

Przetwarzanie wykonano za pomocą programu Iras C firmy Intergraph. Wykonano rozwinięcie fragmentu powierzchni komina w postaci pasa o wysokości 10 m wokół całego obwodu. W obrazie wynikowym przyjęto wielkość piksela 10x10 cm, co było wartością podobną do rozdzielczości terenowej obrazów termograficznych.

Przeprowadzono próby w celu określenia optymalnej metody przetwarzania. W programie Iras C zaproponowano wiele metod transformacji położenia pikseli obrazu. Do wykonania rozwinięcia obrazu powierzchni walcowej lub stożkowej można spośród nich wykorzystać transformację wielomianową lub metodą elementów skończonych. Metoda elementów skończonych wymaga, aby punkty

opisujące powierzchnię obiektu były bardzo gęsto rozmieszczone. Dzielą one bowiem obraz na trójkąty traktowane jako fragmenty płaszczyzny. W opisywanej technologii położenie tych punktów wyznaczane jest na drodze analitycznej, tak więc ich duża ilość nie stanowi większego problemu.

Transformacja za pomocą funkcji wielomianowej wymaga znacznie mniejszej ilości punktów. Na drodze doświadczalnej poszukiwano który stopień wielomianu daje zadowalającą dokładność przetworzenia. Przeanalizowano dokładność rozwinięcia dla pięciu stereogramów. Otrzymane przeciętne błędy średnie wpasowania obrazu w punkty na rozwinięciu przedstawiono w tabeli 1

Tabela 1.

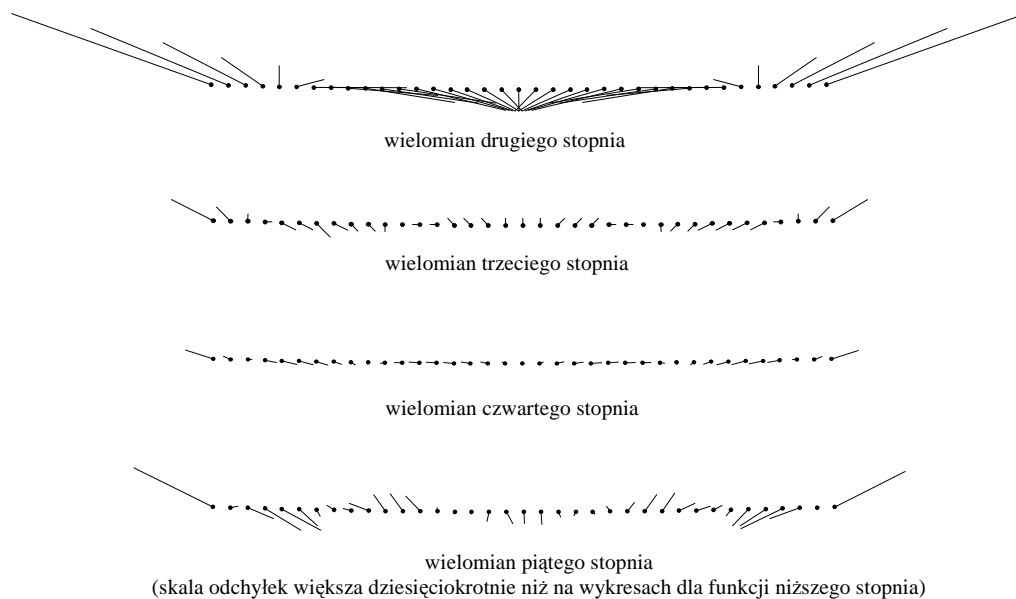
stopień wielomianu	przeciętny błąd średni wpasowania [piksel]
drugi	1.4
trzeci	0.24
czwarty	0.12
piąty	0.04

Na rysunku 4 przedstawiono rozkład odchyłek wpasowania obrazu wzdłuż jednej linii obwodu komina jednego z termogramów. Rozkład odchyłek dla innych linii i innych termogramów ma podobny charakter.

Analiza odchyłek na poszczególnych punktach wykazała, że transformacja obrazu z wykorzystaniem funkcji wielomianowej obarczona jest błędami systematycznymi (rys. 4). Należy jednak na wielkość odchyłek popatrzeć uwzględniając rozdzielczość obrazu termograficznego oraz dokładność identyfikacji poszczególnych szczegółów. Jak już wspomniano rozkład temperatury na obiekcie jest ciągły, co powoduje, że dokładność identyfikacji szczegółów jest stosunkowo niska. Badania przeprowadzone [Wróbel A. 2000] na teście o specjalnie sygnalizowanych termalnie punktach wykazały, że dokładność ich identyfikacji na obrazie wynosiła od 0.25 do 0.5 piksela. Niesygnalizowane szczegóły można zatem zidentyfikować z dokładnością mniejszą, według naszej oceny wynoszącą od 0.5 do 1.0 piksela. Biorąc pod uwagę średni błąd wpasowania i rozkłady odchyłek można stwierdzić, że wykonywanie transformacji za pomocą funkcji drugiego stopnia jest za mało dokładne. Dla obrazów termograficznych wystarczy w zasadzie funkcja trzeciego lub czwartego stopnia. Funkcja piątego stopnia mimo śladowych błędów systematycznych daje tak dużą dokładność, że może być wykorzystywana do rozwijania nie tylko termograficznych, ale i fotogrametrycznych obrazów powierzchni walcowych i stożkowych.

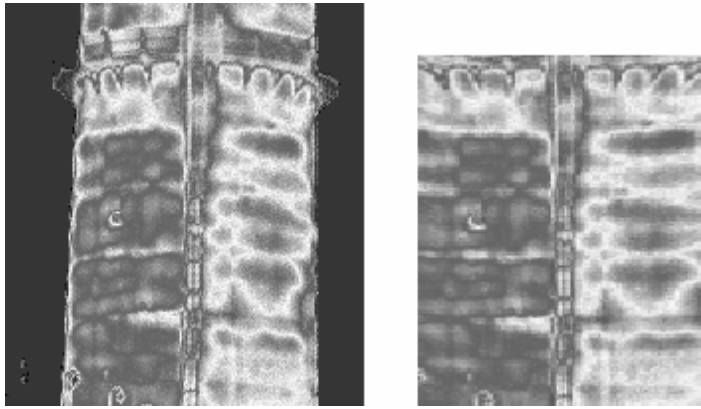
Skrajne części obrazu termograficznego posiadają zniekształcenia radiometryczne wynikające z prawa Lamberta. Z badań doświadczalnych [Szwajca J. 2001] wynika, że po około 10% obrazu na skrajach jest obarczone istotnymi błędami i nie może być wykorzystane do opracowania. W związku z tym termogramy komina wykonuje się z co najmniej czterech stanowisk rozmieszczonych symetrycznie wokół obiektu. Warto zwrócić uwagę, że największe odchyłki wpasowania występują

również na skrajach obrazu. Odrzucenie skrajnych fragmentów obrazu zmniejsza zatem także błędy wpasowania przy przetwarzaniu obrazu.

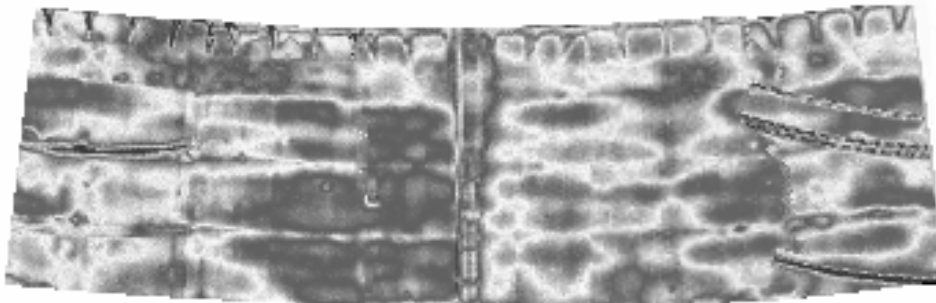


Rys. 4. Rozkład odchyłek wpasowania obrazu wzdłuż jednej linii obwodu komina jednego z termogramów – skala odchyłek dla funkcji od drugiego do czwartego stopnia jest dziesięć razy większa od skali rozmieszczenia punktów, a dla funkcji piątego stopnia sto razy.

Rozwinięcie obrazów termograficznych komina wykonano ostatecznie za pomocą transformacji funkcją wielomianową trzeciego stopnia, oraz metodą elementów skończonych. Otrzymany dwoma metodami obraz praktycznie nie różnił się między sobą. Na rys. 5 przedstawiono termogram i jego rozwinięcie, natomiast na rys. 6 zamontowane rozwinięcie fragmentu powierzchni komina wzdłuż całego jego obwodu.



Rys. 5. Termogram (z lewej strony) i jego rozwinięcie na powierzchnię stożkową funkcją wielomianową trzeciego stopnia



Rys. 6. Mozaika rozwinięć obrazów termograficznych fragmentu kominia

5. Podsumowanie

Przy opracowaniach termograficznych kominów sygnalizacja fotopunktów termalnych jest nieopłacalna, a wykorzystanie zamiast nich szczegółów na powierzchni obiektu najczęściej niemożliwe. Dlatego autorzy proponują zastosowanie jako punkty dostosowania szczegółów obrazu termalnego nieistniejących fizycznie na obiekcie i obliczanie ich położenia w przestrzeni na podstawie związków geometrycznych.

Ze względu na niską rozdzielczość obrazów termalnych, oraz „rozmycie” rozkładu temperatury na kominie pożądane dokładności opracowań termograficznych są niższe niż klasycznych prac fotogrametrycznych. W związku z tym model numeryczny obiektu wystarczy oprzeć na dokumentacji projektowej zazwyczaj nie opisującej idealnie faktycznego kształtu obiektu. Analiza metod przetwarzania

stosowanych do wykonywania rozwinięcia wykazała, że oprócz metody elementów skończonych do rozwinięć obrazów termograficznych można zastosować transformację opartą na funkcji wielomianowej trzeciego i wyższych stopni.

6. Literatura:

1. Prochalska M. „Opracowanie rozwinięcia termogramów na powierzchniach walcowych i stożkowych” . Praca dyplomowa, AGH, Kraków 2002
2. Sz wajca Joanna „Opracowanie termogramów obiektów walcowych. Praca dyplomowa AGH Kraków 2001
3. Wróbel Alina „Badanie dokładności geometrycznej obrazów termograficznych” IV Konferencja Krajowa Termografii i Termometrii w Podczzerwieni, Łódź 2000
4. Wróbel Alina, Wróbel Andrzej, „Sposób wykonania opracowań termograficznych obiektów walcowych”. Archiwum Fotogrametrii Kartografii i Teledetekcji Vol. 11, Kraków-Osieczany 2001

Recenzował: dr inż. Ryszard Preuss