

PIOTR URBANEK, JACEK KUCHARSKI, ANDRZEJ FRĄCZYK
Instytut Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej

KOREKCJA ZMIENNEJ EMISYJNOŚCI POWIERZCHNI NAGRZEWANEGO INDUKCYJNIE WIRUJĄCEGO WALCA DLA POTRZEB POMIARÓW KAMERĄ TERMOWIZYJNĄ

W pracy opisano metodę wyznaczania i korekcji zmiennego rozkładu emisyjności na powierzchni nagrzewanego indukcyjnie obracającego się walca stalowego. Metoda ta bazuje na aproksymacji pomierzonego rozkładu temperatury za pomocą sztucznej sieci neuronowej oraz wyznaczania rozkładu emisyjności metodą sympleksu. Metodę zweryfikowano na pomiarach temperatury wykonywanych kamerą termowizyjną.

WPROWADZENIE

Pomiar temperatury powierzchni obracającego się walca stalowego realizowany jest najczęściej metodami bezstykowymi. W pracy badawczej realizowanej w Instytucie Informatyki Stosowanej do pomiarów i regulacji temperatury powierzchni nagrzewanego indukcyjnie obracającego się walca stalowego wykorzystano kamerę termowizyjną FLIR A615 o rozdzielczości 640x480 i zakresie pomiarowym od -40 do 150. Użyta kamera ma możliwość pomiaru temperatury powierzchni walca w trybie mapy temperatur powierzchni walca oraz w trybie tzw. linijki, w którym do układu automatycznej regulacji temperatury powierzchni walca przesyłany jest rozkład temperatury jedynie wzdłuż jego tworzącej. Rozkład ten jest zależny od mocy generowanej w walcu, natomiast wszelkiego rodzaju lokalne wahania temperatury przypominające szum o dużej amplitudzie najczęściej wynikają z wahań emisyjności poszczególnych obszarów walca. W artykule zaprezentowano metodę korekcji emisyjności za pomocą klasycznej metody optymalizacyjnej wykorzystującej jako aproksymator

sztuczną sieć neuronową, sprawdzając jej działanie dla dwóch rozkładów temperatury wzdłuż tworzącej walca.

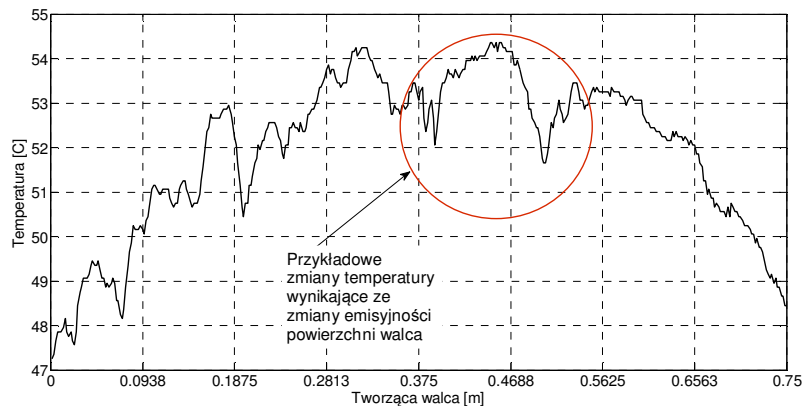
1. BEZSTYKOWY POMIAR TEMPERATURY POWIERZCHNI WALCA PRZEMYSŁOWEGO

W przypadku nagrzewanych indukcyjnie obracających się przemysłowych walców papierniczych głównym problemem podczas pomiarów metodami bezstykowymi jest korekcja małej emisyjności ($\epsilon \approx 0,3$) ich powierzchni. Można jej dokonać doświadczalnie metodami porównania temperatury powierzchni wysokopółyskliwej walca z częścią tej powierzchni pomalowanej na kolor czarny. Jednak w przypadku, gdy na powierzchni walca powstają losowo lokalne zabrudzenia (np. od przywierającej do powierzchni walca gładzonej wstęgi papieru), które mogą spowodować kilkukrotne zwiększenie emisyjności części powierzchni walca, taka jednorazowa procedura korekcji nie wystarcza i konieczne jest zastosowanie numerycznych metod korekcji emisyjności. Metoda redukcji zmiany emisyjności wzdłuż obwodu walca została przedstawiona w pracy [1]. Drugi rodzaj zakłócenia pomiaru temperatury wiąże się z cechą wielopunktowego (640 punktów) pomiaru temperatury wzdłuż tworzącej walca właściwego dla pomiarów kamerą termowizyjną. W tym przypadku kamera również wychwytuje lokalne zabrudzenia powierzchni walca, co prowadzi do wielostopniowych zmian temperatury powierzchni walca. Ponieważ taki szum pomiarowy nie jest korzystny z punktu widzenia automatycznego układu regulacji temperatury, podjęto próbę jego redukcji przy jednoczesnym zachowaniu charakteru rozkładu temperatury wynikającej z generowanej w walcu mocy czynnej.

Na rysunku 1 przedstawiono rozkład temperatury wzdłuż tworzącej walca dla chwili czasowej $t = 10000$ s (stan cieplnie quasi-ustalony). Z rozkładu widać, że w przypadku badanego walca laboratoryjnego widoczne są wyraźne wahania temperatury wynikające z wpływu zmian emisyjności wzdłuż tworzącej walca, co wprowadza dodatkowy, niepożądany szum do układu automatycznej regulacji temperatury.

Celem zaproponowanej metody jest redukcja zakłóceń temperatury pochodzących od zmian emisyjności przy jednoczesnym zachowaniu charakteru rozkładu temperatury wynikającego z rozkładu generowanej mocy czynnej. Wiodące przykłady, na których testowana była metoda korekcji obejmują nagrzewanie obracającego się walca stalowego wzbudnikiem zasilanym stałą oraz zmieniającą się wzdłuż jego tworzącej mocą. Nagrzewanie takie powoduje nierównomierny rozkład temperatury wzdłuż tworzącej walca, co ma udowodnić

uniwersalność metody dla innego dowolnego wymaganego przez proces technologiczny wzdluznego rozkladu temperatury wzdluz tworzącej walca.



Rys. 1. Rozkład temperatury wzdłuż tworzącej walca w stanie cieplnie quasi-ustalonym

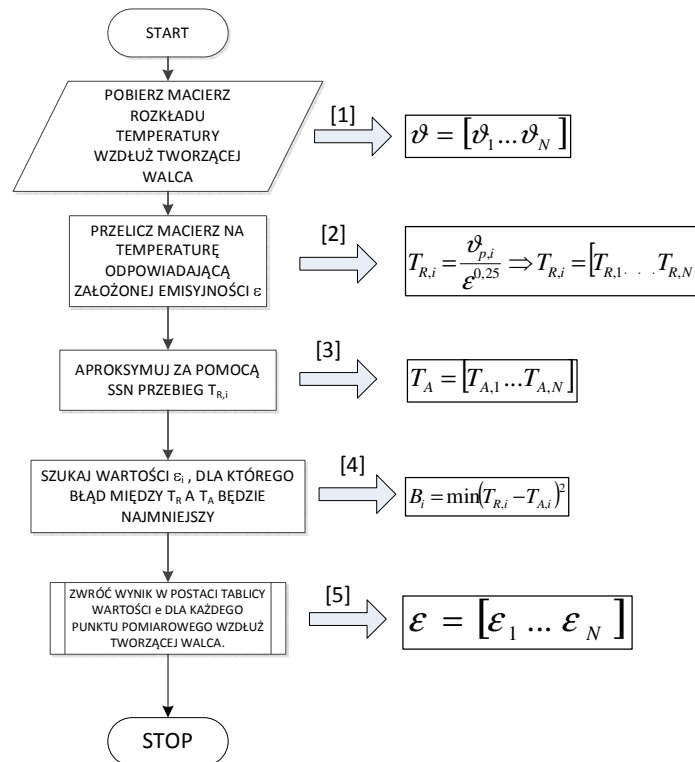
2. OPIS ALGORYTMU WYZNACZANIA ROZKŁADU EMISYJNOŚCI NA POWIERZCHNI WALCA

Kamera termowizyjna wykonująca pomiar temperatury w trybie tzw. „linijki” przesyła do systemu automatycznej regulacji temperatury (UART) informację o wartości temperatury 640 punktów wzdłuż tworzącej walca (blok nr 1 na rys. 2). Zadaniem algorytmu korekcji lokalnych wahań emisyjności jest szybka analiza, które z wahań rozkładu temperatury wynikają z lokalnych zabrudzeń jego powierzchni. W tym celu posłużono się metodą inteligentnej aproksymacji rozkładu zmierzonej temperatury, która powinna uwzględniać w czasie pomiaru dowolny zadany rozkład temperatury wzdłuż tworzącej walca. Algorytmem zapewniającym taką aproksymację jest algorytm sztucznych sieci neuronowych spełniających takie zadanie dla analizowanych danych. Struktura i sposób uczenia sieci zostały tak dobrane, aby generalizacja rozkładu temperatury uwzględniała rozkład mocy czynnej na powierzchni wirującego walca (blok nr 3 z rys. 2).

Kolejnym krokiem przy wyznaczaniu rozkładu emisyjności jest procedura optymalizacji doboru emisyjności ϵ każdego z 640 punktów tak, aby błąd pomiędzy temperaturą pomierzoną przeliczoną na kelwiny a temperaturą wynikającą z inteligentnej aproksymacji był jak najmniejszy. Jako procedurę optymalizacyjną wykorzystano metodę sympleksu Nedler-Meada [4] zaimplementowaną w środowisku Matlab (blok nr 4 z rys. 2). W ten sposób powstaje tablica warto-

ści emisyjności ϵ wzdłuż tworzącej walca, która staje się podstawą do przeliczenia wartości temperatury pomierzonej na wartości uwzględniające rozkład ϵ wzdłuż tworzącej walca (blok nr 5 z rys. 2).

Schemat takiego postępowania przedstawiony jest na rysunku 2.



Rys. 2. Sieć działań niezbędna do wyznaczenia rozkładu emisyjności wzdłuż tworzącej wirującego walca

W powyższym algorytmie postępowania wyjaśnienia wymaga struktura sztucznej sieci neuronowej użytej do aproksymacji pomierzonych przebiegów temperatury. Do tego celu wykorzystano zaprojektowaną wcześniej bibliotekę realizującą algorytm wstecznej propagacji błędów działający na wielowarstwowym perceptronie wraz z szeregiem opcji pozwalających na dostosowanie sieci do zadanego problemu aproksymacji [2]. Biblioteka ta wyróżnia się wśród dostępnych rozwiązań dużą szybkością działania, która została osiągnięta poprzez:

- zastosowanie niskopoziomowego dostępu do pamięci i wysokopoziomowych funkcji języka C++,

- zaprojektowanie struktur danych przechowujących informacje o sieci dla optymalnego wykorzystania pamięci cache procesora,
- modyfikację algorytmów propagacji i propagacji wstecznej [3] w celu sekwencyjnego dostępu do danych zawartych w opracowanych strukturach danych,
- realizację parametryzacji uczenia i ewaluowania sieci na poziomie kompilacji poprzez zastosowanie szablonów języka C++ (polimorfizm statyczny),

Wykorzystując opisaną bibliotekę, skonstruowano sieć neuronową składającą się z 5 neuronów w warstwie ukrytej. Liczba neuronów została dobrana do rozwiązania zadanego problemu w sposób doświadczalny. Sieć posiada jedno wejście, na które wprowadzane są kolejno punkty pomiarowe, oraz jedno wyjście zwracające aproksymowany przebieg. Z uwagi na prostą strukturę sieci oraz optymalną bibliotekę w jakiej została napisana, szybkość wyznaczania przebiegu aproksymowanego dla pomierzonych punktów nie przekraczała 0,1 sekundy. Pozwala to na wykorzystanie jej podczas pomiarów temperatury wykorzystywanych w zamkniętym układzie regulacji temperatury.

2. WYZNACZANIE ROZKŁADU EMISYJNOŚCI WZDŁUŻ TWORZĄCEJ WIRUJĄCEGO WALCA

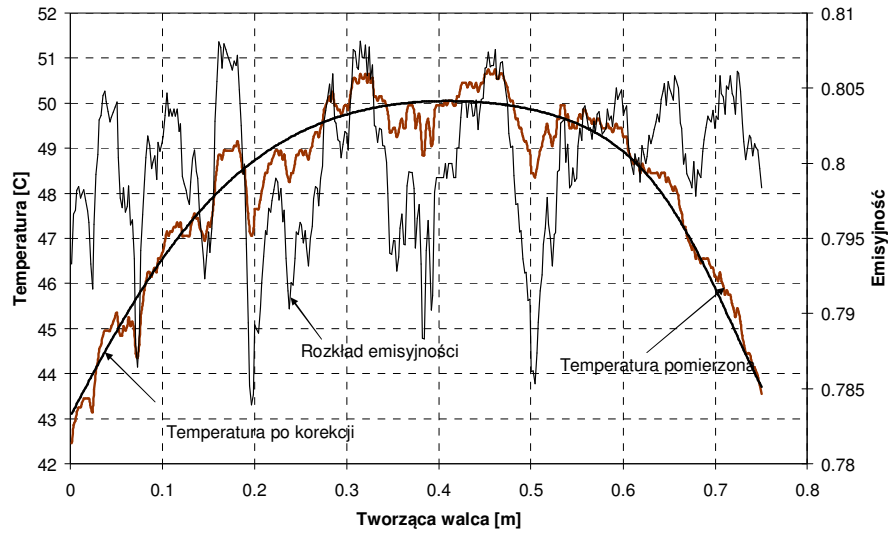
Do badań przydatności opisanego w punkcie 2 algorytmu wykorzystano dwa rodzaje zadanego wzdłużnego rozkładu temperatury wzdłuż tworzącej walca:

- rozkład temperatury wynikający z cyklicznego ruchu wzbudnika zasilanego stałą mocą (rys. 3),
- rozkład temperatury wynikający z zadanego wzdłużnego liniowego rozkładu mocy czynnej wzdłuż tworzącej walca (rys. 4).

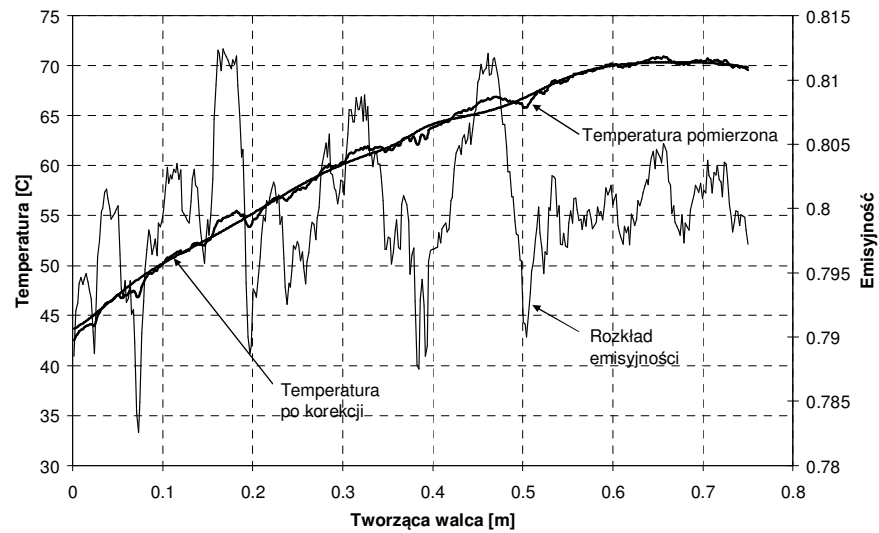
Poprawne wyznaczenie rozkładu emisyjności wzdłuż tworzącej walca dla obydwu przypadków pozwoli na założenie, że metoda ta sprawdzi się dla innych przypadków nagrzewania walca.

Wyniki obliczeń przedstawione są na rysunkach 3 i 4. Widać z nich, że dla analizowanych rozkładów temperatury testowany algorytm wyznacza podobny rozkład emisyjności powierzchni walca. Jest to logiczne, ponieważ był on testowany na tym samym obiekcie posiadającym niezmienną się w czasie defekty jego powierzchni.

Na komentarz zasługuje również fakt, że widoczne na rysunkach zmiany emisyjności powierzchni walca nie są duże. Wynika to ze specyfiki badanego walca laboratoryjnego, który dla innych celów badawczych został pomalowany na kolor czarny. Zmiany emisyjności powierzchni badanego obiektu wynikały jedynie z lokalnych zabrudzeń olejem maszynowym oraz nierównomiernej



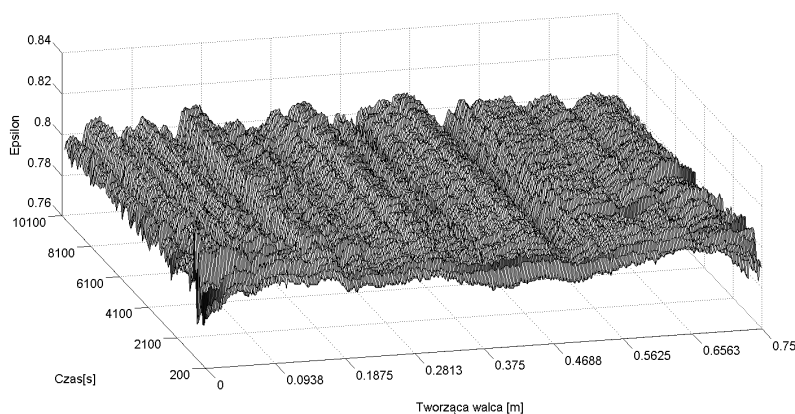
Rys. 3. Rozkład temperatury oraz emisyjności wzdłuż tworzącej walca dla przypadku ruchu wzbudnika wzdłuż tworzącej walca zasilanego stałą mocą



Rys. 4. Rozkład temperatury oraz emisyjności wzdłuż tworzącej walca dla przypadku ruchu wzbudnika zapewniającego zadany wzdłużny rozkład mocy czynnej

grubości powłoki czarnej farby. Typowe walce wykorzystywane w przemyśle są wysokopółyskliwe, co w przypadku przywierania do nich gładzonej wstęgi papieru powoduje lokalne wahania emisyjności rzędu kilkudziesięciu procent. Można jednak przypuszczać, że zaproponowany algorytm sprawdzi się również i w takich przemysłowych systemach gładzenia.

Wykorzystując przedstawioną metodę, wyznaczono rozkład emisyjności powierzchni walca dla procesu rozgrzewania walca ruchomym wzbudnikiem zasilanym stałą mocą od temperatury otoczenia ($\vartheta = 24^{\circ}\text{C}$) do temperatury $\vartheta = 55^{\circ}\text{C}$. Rozkład ten przedstawia rysunek 5.



Rys. 5. Rozkład wyznaczonej emisyjności wzdłuż tworzącej walca dla procesu rozgrzewania wirującego walca

Z przedstawionego diagramu wynika, że w warunkach niezminiającej się emisyjności powierzchni jej wartość zależy również od wartości temperatury badanego obiektu.

3. WNIOSKI

W pracy zwrócono uwagę na zagadnienie występowania zakłóceń pochodzących od zmian emisyjności powierzchni podczas bezstykowego pomiaru temperatury kamerą termowizyjną. Cechą tych zakłóceń jest ich losowe występowanie (w warunkach przemysłowych) oraz zależność amplitudy wahań od poziomu temperatury badanego obiektu. Wynikła stąd potrzeba opracowania metody pozwalającej na eliminację tego typu zakłóceń bez zmiany właściwego pomiaru temperatury. Opracowana metoda wykorzystuje do aproksymacji sygnału sztuczną sieć neuronową oraz klasyczny algorytm optymalizacyjny bazujący na metodzie sympleksu. Oba współdziałające ze sobą algorytmy, dla

rozwiązywanego zagadnienia wyznaczenia rozkładu emisyjności ϵ wzdłuż tworzącej nagrzewanego indukcyjnie obracającego się walca stalowego działają poprawnie, zwracając szukany wektor ϵ w czasie nie dłuższym niż 0,3 sekundy, co pozwala na jego zastosowanie w zamkniętym układzie regulacji temperatury próbkowanym z częstotliwością 1 sekundy.

PODZIĘKOWANIA

Badania zrealizowano w ramach projektu badawczego N N519 579838 Narodowego Centrum Nauki.

LITERATURA

- [1] **Kucharski J., Urbanek P.:** Algorytm korekcji zmienności emisyjności powierzchni wysokopłynliwych w ruchu obrotowym dla potrzeb układów automatycznej regulacji temperatury. Przegląd Elektrotechniczny, nr 07/2008.
- [2] **Stefański J.:** Wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych do określania współczynnika wymiany ciepła w warunkach konwekcji wymuszonej. Praca dyplomowa inżynierska. Promotor: dr inż. Piotr Urbanek. Politechnika Łódzka, Instytut Informatyki Stosowanej, Łódź 2012.
- [3] **Osowski St.:** Sieci neuronowe w ujęciu algorytmicznym. WNT, Warszawa 1996.
- [4] **Nocedal J., Wright S.:** Numerical optimization. Springer Verlag, 1999.

CORRECTION OF CHANGING EMISSIVITY OF INDUCTION HEATED ROTATING STEEL CYLINDER

Summary

This paper describes a method of determining and correcting the variable distribution of the emissivity on the surface of the rotating induction heated steel cylinder. This method is based on the approximation of the measured temperature distribution using an artificial neural network, and determining the emissivity distribution of the simplex method. The method was verified for temperature measurements for infra-red camera.

Keywords: Non-contact temperature measurement, determining the changing emissivity.