

# Algorytm regulacji dwuwymiarowego pola temperatury powierzchni obracającego się walca stalowego

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono algorytm regulacji dwuwymiarowego pola temperatury powierzchni obracającego się walca stalowego, nagrzewanego indukcyjnie sześcioma ruchomymi wzbudnikami. W ramach weryfikacji praktycznej opracowanego algorytmu zaprezentowano możliwość uzyskiwania przy jego zastosowaniu dość złożonych dwuwymiarowych rozkładów temperatury.

**Abstract.** The paper presents an algorithm for control of 2D temperature of the surface of induction heated rotating steel cylinder. Moving inductors are used as heat sources in the analyzed system. The proposed algorithm has been proven to be an efficient solution by ensuring a quite sophisticated temperature field distribution on the cylinder surface during an experimental verification (**The control algorithm of two-dimensional temperature field of the rotating steel cylinder surface**).

**Słowa kluczowe:** Algorytmy sterowania, nagrzewanie indukcyjne, ruchome wzbudniki.

**Keywords:** Control algorithms, induction heating, moving inductors.

doi:10.12915/pe.2014.02.08

## Wstęp

Wśród wielu obszarów zastosowań nagrzewania indukcyjnego ważne miejsce zajmuje nagrzewanie wsadów będących w ruchu, gdzie szczególnym przypadkiem jest nagrzewanie obracających się stalowych walców. Wiele zalet tego typu nagrzewania sprawia, że jest ono chętnie wykorzystywane między innymi w przemyśle papierniczym czy tekstylnym. Jednocześnie, wysokie wymagania technologiczne dotyczące rozkładu temperatury na powierzchni walca powodują konieczność stosowania kilku wzbudników wzdłuż tworzącej walca, a także wyposażania układu w precyzyjne mechanizmy regulacji temperatury. Ze względu na wielowymiarowy charakter układu wszelkie procedury pomiarowo – sterujące realizowane są w wielokanałowym komputerowym systemie gromadzenia i przetwarzania danych. Mechanizmy regulacyjne zaimplementowane w rozważanym układzie czerpią informacje o aktualnym stanie cieplnym walca na drodze bezstykowego pomiaru jego temperatury, realizowanego przy zastosowaniu kamery termowizyjnej, wpływając na poziomysterowania generatorów w.cz. zasilających wzbudniki umieszczone nad powierzchnią walca.

W Instytucie Informatyki Stosowanej PŁ prowadzone są prace nad rozwojem półprzemysłowego stanowiska do nagrzewania indukcyjnego walca stalowego [1]. Badania dotyczą doboru właściwych algorytmów regulacyjnych [2,3], oraz procedur przetwarzania sygnałów mierzonych i generowania sygnałów wymuszających [4]. W dalszej części artykułu zaprezentowano algorytm precyzyjnego sterowania ruchem wzbudników nagrzewających walec, umożliwiającą regulację dwuwymiarowego pola temperatury powierzchni walca.

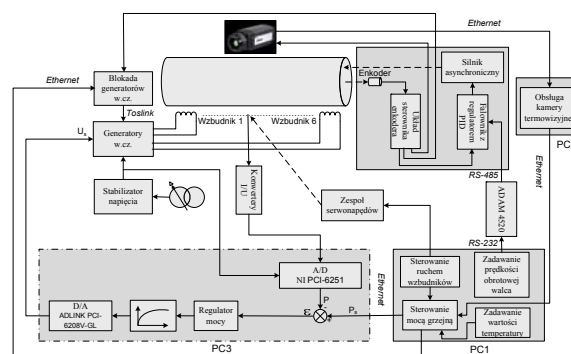
## Półprzemysłowe stanowisko badawcze

Na rysunku 1 przedstawiono schematycznie budowę stanowiska nagrzewania indukcyjnego obracającego się walca stalowego. Pod względem funkcjonalnym wyróżnić w nim można kilka głównych torów:

- tor pomiaru i regulacji temperatury obiektu;
- tor pomiaru i regulacji mocy grzejnej dostarczanej do obiektu;
- tor akwizycji i rekonstrukcji obrazu termowizyjnego powierzchni walca;
- tor pomiaru i regulacji prędkości obrotowej walca;
- tor sterowania pozycjami wzbudników.

Głównym elementem stanowiska badawczego jest komputer PC1, który na podstawie informacji uzyskanych z bloków rekonstrukcji obrazu oraz pomiaru i regulacji

prędkości obrotowej walca określa wartości mocy grzejnej, pozycje wzbudników oraz strefy wzdłuż obwodu walca, które należy nagrzewać.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego

Wymagana wartość mocy grzejnej przekazywana jest z regulatora temperatury (PC1) do regulatora mocy (PC3) przy użyciu interfejsu Ethernet. Dzięki znajomości wartości mocy zasilającej układ (wartości napięcia i prądów zasilających poszczególne wzbudniki mierzone przy użyciu karty A/D NI PCI-6251) obliczana jest wartość obciążenia mocy, która następnie podawana jest na wejście regulatora mocy. Oblicza on właściwą wartość napięcia sterującego generatorów w.cz. Ze względu na nieliniowe charakterystyki  $P=f(U)$  tych generatorów, wartość napięcia obliczona przez regulator PID jest korygowana przez człon linearyzujący, a następnie przy użyciu karty D/A Adlink PCI-6208V-GL podawana na wejście sterujące generatorów w.cz.. W związku z dużymi wahaniami napięcia zasilającego w ich obwodzie wysokoprądowym zastosowano stabilizator napięcia Enica ENI-ZL250/40, zasilany z transformatora trójfazowego. W celu umożliwienia selektywnego nagrzewania powierzchni walca stanowisko badawcze zostało wyposażone w układ blokad generatorów w.cz. Po ustaleniu pozycji wzbudników wzdłuż tworzącej walca, komputer PC1 wysyła do ww. układu informacje zakresach pozycji obrotowych walca, w których aktywne mają być poszczególne wzbudniki.

Do pomiaru wartości temperatury powierzchni walca zastosowano kamerę termowizyjną A615 firmy FLIR. Sygnał z kamery dostarczany jest do komputera PC2, który dokonuje rekonstrukcji obrazu termowizyjnego powierzchni

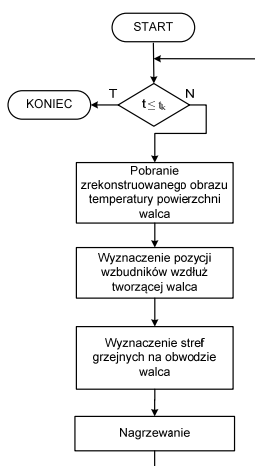
walca. Zrekonstruowany dwuwymiarowy obraz pola temperatury powierzchni walca podawany jest przy użyciu interfejsu Ethernet na wejście regulatora temperatury PC1. Znając wartość zadaną oraz bieżącą temperaturę oraz wartość prędkości obrotowej walca, regulator ten wyznacza odpowiednie pozycje wzbudników, wartość mocy grzejnej, jaką powinien być nagrzewany walec i przekazuje ją do regulatora mocy.

Do pomiaru prędkości obrotowej walca zastosowano enkoder MOK40-5000-5-BZ-N, obsługiwany przez specjalnie dla niego zaprojektowany sterownik. Zmierzoną wartość prędkości obrotowej walca sterownik ten przesyła w postaci cyfrowej przy użyciu interfejsu USB do regulatora temperatury oraz w postaci analogowego sygnału napięciowego 0-10V do falownika Hitachi SJ200. Zadana wartość prędkości obrotowej jest dostarczana do falownika przy użyciu interfejsów RS 232 i 485 z regulatora temperatury. Na podstawie otrzymanych sygnałów regulator PID zaimplementowany w zastosowanym falowniku dobiera odpowiednią wartość częstotliwości i napięcia zasilającego silnik asynchroniczny, który napędza walec.

Wzbudniki umieszczone są na żądanych pozycjach przez zespół sześciu serwonapędów SMBW 240 MINI 4/8 AMP. Każdy z tych serwonapędów steruje jednym silnikiem AC60 SQA 13030, poruszającym za pośrednictwem sześciu śrub kulowych KGSR 2525-2000mm FSC wózki HGH15CA-Z0-H, na których zamocowane są nagrzewające obiekty wzbudniki. Wózki te poruszają się na dwóch szynach, w układzie po trzy wózki na każdej szynie. Każdy z serwonapędów jest wyposażony w czujnik krańcowy oraz enkoder pozycji. Ponieważ zastosowane serwonapędy nie posiadają możliwości komunikacji poprzez sieć Ethernet, każdy z nich został podłączony do konwerterów Ethernet - RS 232 ICS-100 firmy Planet. Dzięki temu, parametry ruchu takie jak pozycja docelowa wzbudnika wzdłuż walca, a także prędkość maksymalna oraz przyspieszenie są przekazywane z komputera PC1 do serwonapędów za pośrednictwem sieci Ethernet.

### Algorytm sterowania pozycją wzbudnika oraz określania stref grzejnych na obwodzie walca

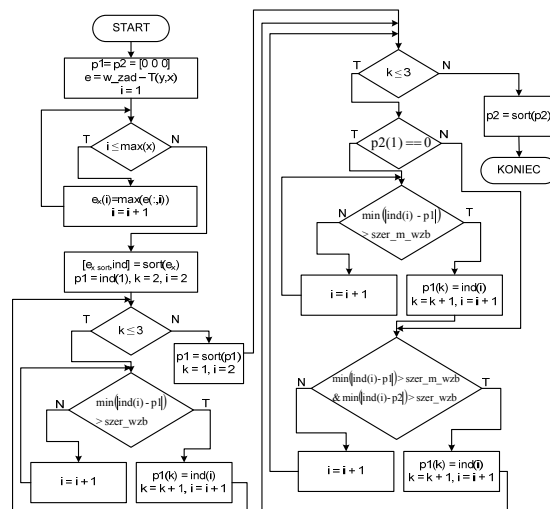
Ogólny schemat regulacji dwuwymiarowego pola temperatury przedstawia rysunek 2.



Rys.2. Struktura algorytmu regulacji dwuwymiarowego pola temperatury

W pętli iteracyjnej algorytmu przedstawionego na rysunku 2 na podstawie zrekonstruowanego obrazu temperatury powierzchni walca wyznaczone są przez komputer PC1 nowe pozycje wzbudników oraz stref

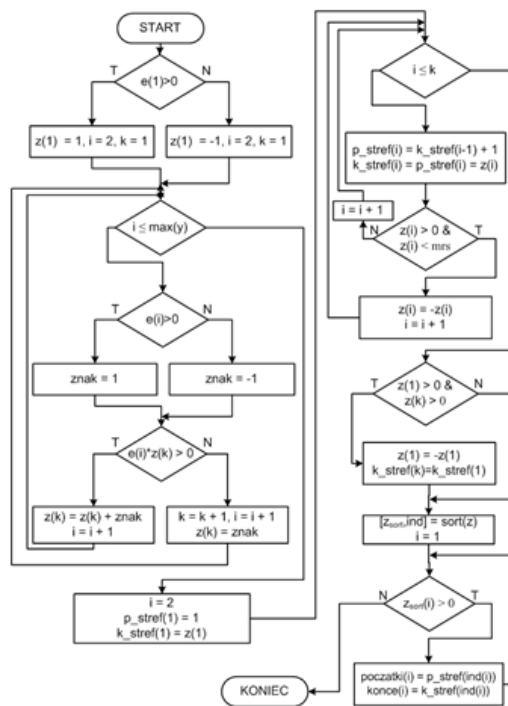
grzejnych na obwodzie walca. Algorytm wyznaczania pozycji wzbudników wzdłuż tworzącej walca przedstawia rysunek 3.



Rys.3. Algorytm wyznaczania pozycji wzbudników wzdłuż tworzącej walca

Na rysunku 3 zastosowane zostały następujące oznaczenia: p1 – pozycje pierwszej grupy wzbudników; p2 – pozycje drugiej grupy wzbudników; x,y – współrzędne punktów pola temperatury; w\_zad – zadane pole temperatury; e – uchyb temperatury; e\_x – wektor maksymalnych uchybów temperatury wzdłuż tworzącej walca; ind – indeksy posortowanych malejąco elementów wektora e\_x; szer\_wzb - szerokość wzbudnika; szer\_m\_wzb - szerokość strefy między wzbudnikami obu grup; k, i – zmienne pomocnicze.

Podczas ustawiania wzbudników na wyznaczonych pozycjach następuje, przy zastosowaniu algorytmu z rysunku 4, wyznaczenie stref grzejnych wzdłuż obwodu walca.

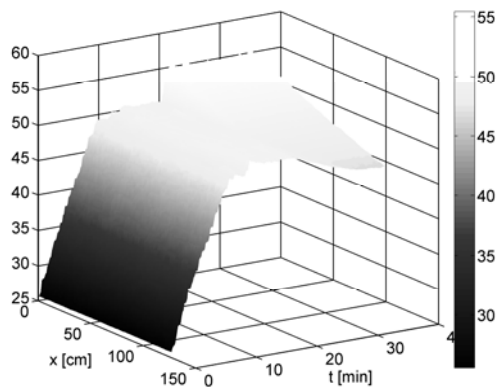


Rys.4. Algorytm wyznaczania stref grzejnych wzdłuż obwodu walca

Na rysunku 4 zastosowane zostały następujące oznaczenia:  $e$  – uchyb temperatury;  $z$  – wektor przedziałów uchybu;  $y$  – liczba punktów obwodu walca;  $p\_stref$  – wektor początków stref;  $k\_stref$  – wektor końców stref;  $mrs$  – minimalna strefa grzejna;  $zsort$  – posortowany wektor przedziałów uchybu;  $ind$  – indeksy przedziałów; początki i końce – odpowiednio początki i końce wyznaczonych stref grzejnych.

#### Weryfikacja eksperymentalna opracowanego algorytmu

W celu weryfikacji przydatności opracowanych algorytmów do regulacji temperatury przeprowadzono eksperyment polegający na 20-to minutowej regulacji stałowartościowej temperatury (temperatura zadana -  $50^{\circ}\text{C}$ ), a następnie trwającej 15 minut próbie uzyskania liniowo zmiennego ( $45^{\circ}\text{C}$ - $55^{\circ}\text{C}$ ) rozkładu temperatury wzdłuż tworzącej walca. Uzyskane wyniki przedstawia rysunek 5.



Rys.5. Rozkład temperatury wzdłuż tworzącej walca

Rysunek 5 prezentuje zmiany w czasie rozkładu temperatury, wyrażonego zależnością 1:

$$(1) \quad T(x, t) = \frac{\sum_{k=1}^m T(k, x, t)}{m}$$

gdzie:  $x$  – współrzędna punktu obrazu pola temperatury wzdłuż tworzącej walca,  $T$  – temperatura,  $m$  – liczba punktów obrazu pola temperatury wzdłuż obwodu walca,  $t$  – czas.

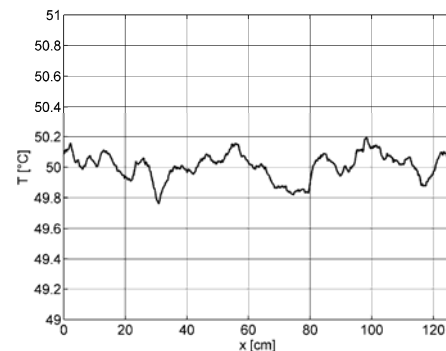
Analizując rysunek 5 można zauważyć dość wysoką równomierność rozkładu temperatury, zarówno w czasie nagrzewania walca do zadanej temperatury, jak i w czasie uzyskiwania liniowo zmiennego profilu temperatury. Ponadto można zauważyć, iż w drugim etapie eksperymentu osiągnięcie zadanej temperatury przez podgrzewany brzeg walca nastąpiło znacznie szybciej, niż w przypadku drugiego brzegu.

W celu dokładniejszej analizy profilu temperatury wzdłuż tworzącej walca, na rysunku 6 przedstawiono rozkład temperatury powierzchni walca w 20. (rys. 6a) oraz 35. minucie (rys. 6b) eksperymentu. Zawartość tych rysunków wskazuje na wysoki stopień zgodności uzyskanego przy zastosowaniu opracowanych algorytmów rozkładu temperatury powierzchni walca z zadaniem profilem. Aby umożliwić ocenę jakości regulacji temperatury dla obu profili temperatury z rysunku 6 obliczono wartości wskaźnika jakości regulacji, zdefiniowanego jako:

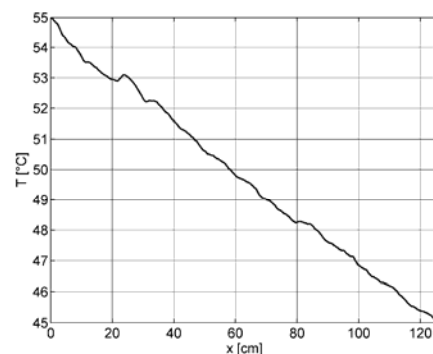
$$(2) \quad I = \max(T(x) - T_z(x))$$

gdzie:  $I$  – przyjęty wskaźnik jakości,  $T$  – temperatura rzeczywista,  $T_z$  – temperatura zadana.

a)



b)

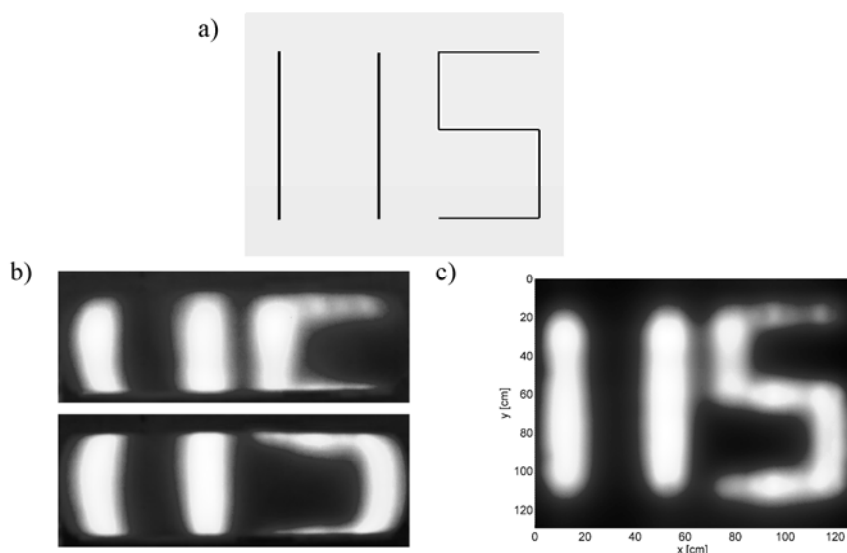


Rys.6. Rozkład temperatury wzdłuż tworzącej walca w 20. (a) i 35. (b) minucie eksperymentu

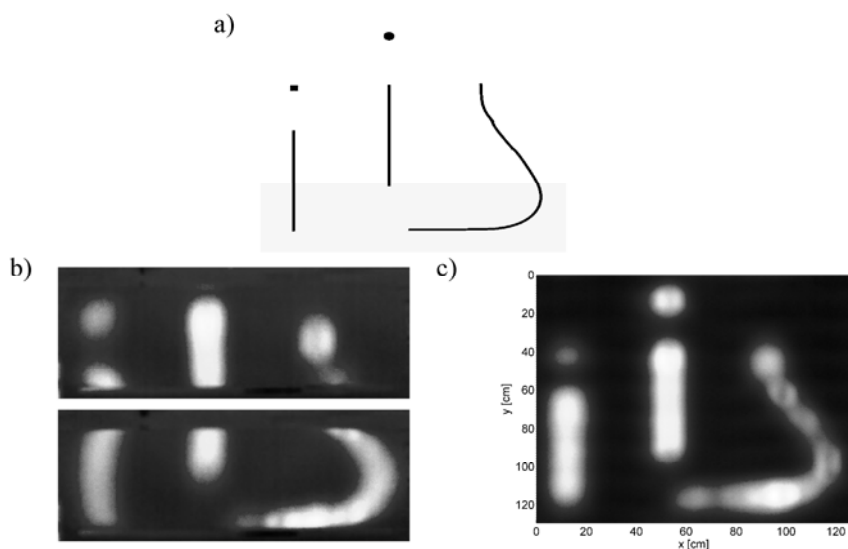
Wartość tego wskaźnika dla regulacji stałowartościowej do poziomu  $50^{\circ}\text{C}$  wynosi  $0.24^{\circ}\text{C}$ , natomiast dla wariantu z liniowo zmienną wartością temperatury zadanej  $0.33^{\circ}\text{C}$ . Powyższe eksperymenty potwierdziły skuteczność opracowanego algorytmu w zakresie zapewnienia zadanego profilu temperatury wzdłuż tworzącej walca, co ma szczególne znaczenie w typowych procesach technologicznych realizowanych np. w przemyśle papierniczym. Jednak algorytm ten umożliwia również dowolne kształtowanie pola temperatury na powierzchni walca, co także może mieć istotne znaczenie technologiczne. W celu ilustracji skuteczności algorytmu w realizacji tego typu zadania, przeprowadzono eksperymenty, w których zadany rozkład temperatury miał charakter sygnału dwuwymiarowego odpowiadającego powierzchni „rozwinętego” walca. Rozważono dwie postacie zadanego rozkładu temperatury na powierzchni walca:

- stosunkowo prosty geometrycznie zestaw symboli IIS, odpowiadający skrótowi nazwy Instytutu Informatyki Stosowanej;
- bardziej skomplikowany geometrycznie kształt, jakim jest graficzne logo Instytutu.

Wyniki tych eksperymentów przedstawione są na rysunkach 7 i 8. Dla zobrazowania efektów działania algorytmu rekonstrukcji obrazu temperatury powierzchni walca [5] na rysunkach 7b i 8b zamieszczono przykładowe obrazy uzyskiwane z kamery termowizyjnej, natomiast na rysunkach 7c i 8c zrekonstruowany obraz. Analiza rysunków 7 i 8 pozwala wyciągnąć wniosek, iż opracowany algorytm realizuje postawione przed nim zadania, tzn. umożliwia regulację dwuwymiarowego pola temperatury



Rys.7. Realizacja dwuwymiarowego rozkładu temperatury na powierzchni walca (akronim nazwy Instytutu Informatyki Stosowanej): wartość zadana (a), przykładowe obrazy otrzymane z kamery termowizyjnej (b) oraz uzyskany rozkład temperatury na powierzchni (c)



Rys.8. Realizacja dwuwymiarowego rozkładu temperatury na powierzchni walca (logo Instytutu Informatyki Stosowanej): wartość zadana temperatury powierzchni walca (a), przykładowe obrazy otrzymane z kamery termowizyjnej (b) oraz uzyskany rozkład temperatury (c)

### Podsumowanie i wnioski

W artykule przedstawiono algorytm regulacji temperatury powierzchni nagrzewanego indukcyjnie obracającego się walca stalowego zaimplementowany w półprzemysłowym stanowisku badawczym. Algorytm ten bazuje na sterowaniu pozycjami wzbudników wzdłuż tworzącej walca oraz sterowaniu mocą po jego obwodzie. Przeprowadzone eksperymenty wykazały, że opracowany algorytm może być stosowany jako uniwersalne narzędzie, umożliwiające sterowanie zarówno rozkładem temperatury wzdłuż tworzącej walca jak i dwuwymiarowym polem temperatury.

### LITERATURA

- [1] Urbanek P., Kucharski J., Frączyk A.: Methods of determination of dynamic properties of induction heated multi input – multi output systems. *Przegląd Elektrotechniczny*, (2008), nr 11, 180-183
- [2] Frączyk, A., Urbanek, P., Kucharski, J., Modelling and optimal temperature control of in-duction heated rotating steel cylinder.

- 13th IEEE IFAC International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, (2007) Szczecin, 351-355
- [3] Urbanek P., Kucharski J.: The induction heated rotating steel cylinder as a control plant. *51st Internationales Wissenschaftliches Kolloquium Technische Universität Ilmenau* (2006)
- [4] Urbanek P., Frączyk A., Kucharski J., Algorytmy eliminacji wpływu zmian emisyjności powierzchni w bezstykowych pomiarach temperatury wirującego walca stalowego. *Automatyka*, (2008) tom 12/3, 841-851
- [5] Jaworski T., Kucharski J., An algorithm for reconstruction of temperature distribution on rotating cylinder surface from a thermal camera video stream *Przegląd Elektrotechniczny*, (2013) nr 02a, 91-94

**Autorzy:** dr hab. inż. Jacek Kucharski, Politechnika Łódzka, Instytut Informatyki Stosowanej, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: [jacek.kucharskii@p.lodz.pl](mailto:jacek.kucharskii@p.lodz.pl); dr inż. Andrzej Frączyk, Instytut Informatyki Stosowanej, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: [andrzej.fraczyk@p.lodz.pl](mailto:andrzej.fraczyk@p.lodz.pl).