

Jan KAŹMIERCZAK

PRZYKŁAD ZASTOSOWANIA METOD AUTOMATYCZNEGO WNIOSKOWANIA
DLA KONTROLI DZIAŁANIA PIECA ŁUKOWEGO
NA PODSTAWIE EMITOWANEGO SYGNAŁU AKUSTYCZNEGO

Streszczenie. W artykule przedstawiono fragment badań prowadzonych w ramach problemu międzyresortowego MR.I.24, których celem jest wykorzystanie sygnału akustycznego pieca łukowego dla automatycznego wnioskowania o działaniu tego złożonego układu maszynowego. Zastosowane metody wnioskowania zostały przejęte z dziedziny tzw. rozpoznawania cech (rozpoznawania obrazów).

1. WPROWADZENIE

Badania efektu akustycznego, emitowanego przez elektrostalownicze piece łukowe, zostały podjęte w Instytucie Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Śląskiej w Gliwicach w roku 1973.

Szczegółowe efekty przeprowadzonych w toku tych badań eksperymentów i uzyskanych wyników, przedstawiono w szeregu opracowań, m.in. [2] i [4].

Analiza wyników przeprowadzonych eksperymentów doprowadziła do sformułowania wniosków:

- a) istnieją istotne różnice wartości charakterystyk sygnału akustycznego dla różnych faz procesu technologicznego wytapiania stali w piecu łukowym,
- b) istnieje szereg charakterystyk sygnału akustycznego pieca łukowego, których zmienność uzależniona jest od określonych elementów procesu technologicznego (np. granulacja wsadu metalowego), natomiast nie zależy od indywidualnych cech obiektu badań,
- c) najwyższe wartości osiągają poziomy sygnału akustycznego pieców łukowych w fazie roztopienia wsadu metalowego,
- d) poziom efektu akustycznego pieca łukowego znacznie przewyższa poziom tła akustycznego w hali elektrostalowni,
- e) sygnał akustyczny pieca łukowego ma charakter niestacjonarnego sygnału losowego.

Bezpośrednim skutkiem powyższych wniosków było postawienie hipotezy o istnieniu relacji wzajemnej zależności pomiędzy działaniem elektrostalowniczego pieca łukowego a emitowanym przez ten piec sygnałem akustycznym.

2. PRZESTRZEŃ STANÓW PIECA ŁUKOWEGO A PRZESTRZEŃ SYGNAŁU AKUSTYCZNEGO

W celu uplastycznienia związku pomiędzy działaniem pieca łukowego i emitowanym przez ten piec sygnałem akustycznym przyjęto, że stan obiektu badań i zmienność sygnału będą opisywane z wykorzystaniem przestrzeni liniowo-metrycznych, które będą w dalszym ciągu nazwane odpowiednio "przestrzeń stanów pieca łukowego" i "przestrzeń sygnału akustycznego".

Podstawowym problemem takiego odwzorowania jest sposób opisu osi współrzędnych obu tych przestrzeni.

2.1. Przestrzeń stanów pieca łukowego

W toku prowadzonych badań sygnału akustycznego pieców łukowych stwierdzono, że na sygnał ten wpływa szereg czynników o charakterze technologicznym, konstrukcyjnym i operacyjnym, związanych z działaniem pieca łukowego.

Przykładową listę takich czynników, które w dalszym ciągu nazywać będziemy parametrami działania pieca łukowego przedstawiono w pracy [2].

Można przyjąć, że przestrzenią stanów pieca łukowego jest n -wymiarowa przestrzeń, której współrzędnymi są parametry stanu pieca, których zbiór ma licznosc "n".

Ponieważ jednak liczba wymiarów takiej przestrzeni jest duża, bardzo utrudnione staje się wykazanie istnienia związku ciągu stanów pieca łukowego ze zmiennością sygnału akustycznego.

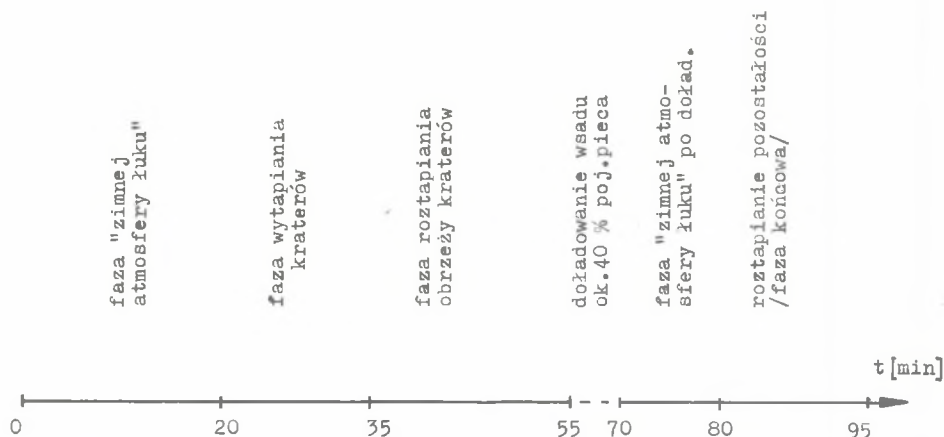
Do potrzeb eksperymentu przyjęto więc klasyczny plan "jeden czynnik zmienny, pozostałe ustalone" i wprowadzono następujące ograniczenia prowadzonych badań:

- obiektem badań był jeden, wybrany piec łukowy,
- skład i granulacja złomu, roztopianego w piecu w czasie trwania badań, były w przybliżeniu stałe,
- stosowano jeden typ elektrod grafitowych,
- wytapiano podobne gatunki stali,
- badania były silnie skomasaowane w czasie, celem uniknięcia wpływu na ich rezultaty zmiany warunków atmosferycznych, a także procesów destrukcyjnych zachodzących w badanym piecu łukowym,
- obserwację działania pieca ograniczono do fazy roztopiania wadu metalowego.

Przy tak określonych warunkach badań można przyjąć następującą tezę:

Jedynym zmiennym elementem przestrzeni stanów pieca łukowego w czasie badań jest struktura wadu metalowego (od stanu stałego do całkowitego roztopienia). Mamy więc do czynienia z jednowymiarową przestrzenią stanów pieca łukowego, której wymiarem jest stan wadu.

Stan wadu w badanym piecu był w czasie trwania eksperymentu kontrolowany. Przykładową sekwencję zmienności tego parametru działania pieca łukowego przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Przykładowy przebieg roztopiania wsadu w piecu łukowym

Na rysunku widzimy, że dodatkowym wymiarem, który w razie potrzeby może zostać uwzględniony w przestrzeni stanów obiektu badań, jest wymiar czasu.

2.2. Przebieg sygnału akustycznego pieca łukowego

W przedstawianych badaniach przyjęto, że ocenami sygnału akustycznego pieca łukowego, opisującymi współrzędne przestrzeni tego sygnału, będą składowe częstotliwościowe jego widma gęstości mocy. Za wyborem takim przemawia szereg czynników, takich jak np.: dostępność aparatury do analizy widmowej czy też możliwości interpretacji fizycznej wyników takiej analizy.

Na podstawie wyników badań stwierdzono, że istotne dominaty widma efektu akustycznego pieca łukowego występują w zakresie częstotliwości 100-1000 Hz. W tym też piśmie zawarta jest decydująca część mocy badanego sygnału.

Zdecydowano więc ograniczyć przestrzeń sygnału do tego właśnie zakresu widma. Wyodrębniony wstępnie obszar widma sygnału akustycznego pieca łukowego został wypełniony pasmami o stałej względnej szerokości 1 oktawy. Opis osi współrzędnych przestrzeni sygnału stanowią zatem poziomy w oktawowych pasmach 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz i 1000 Hz.

Dodatkowo przyjęto, że punktami w przestrzeni sygnału są nie wartości chwilowe wybranych charakterystyk opisujących osie tej przestrzeni, lecz poziomy średnie, obliczane w ustalonych odcinkach czasu.

Ze względu na stwierdzoną niestacjonarność sygnału akustycznego pieca łukowego, długość odcinka czasowego dla uśredniania dobrano w taki sposób, by przy założonym poziomie istotności spełnione były warunki stacjonarności takiego odcinka realizacji sygnału.

Można przyjąć, że przy powyższych założeniach sekwencja punktów w przestrzeni sygnału odwzorowuje trendy czasowe, istniejące w tym sygnale.

2.3. Odwzorowanie przestrzeni stanów obiektu badań w przestrzeni sygnału

Opisane powyżej cechy przestrzeni sygnału akustycznego, emitowanego przez elektrostalowniczy piec łukowy i szczególnej przestrzeni stanów takiego pieca, w którym odwzorowano przebieg roztapiania wadu jako szczególnej fazy jego działania, stanowią podstawę dla następującego rozumowania:

W przestrzeni stanów obiektu badań obserwujemy czasową sekwencję punktów, opisujących pewien element działania tego obiektu. Wiadomo równocześnie, że jest to jedyny istotny powód wpływu czynnika czasu na przestrzeń stanów.

Równocześnie, w przestrzeni sygnału akustycznego, w której zapisano zmienność wybranych miar tego sygnału w sekwencji zgodnej z zmianami w przestrzeni stanów, obserwujemy istnienie wyraźnych trendów czasowych. Analiza przyczynowo-skutkowa takiego stanu rzeczy prowadzi do przyjęcia tezy o istnieniu odwzorowania elementów przestrzeni stanów pieca łukowego w przestrzeni sygnału akustycznego.

Teza ta stanowi równocześnie podstawę dla prób określenia charakteru takiego odwzorowania, co pozwoliłoby na uzyskiwanie informacji o stanie pieca łukowego na podstawie odpowiedniej analizy sygnału akustycznego.

Taki właśnie jest podstawowy cel omawianych badań.

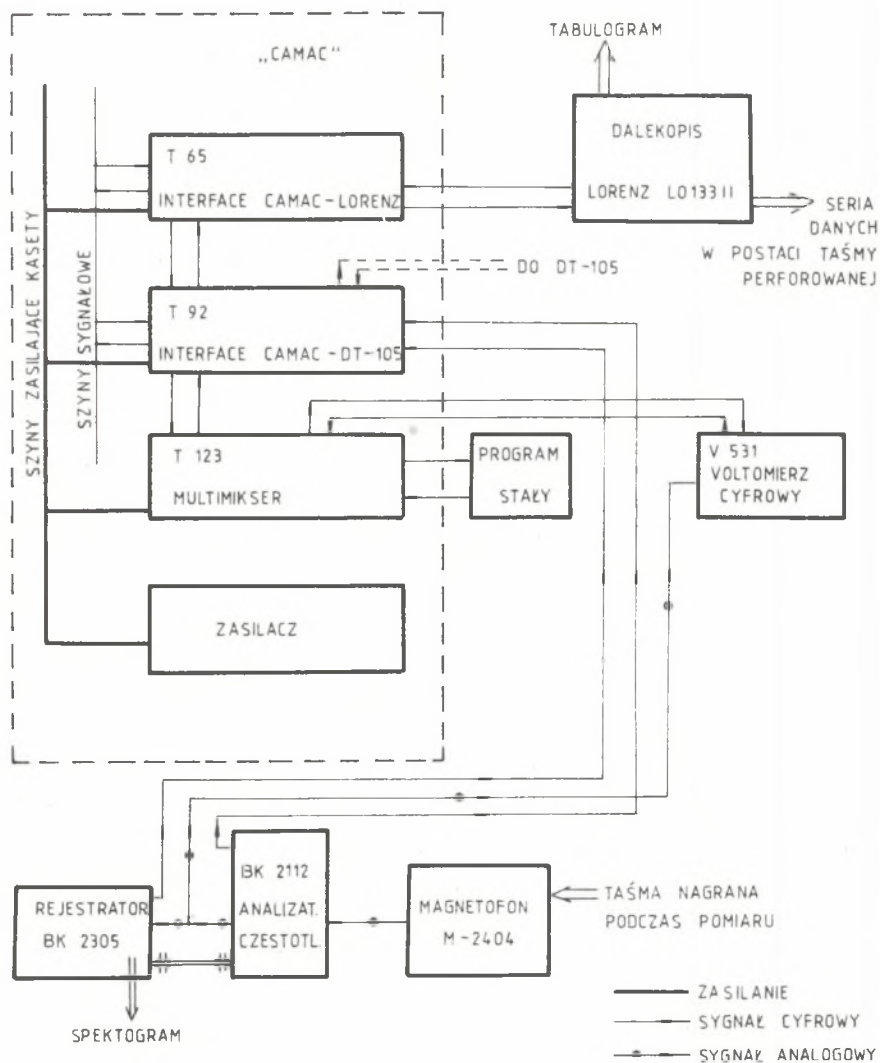
3. Wnioskowanie o stanie pieca łukowego na podstawie analizy emitowanego sygnału akustycznego

Pozyskiwanie informacji o stanie obiektu badań, zasadzające się na analizie przestrzeni sygnału, jest możliwe jedynie wówczas, gdy znamy charakter odwzorowania przestrzeni stanów w przestrzeni sygnału zarówno pod względem jakościowym, jak i ilościowym.

Jednakże w prezentowanych badaniach poszukiwanie np. funkcyjnego opisu takiego odwzorowania jest utrudnione ze względu na stwierdzony uprzednio, losowy charakter analizowanego sygnału.

Dlatego też zdecydowano podjąć próbę opisu tego odwzorowania poprzez wydzielanie w przestrzeni stanów pieca łukowego pewnych obszarów, a następnie – poprzez zidentyfikowanie elementów przestrzeni sygnału odpowiadających tym obszarom przestrzeni stanów.

Losowość sygnału akustycznego pieca łukowego spowodowała, że dla opisu podziału przestrzeni sygnału na zbiory punktów, reprezentujących odpowiednie fazy działania pieca łukowego, wykorzystano typowe parametry zmiennych losowych. Przyjęto, że dla analizowanego sygnału, interpretowanego jako n -wymiarowa zmienna losowa, parametrami tymi będą: kolumnowa macierz wartości średnich μ oraz kwadratowa macierz kowariancji Σ rzędu n .



Rys. 2. Schemat układu przetwarzania analogowo-cyfrowego sygnału akustycznego

3.1. Sposób przedstawienia sygnału analogowego w przestrzeni metrycznej

Dla umożliwienia odwzorowania wartości wybranych charakterystyk sygnału jako punktów w przestrzeni sygnału koniecznym było przeprowadzenie dyskretyzacji sygnału akustycznego pieca łukowego, zarejestrowanego w postaci analogowej na taśmie magnetycznej.

Wykorzystany w tym celu układ przedstawiony został w postaci schematu na rys. 2.

Ze względów aparaturowych nie było możliwe przeprowadzenie równoległego przetwarzania analogowo-cyfrowego wszystkich składowych sygnału, opisujących przestrzeń sygnału. Przetwarzania dokonywano więc kolejno, pasmami. Ponieważ mogło to doprowadzić do pewnych niezgodności poszczególnych składowych w czasie, zdecydowano, że chwilowa wartość miary sygnału w przestrzeni sygnału będzie reprezentowana nie przez pojedynczy punkt, lecz przez zbiór punktów, odpowiadający pewnemu krótkiemu odcinkowi czasu. Długość tego odcinka dobrano w taki sposób, by przy zadanym poziomie istotności z pewnością $p = 0,99$ odcinek ten spełniał warunki stacjonarności. Wskutek przyjęcia takiego założenia istnieje praktycznie pewność, że trend czasowy występujący w sygnale nie będzie odczuwalny "wewnątrz" takiego odcinka realizacji tego sygnału.

Ostatecznie więc zmienność badanego sygnału w czasie była odwzorowywana w przestrzeni sygnału jako sekwencja obszarów tej przestrzeni, opisanych parametrami n -wymiarowego rozkładu normalnego.

3.2. Wzorzec działania obiektu badanego (pieca łukowego) w przestrzeni sygnału akustycznego

Aby umożliwić rozpoznawanie stanów pieca łukowego poprzez analizę przestrzeni sygnału, konieczne było przeprowadzenie grupowania elementów przestrzeni sygnału wg obszarów, wydzielonych w przestrzeni stanów i odpowiadających fazom działania pieca łukowego.

Dla opisu utworzonych w przestrzeni sygnału akustycznego klas decyzyjnych wykorzystano ponownie parametry statystyczne, a więc macierz wartości średnich i macierz kowariancji danej klasy. W takiej notacji formalny zapis i-tej klasy decyzyjnej w przestrzeni sygnału jest następujący:

Nr klasy	macierz średnich μ_i	macierz kowariancji Σ_i
i	$\begin{array}{c} x_{i1} \\ x_{i2} \\ \dots \\ x_{in} \end{array}$	$\begin{array}{ccc} s_{i11} & s_{i12} & s_{i1n} \\ s_{i21} & s_{i22} & s_{i2n} \\ \dots & \dots & \dots \\ s_{in1} & s_{in2} & s_{inn} \end{array}$

Dla kontroli jakości przeprowadzonego grupowania elementów przestrzeni sygnału wykorzystano kryterium minimalnego ryzyka błędnej klasyfikacji, tzn. przyporządkowania chwilowej wartości miary sygnału do niewłaściwej klasy decyzyjnej. Kryterium to pozwala także na przeprowadzenie optymalizacji przestrzeni sygnału drogą eliminowania tych współrzędnych, które nie mają istotnego wpływu na wartość miary kryterium, co można interpretować jako słabą zdolność odwzorowania interesujących nas elementów przestrzeni stanów obiektu badanego.

Dowodzi się [5], że ryzyko błędnej klasyfikacji P spełnia nierówność

$$P \leq \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{L-1} \sum_{j>i}^L Q_{ij} = \frac{1}{2} Q'$$

gdzie:

Q_{ij} - miara podobieństwa klas decyzyjnych o indeksach "i" i "j", nosząca nazwę wskaźnika Bhattacharyya; wg definicji

$$Q_{ij} = E[P(x_1|y) P(x_2|y)]^{\frac{1}{2}},$$

$P(x_1|y), P(x_2|y)$ - warunkowe prawdopodobieństwa przynależności wektora danych dla klas oznaczonych symbolami x_1 i x_2 .

Istnieje estymator wskaźnika Bhattacharyya [3]

$$\hat{Q}_{ij} = (2\pi)^{-\frac{N}{2}} 2^{-\frac{1}{4}m} \frac{5}{6} \left[\sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m \exp\left(-\frac{1}{4}m \frac{2}{3N} d^2(y_1^i, y_k^j)\right) \right]^{\frac{1}{2}},$$

gdzie:

N - liczba cech opisujących klasyfikowane obiekty,

L - liczba klas w przestrzeni decyzyjnej,

m - liczba elementów zbiorów uczących,

$d^2(y_1^i, y_k^j)$ - metryka Euklidesa pomiędzy i -tym przykładem elementu z i -tej klasy i k -tym przykładem elementu z klasy o indeksie j .

3.3. Wnioskowanie o przyporządkowaniu aktualnej wartości wektora sygnału do klasy decyzyjnej

Mając gotowy opis wzorca działania pieca łukowego w przestrzeni sygnału akustycznego możemy dla wykorzystania go zastosować metody tzw. rozpoznawania cech.

Metody te pozwalają na automatyzację klasyfikacji danych i polegają na obliczaniu pewnych "odległości" chwilowego wektora danych do wyodrębnionych uprzednio klas decyzyjnych, przy czym o przyporządkowaniu decyduje ekstremalna wartość zbioru takich miar. W omawianych badaniach wykorzystano tzw. miarę Bhattacharyya, opisaną zależnością [1]:

$$\Psi_{ij} = \frac{1}{8}(\mu_i - \mu_j)^T \sum_{ij}^{-1} (\mu_i - \mu_j) + \frac{1}{2} \ln \left\{ \frac{\det \Sigma_{ij}}{[\det \Sigma_i \det \Sigma_j]^{\frac{1}{2}}} \right\}$$

$$\sum_{ij} = 0,5(\Sigma_i + \Sigma_j).$$

Algorytm wnioskowania o stanie pieca łukowego na podstawie analizy efektu akustycznego wygląda wówczas następująco:

- pobierana jest "próbka" sygnału, opisana składowymi przestrzeni sygnału,
- próbka jest porównywana z klasami decyzyjnymi wzorca działania pieca łukowego w przestrzeni sygnału, przy czym o przyporządkowaniu do i-tej klasy decyduje minimalna wartość miary Bhattacharyya,
- podejmowana jest decyzja: w danej chwili piec łukowy znajduje się w fazie działania, opisaną i-tą klasą wzorca w przestrzeni stanów.

4. PODSUMOWANIE

W toku prowadzonych badań potwierdzona została prawdziwość tezy o możliwości wnioskowania o działaniu pieca łukowego na podstawie analizy emitowanego sygnału akustycznego. Należy jednak brać pod uwagę ograniczenia takiego wnioskowania, wynikające przede wszystkim z losowości stosowanego do uzyskiwania informacji sygnału.

LITERATURA

- [1] Kailath T.: The Divergence and Bhattacharyya Distance Measures in Signal Selection, IEEE Trans. Commun. Techn. vol. COM-15, No 1, February 1967, pp. 52-60.
- [2] Kaźmierczak J.: Hałas elektrostalowniczych pieców łukowych. Ochrona Zdrowia Hutnika 1/79, Katowice 1979.
- [3] Lainiotis D.G.: A Class of Upper Bounds on Probability of Error for Multihypothesis Pattern Recognition. IEEE Trans. Inform. Theory, vol. IT-15, November 1969, pp. 730-731.
- [4] Makomaski M., Kaźmierczak J.: Investigations concerning the means and ways of reducing noise emitted by an electric arc furnace for the smelting of steel. Proceedings of 76 NCC, Warszawa 1976.
- [5] Sobczak W., Malina W.: Metody selekcji informacji. WNT, Warszawa 1978.

ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПРЕДЛОЖЕНИЯ
РЕШЕНИЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ДЕЙСТВИЯ ДУГОВОЙ ПЕЧИ НА ОСНОВЕ
АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

Р е з ю м е

В статье рассматривается часть исследований, которые были проведены в рамках проблемы № MR.I.24, Целью этих исследований было использование акустического шума дуговой печи для автоматического предложения решений о действии этого машинного комплекса. Применение метода предложения было взято из области распознавания образов.

AN EXAMPLE OF THE APPLICATION OF METHODS FOR THE AUTOMATIC DECISION
TAKING IN THE CONTROL OF AN ELECTRIC ARC FURNACE FUNCTIONING
ON THE GROUND OF EMITTED ACOUSTIC SIGNAL

S u m m a r y

The paper reports some parts of investigations which have been carried out under the problem MR.I.24. These investigations concerned the application of the acoustic signal of an arc furnace for the automatic decision taking about the functioning of this machine complex. The used methods were taken from the field of so-called pattern recognition.