

Piotr Urbanek*, Andrzej Frączyk*, Jacek Kucharski*

Algorytmy eliminacji wpływu zmian emisyjności powierzchni w bezstykowych pomiarach temperatury wirującego walca stalowego

1. Wprowadzenie

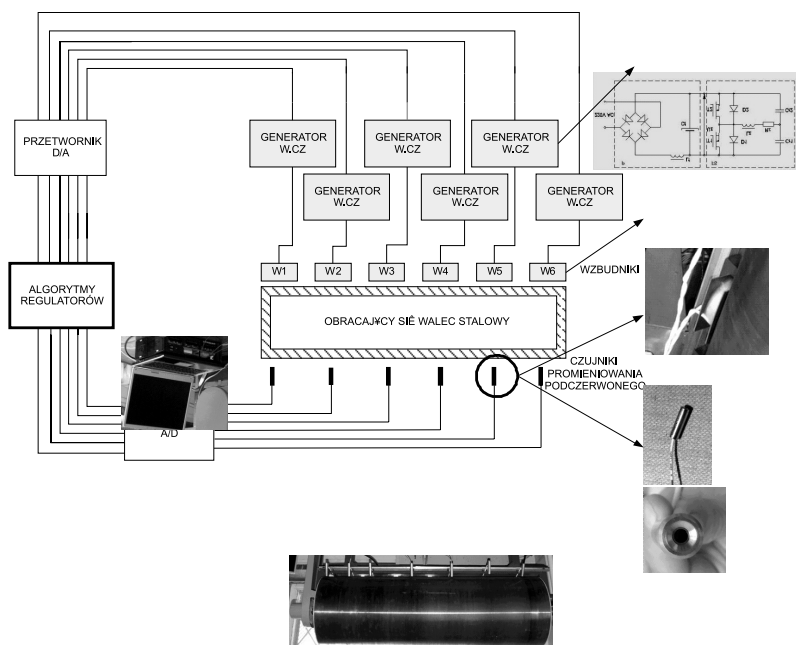
Nagrzewane indukcyjnie obracające się walce stalowe wykorzystywane są w przemyśle papierniczym i tekstylnym, np. na etapie wykończania (gładzenia) papieru lub tkanin (sklejanie, nadruki itp.). Jednym z ważnych technologicznie czynników w tego typu procesach jest utrzymywanie wymaganej wartości temperatury walca. W celu zapewnienia zadanego rozkładu temperatury wzdłuż tworzącej walca, zachodzi potrzeba zastosowania wielosekcyjnego układu grzejnego, który jest sterowany w zamkniętym układzie regulacji temperatury powierzchni. W układach tego typu, w zależności od długości walca liczba sekcji grzejnych może wynosić od kilku do kilkunastu.

Przykładowy schemat blokowy półprzemysłowego układu pomiaru i regulacji temperatury obracającego się walca przedstawiono na rysunku 1. Testowany układ laboratoryjny składa się z sześciu sekcji.

Każdy obwód układu sterowania składa się z bezstykowego czujnika temperatury o napięciowym sygnale wyjściowym odpowiadającym charakterystyce termoelementu typu K (*infra-red thermocouple*), cyfrowego regulatora o odpowiednio dobranej strukturze [1, 2] generującego standardowy sygnał sterowania (0-10V) na wejście generatora tyrystorowego w.cz., który poprzez wzbudnik wytwarzający pole elektromagnetyczne indukuje tuż pod powierzchnią walca prądy wirowe zwiększające jego temperaturę.

W warstwie implementacyjnej rozpatrywany system pomiarowo-sterujący składa się z opartego na łączu Ethernet 10/100 laboratoryjnego układu gromadzenia danych o nazwie firmowej DaqLab/2000™, zawierającego 16-bitowy przetwornik A/C, C/A. Układ ten próbkuje dane pomiarowe z częstotliwością do 200 kHz, zawiera osiem analogowych kanałów wejściowych, oraz cztery kanały wyjściowe.

* Katedra Informatyki Stosowanej, Politechnika Łódzka

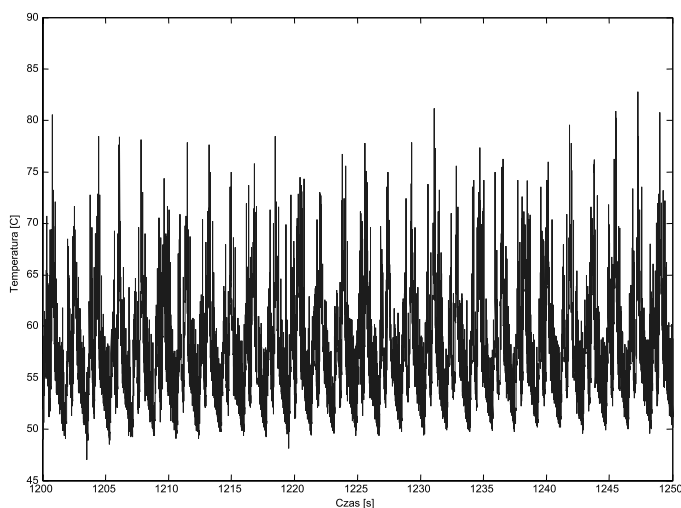


Rys. 1. Schemat blokowy wielosekcyjnego, zamkniętego układu regulacji temperatury powierzchni wirującego walca

Do pomiarów temperatury moduł ten wyposażony został w karty rozszerzające do termoelementów typu DBK-81, oraz karty z siedmioma analogowymi wyjściami napięciowymi DBK-2. Całość zarządzana jest z komputera przenośnego, który przetwarza gromadzone dane pomiarowe, a także realizuje cyfrowe algorytmy sterujące.

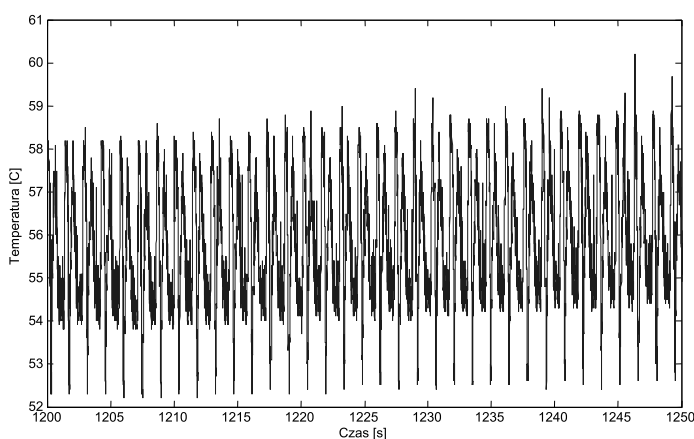
Permanentny ruch wirowy walca oraz inne aspekty technologiczne sprawiają, że pomiar temperatury powierzchni walca może być realizowany niemal wyłącznie na drodze bezstykowej. Wybór czujników pirometrycznych o sygnale wyjściowym zgodnym z charakterystyką danego typu termoelementu wydaje się być uzasadniony zarówno z punktu widzenia ekonomicznego jak i z powodu łatwości ich wykorzystania w systemie. Jednak wadą takiego rozwiązania jest ograniczenie możliwości wykorzystania tego typu czujników do pomiaru temperatury ciał o emisyjności ϵ zbliżonej do emisyjności ciał szarych ($\epsilon \approx 0,85$). Dla rozważanej klasy walców, których powierzchnia jest często wysokopółyskliwa ($\epsilon \leq 0,3$) powoduje to znaczne zaniżenie wskazywanej przez czujnik wartości temperatury. Problem ten można rozwiązać stosując na etapie przetwarzania danych odpowiednie współczynniki korekcyjne wyznaczone w fazie kalibracji systemu.

Dodatkowym problemem jest jednak to, że na skutek procesu technologicznego, powierzchnia walca wzdłuż obwodu ulega częściowemu, nieregularnemu zabrudzeniu, co powoduje lokalne zmiany emisyjności. W efekcie powstają znaczne wahania wskazywanej wartości temperatury (o amplitudzie nawet powyżej 20°C), co ilustruje rysunek 2. Tego typu zmiany wartości sygnału wyjściowego czujnika mają charakter zakłóceń niekorzystnych z punktu widzenia regulacji temperatury.



Rys. 2. Pomiar temperatury obracającego się walca stalowego o różnym stopniu zabrudzenia powierzchni wzdłuż jego obwodu

Ponadto analizując przebieg przedstawiony na rysunku 2, można zauważyć, że wahania sygnału mają charakter niesymetryczny – występują w nim chwilowe wzrosty temperatury wskazywanej przez czujnik. Powodem tego zjawiska jest fakt, że każde zabrudzenie powierzchni wysokopółyskłej powoduje lokalny wzrost jej emisyjności, co sprawia, że czujnik wskazuje wyższą temperaturę. Można to potwierdzić przez miejscowe wyczyszczenia powierzchni walca (lokalne zmniejszenie emisyjności), co sprawia, że wartość wskazywanej temperatury będzie lokalnie spadać (rys. 3).

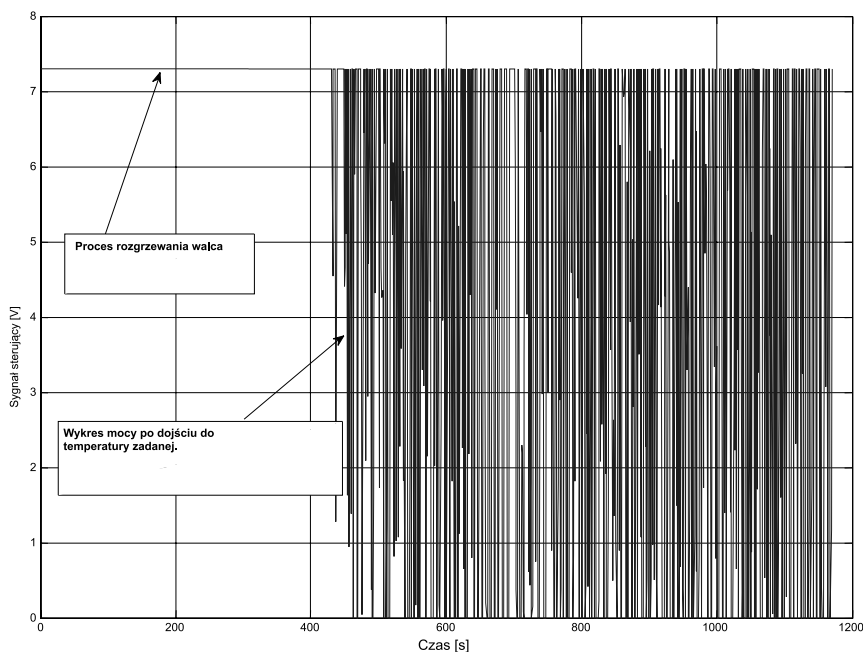


Rys. 3. Temperatura wskazywana przez czujnik w przypadku, gdy część powierzchni wzdłuż obwodu walca jest wyczyszczona

Biorąc powyższe pod uwagę, można przyjąć, że analizowane zakłócenia sygnału pomiarowego mają głównie przyczynę w zmianach emisyjności mierzonej powierzchni. Rysunki 2 i 3 pokazują ponadto, że zakłócenia te mają charakter cykliczny – związany z ruchem obrotowym walca, co warto wykorzystać przy projektowaniu algorytmów redukujących wpływ tego typu zakłóceń.

2. Wpływ zmian emisyjności powierzchni walca na działanie zamkniętego układu regulacji temperatury

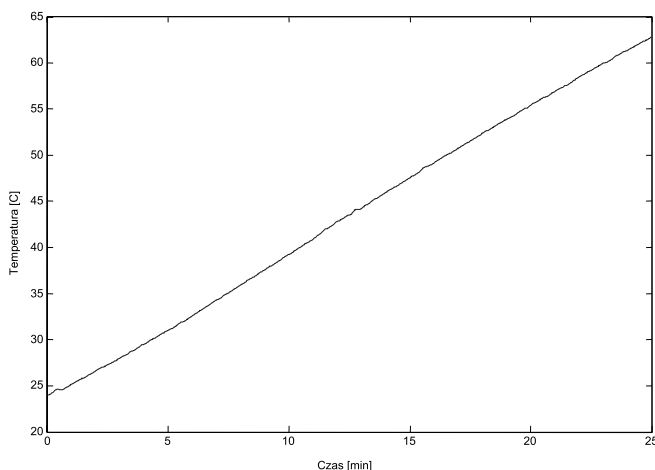
Opisane w poprzednim rozdziale zjawisko występowania wahań temperatury wskazywanej przez czujnik bezstykowy na skutek lokalnych zabrudzeń powierzchni walca i zmian jego emisyjności jest niekorzystne z punktu widzenia regulacji temperatury. Bezpośrednie wykorzystanie sygnału wyjściowego czujnika uniemożliwia właściwe określenie poziomu temperatury i przyczynia się do tego, że regulator ciągły klasy PID dostarcza do układu moc w sposób charakterystyczny dla regulatorów dwustawnych (włącz-wyłącz). Powoduje to powstawanie niepożądanych oscylacji dostarczanej mocy i niekorzystne warunki pracy generatorów w.c.z., zwiększając dodatkowo zakłócenia pochodzące od pola elektromagnetycznego (rys. 4).



Rys. 4. Sygnał sterujący regulatora podawany na wejście generatora tyrystorowego przy sygnale temperaturowym pozbawionym wygładzania

Mając powyższe na uwadze, zaproponowano kilka metod wygładzania i filtracji sygnału temperaturowego dostarczanego przez czujniki do zamkniętego układu regulacji temperatury powierzchni wirującego walca.

Najprostszym sposobem usunięcia opisanych wyżej zakłóceń pomiarowych jest zastosowanie jednego z filtrów dolnoprzepustowych, np. filtru Butterwortha drugiego rzędu o częstotliwości granicznej 0,05 Hz. Wynik filtracji przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Wynik wygładzenia sygnału czujnika podczas procesu rozgrzewania walca

Pomimo osiągnięcia dobrego efektu wygładzenia wyników pomiarów, metoda ta zastosowana w zamkniętym układzie regulacji temperatury może powodować ograniczenia szybkości reakcji na wszelkie zakłócenia sygnału pomiarowego, na które układ regulacji powinien reagować.

3. Algorytmy filtracji wykorzystujące cechy charakterystyczne zakłóceń

Specyficzne cechy zakłóceń występujących w sygnale mierzonym sprawiają, że oprócz stosowania klasycznej filtracji dolnoprzepustowej, istnieje możliwość budowy specjalizowanych algorytmów bazujących na specyficznych cechach występujących zakłóceń. Jednym z prostszych rozwiązań jest wprowadzenie ograniczenia możliwości zmian wartości chwilowych sygnału mierzonego.

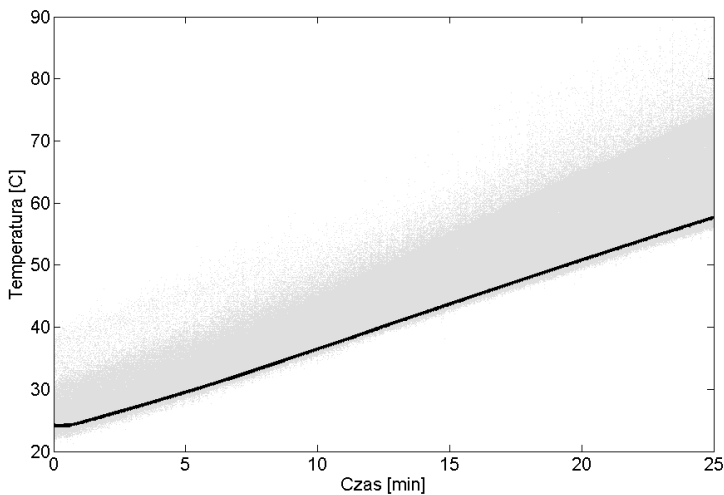
Algorytm ograniczania chwilowych zmian sygnału mierzonego

Z rysunku 5 wynika, iż w analizowanym czasie przebieg temperatury jest niemal prostoliniowy. Ponieważ w czasie 25 minut temperatura zmieniła się o ok. 40°C (przy procesie

rozgrzewania pełną mocą) można założyć, iż pomiędzy poszczególnymi próbkami wzrost temperatury nie powinien być wyższy niż $\Delta = 40^\circ\text{C}/(25 \cdot 60 \cdot 2000) = 1,33 \cdot 10^{-5}^\circ\text{C}$. Jako punkt startowy ($k = 1$) przyjęto średnią z 20 000 początkowych próbek ϑ_1 . Następnie wartości kolejnych próbek ϑ_k (począwszy od $k = 2$) obliczano z zależności:

$$\vartheta_k = \begin{cases} \vartheta_{k-1} + \Delta & \text{dla } \vartheta_k - \vartheta_{k-1} > \Delta \\ \vartheta_{k-1} - \Delta & \text{dla } \vartheta_k - \vartheta_{k-1} < -\Delta \\ \vartheta_k & \text{dla } |\vartheta_k - \vartheta_{k-1}| \leq \Delta \end{cases} \quad (1)$$

Uzyskane przebiegi temperatury przedstawiono na rysunku 6.

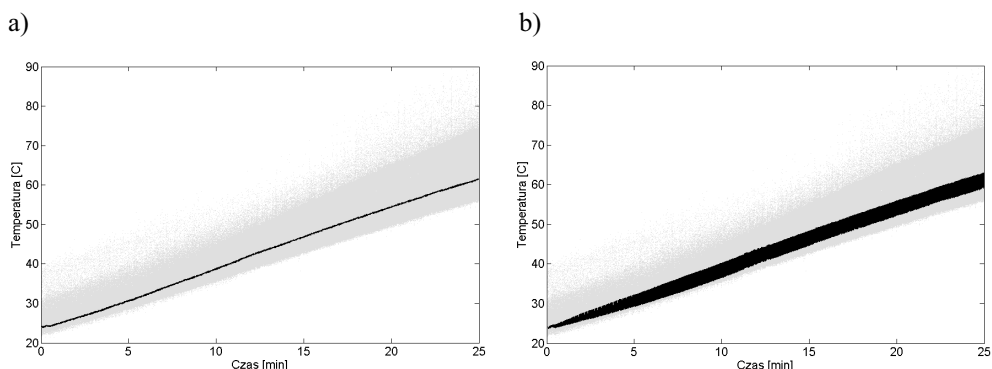


Rys. 6. Przebieg wygładzania dla nominalnej wartości Δ

Wygładzane przebiegi pokazane na rysunku 6 oraz 5 różnią się między sobą – można zauważyć kilkustopniową różnicę dla końcowego okresu pomiarów. Aby wykluczyć, jako przyczynę źle dobraną wartość Δ , zwiększono jej wartość 10-krotnie oraz 200-krotnie. Wyniki symulacji przedstawiono na rysunku 7.

Z rysunków 7a i 7b widać, że zwiększanie parametru Δ nie przybliża przebiegu wygładzonego metodą ograniczania zmian wartości chwilowych do przebiegu wygładzonego metodą filtru dolnoprzepustowego (rys. 5).

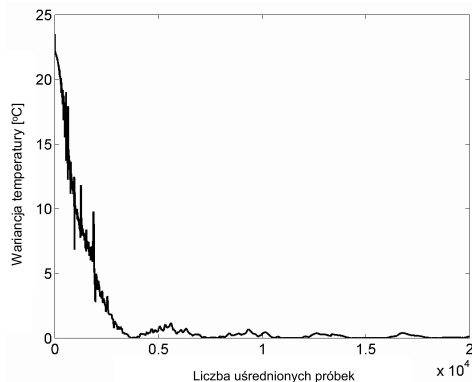
Jak wspomniano wcześniej, zakłócenia występujące w sygnale mierzonym charakteryzują się cyklicznością wynikającą z ruchu obrotowego walca. Istnieje więc możliwość zbudowania na tej bazie algorytmów filtracyjnych uśredniających wyniki pomiarów w ramach jednego cyklu. Praktycznym problemem pozostaje jednak określenie długości tego cyklu (liczby uśrednianych próbek), w szczególności wobec często nieregularnie zmiennej prędkości obrotowej walca.



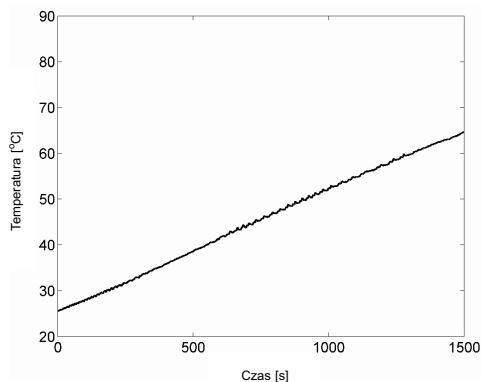
Rys. 7. Przebieg wygładzonego sygnału dla $\Delta = 10 \cdot \Delta_{\text{nominalne}}$ (a), oraz $\Delta = 200 \cdot \Delta_{\text{nominalne}}$ (b)

Metoda analizy wariancji sygnału

W celu określenia prawidłowej liczby uśrednianych próbek, wyznaczono zależność wariancji temperatury w zależności od liczby próbek, z których liczona jest średnia. Przedstawiono ją na rysunku 8.



Rys. 8. Zależność wariancji temperatury od liczby uśrednianych próbek



Rys. 9. Sygnał temperaturowy procesu rozgrzewania walca przy uśrednianiu 4000 próbek

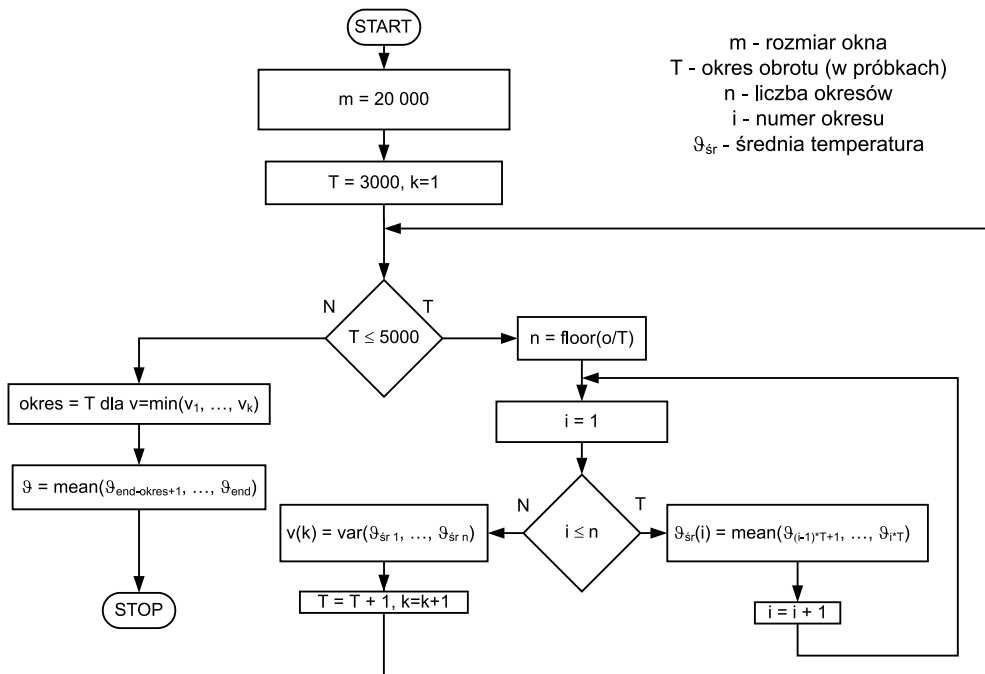
Łatwo zauważyć, że wariancja mierzonej temperatury zależy od liczby uśrednianych próbek i osiąga minimum dla ok. 4000 próbek, co koresponduje z pełnym cyklem obrotu walca (2000 próbek/s $\cdot$ 2 s/obrot = 4000 próbek/obrot). Jak widać z rysunku 8, dalsze zwiększanie liczby uśrednianych próbek nie spowoduje znaczącej poprawy jakości wygładzonego sygnału. Wyniki wygładzania pokazane są na rysunku 9.

Jak widać z rysunku 9, sygnał składający się z próbek wynikających z uśredniania liczby próbek określonej przez wariancję temperatury również można zaliczyć do skutecznych metod filtrowania. Do wad powyższej metody należy zaliczyć to, że jej zastosowanie ogranicza się jedynie do analizy typu „off-line”, gdyż do obliczenia wariancji wymagana jest znajomość całego przebiegu badanego sygnału. Dodatkowo, w przypadku nierównomierności obrotów walca wartość uśrednianej próbki podawanej do regulatora nie pochodzi z uśredniania próbek mierzonych wzdłuż jego jednego obrotu.

Metoda minimum wariancji wartości średnich kilku „okresów”

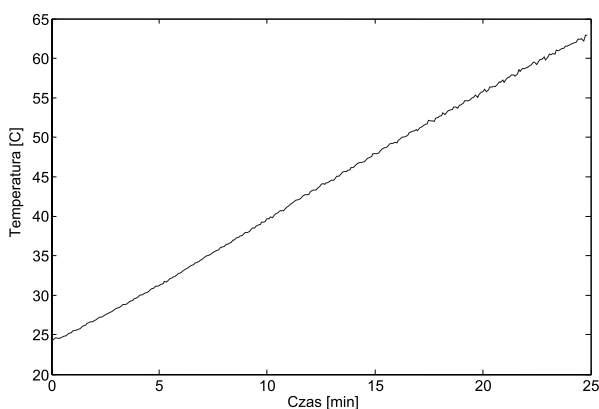
Do obliczeń przyjęto następujące założenia wstępne: Wartość temperatury jest mierzona co 5 s, okres obrotu walca zawiera się w przedziale 1,5÷2,5 s. Częstotliwość próbkowania 2 kHz – na okres obrotu walca przypada od 3000 do 5000 próbek.

Obliczenia przeprowadzono według algorytmu przedstawionego na rysunku 10.



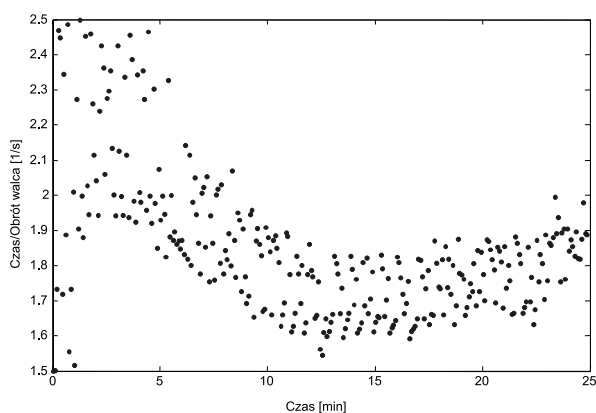
Rys. 10. Algorytm znajdowania minimum wariancji średnich wartości temperatury kilku „okresów”

Powyższy algorytm charakteryzuje się wysoką skutecznością, jednakże z uwagi na długi czas obliczeń (45 minut) nadaje się jedynie, jako metoda porównawcza z innymi metodami wygładzania (rys. 11).



Rys. 11. Przebieg temperatury wygładzonej metodą znajdowania minimum wariancji pomiędzy kilkoma średnimi wartościami temperatury kilku „okresów” – okno = 10 s (20 000 próbek)

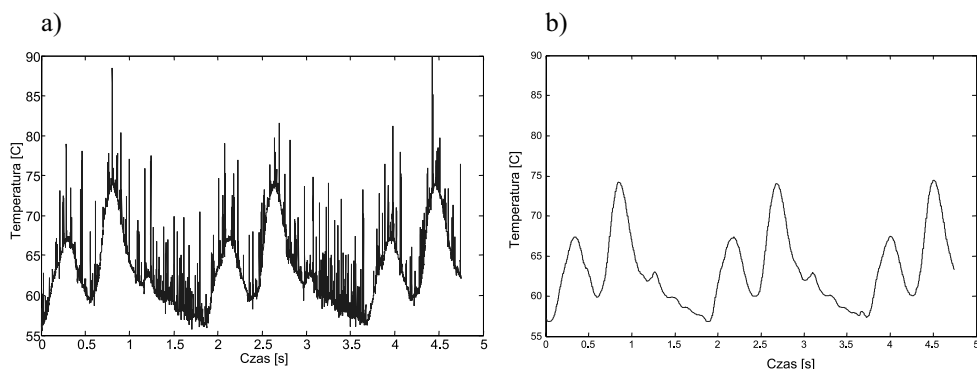
Zaletą metody jest możliwość śledzenia zmian prędkości obrotowej walca, gdyż wyznaczanie chwil, gdy wartość wariancji równa się zero wskazuje na pełen obrót walca. Ilustruje to rysunek 12.



Rys. 12. Wartości zmian prędkości obrotowej walca wyznaczonej na podstawie znajdowania minimum wariancji pomiędzy kilkoma średnimi wartościami temperatur kilku „okresów”

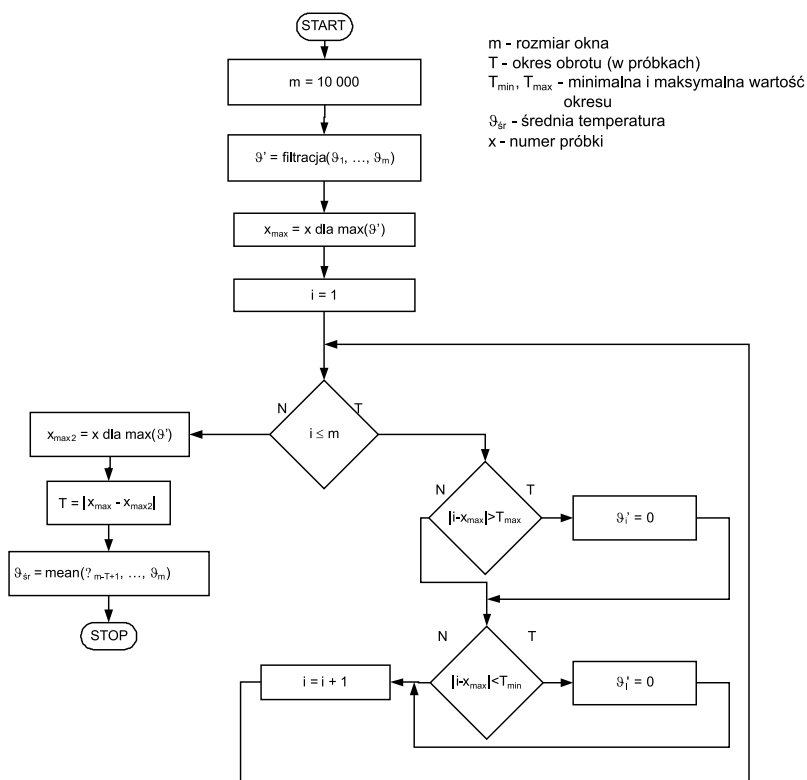
Metoda analizy przebiegu wartości rejestrowanej temperatury

Metoda polega na wyznaczeniu wartości okresu obrotu walca bezpośrednio z rejestrowanego przebiegu temperatury. Głównym problemem są dość duże zmiany wskazanej wartości temperatury (powodowane lokalnymi zabrudzeniami powierzchni walca – rys. 2). W związku z tym, do wstępnej analizy sygnału zastosowano filtr Butterwortha 2 rzędu o częstotliwości granicznej 5 Hz. Efekt filtracji pokazany został na rysunkach 13a i 13b.



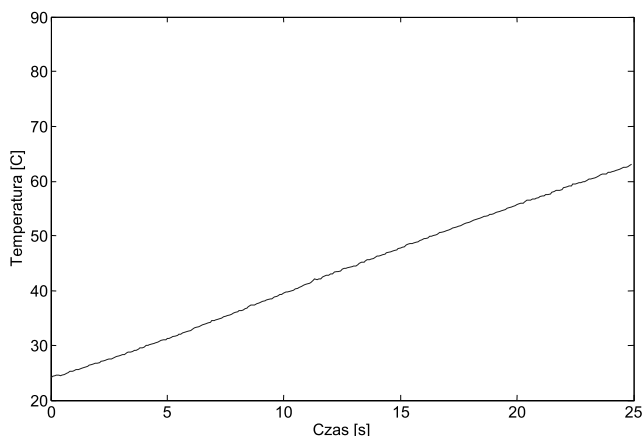
Rys. 13. Sygnał przed filtracją (a), sygnał po filtracji filtrem Butherwortha (b)

Na podstawie przebiegu (rys. 13) można wyznaczyć okres obrotu walca, przyjmując, że jest on równy odległości pomiędzy sąsiednimi maksimami. Do tego celu użyto algorytmu przedstawionego na rysunku 14.



Rys. 14. Algorytm wyznaczania wartości okresu obrotu walca na podstawie analizy przebiegu rejestrowanej temperatury

Algorytm ten wyznacza największe wartości sygnału pomiędzy sąsiednimi okresami przypadającymi na jeden obrót walca. W porównaniu z algorytmem pokazanym na rysunku 10 jest znacznie szybszy – wyznaczanie wartości okresu i obliczanie średniej z próbek będących pomiędzy wartościami maksymalnymi trwa ok. 30 sekund. Można go zatem wykorzystać do wygładzania sygnału w trakcie trwania pomiaru („on-line”). Efekt wygładzania pokazany jest na rysunku 15. W algorytmie tym istnieje również możliwość określania wartości prędkości obrotowej walca.



Rys. 15. Efekt wygładzania sygnału temperaturowego na podstawie analizy przebiegu wartości rejestrowanej temperatury

4. Uwagi i wnioski

W artykule przedstawiono kilka metod wygładzania sygnału temperatury obciążonej szumem pomiarowym pochodzącym od zmian wartości emisyjności powierzchni mierzonej. Ponieważ zastosowanie klasycznych filtrów może wprowadzać do układu regulacji duże opóźnienia zaproponowano algorytmy wygładzania bazujące na tym, że analizowane zakłócenia mają charakter cykliczny (powtarzający się regularnie przez wiele obrotów walca). Dzięki temu możliwe jest liczenie wartości średniej z liczby próbek odpowiadającej okresowi obrotu walca. Z przedstawionych metod najlepsza wydaje się metoda bazująca na wartości okresu obrotu walca wyznaczonej na podstawie analizy przebiegu rejestrowanej temperatury. Z uwagi na krótki czas obliczeń, może ona być stosowana bezpośrednio w trakcie trwania eksperymentu.

Literatura

- [1] Urbanek P., Kucharski J., *The induction heated rotating steel cylinder as a control plant*. 51st Internationales Wissenschaftliches Kolloquium Technische Universität Ilmenau, 2006.
- [2] Frączyk A., Urbanek P., Kucharski J., *Modelling and optimal temperature control of induction heated rotating steel cylinder*. 13th IEEE IFAC International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics MMAR 2007, Szczecin, Poland.