

Robert STRĄKOWSKI¹, Krzysztof PACHOLSKI², Bogusław WIĘCEK¹, Robert OLBRYCHT¹, Wacław WITTCHEN³, Mariusz BORECKI³

¹ INSTYTUT ELEKTRONIKI, POLITECHNIKA ŁÓDZKA, ul. Wólczańska 211/215, 90-924 Łódź

² INSTYTUT SYSTEMÓW INŻYNIERII ELEKTRYCZNEJ, POLITECHNIKA ŁÓDZKA, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź

³ INSTYTUT METALURGII ŻELAZA IM. STANISŁAWA STASZICA, ul. K. Miarki 12, 44-100 Gliwice

Program do wyznaczania statystycznych cech promiennych żuźła stalowniczego

Mgr inż. Robert STRĄKOWSKI

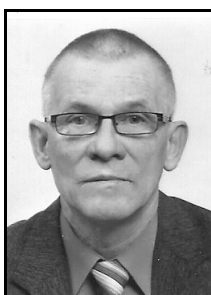
Ukończył Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki Politechniki Łódzkiej (2010). Obecnie doktorant w Zakładzie Układów Elektronicznych i Termografii PŁ. Jego zainteresowania naukowe obejmują przetwarzanie sygnałów i obrazów z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji oraz budowa systemów elektronicznych do przetwarzania danych w czasie rzeczywistym.



e-mail: strakowski.robert@gmail.com

Dr hab. inż. Krzysztof PACHOLSKI

Krzysztof Pacholski zatrudniony jest na stanowisku profesora nadzwyczajnego w Instytucie Systemów Inżynierii Elektrycznej Politechniki Łódzkiej. Główne obszary działalności naukowej to przetworniki i systemy pomiarowe wielkości elektrycznych i nieelektrycznych, pomiary biomedyczne w zakresie oceny negatywnych skutków oddziaływania pola elektromagnetycznego na człowieka oraz mechatronika samochodowa.



e-mail: krzysztof.pacholski@p.lodz.pl

Prof. dr hab. inż. Bogusław WIĘCEK

Bogusław Więcek jest kierownikiem Zakładu Termografii i Układów Elektronicznych w Instytucie Elektroniki Politechniki Łódzkiej. Specjalizuje się w dziedzinie termografii komputerowej i modelowaniu zjawisk termicznych w elektronice. Jest członkiem komitetu naukowego największej na świecie konferencji poświęconej termowizji – Quantitive Infrared Thermography. W kraju Bogusław Więcek organizuje co 2 lata konferencję „Termografia i Termometria w Podczuwaniu” – TTP.



e-mail: boguslaw.wiecek@p.lodz.pl

Dr inż. Robert OLBRYCHT

Robert Olbrycht jest zatrudniony na stanowisku adiunkta. Dotychczas opublikował 33. prace naukowe, jest współautorem dwóch patentów. Uczestniczył w realizacji 3. projektów badawczych finansowanych ze środków NCN oraz MNiSW. Zajmuje się problematyką korekcji parametrów metrologicznych kamer termowizyjnych i przetwarzania obrazów.



e-mail: robert.olbrycht@p.lodz.pl

Inż. Wacław WITTCHEN

Specjalista badawczo techniczny w Zakładzie Badań Procesów Surowcowych Instytutu Metalurgii Żelaza w Gliwicach. Jest Absolwentem Wydziału Metalurgicznego Politechniki Śląskiej. W pracy zawodowej zajmuje się głównie wykorzystywaniem techniki termowizyjnej w różnych dziedzinach głównie w hutnictwie. Autor lub współautor ponad stu prac badawczych i ekspertyz inżynierskich oraz kilkudziesięciu publikacji z zakresu stalownictwa a w szczególności wykorzystania termowizji.



e-mail: wwittchen@imz.pl

Dr inż. Mariusz BORECKI

Ukończył wydział Metalurgii Politechniki Śląskiej. Adiunkt w Zakładzie Badań Procesów Surowcowych Instytutu Metalurgii Żelaza w Gliwicach. Autor i współautor ponad stu prac badawczych z zakresu stalownictwa, zagospodarowania odpadów hutniczych, komputerowego wspomaganie technologii, wykorzystania termowizji w hutnictwie oraz kilkudziesięciu publikacji naukowych.



e-mail: mborecki@imz.pl

Streszczenie

W artykule opisano oprogramowanie pozwalające na wyznaczenie promiennych parametrów statystycznych, które wraz z emisyjnością charakteryzują skład chemiczny żuźła stalowniczego pojawiającego się podczas spustu stali z pieca hutniczego. Wartości tych parametrów wyznaczone są za pomocą obróbki statystycznej obrazów strugi rejestrowanych podczas spustu stali za pomocą wielospektralnego komputerowego systemu pomiarowego wykorzystującego dwie kamery termowizyjne (średnio i długofalową) oraz cyfrowy aparat fotograficzny rejestrujący zdjęcia w pasmie światła widzialnego.

Słowa kluczowe: żużel stalowniczy, emisyjność, termowizja, system wielospektralny.

Software for steel slag statistical analysis

Abstract

The authors have applied thermovision in iron and steel industry, where basing on the analysis of the recorded sequence of thermograms it is possible to estimate the FeO content in the slag during the process of steel discharge from a converter to a ladle. Not only mid and long wavelength infrared cameras are required for this purpose but also appropriate software dedicated for analysis of the recorded thermal images. This paper describes such a software (Figs. 3, 4) created especially for this purpose, enabling qualitative and quantitative analysis of FeO content in the slag.

The software enables determination of radiative statistical parameters that (alongside with emissivity) characterize chemical ingredients of the steel slag discharged from the converter with molten steel. The values of the above mentioned parameters are determined by the statistical analysis of thermograms recorded with a multispectral computer measurement system containing two thermal cameras and one vision-range camera. This analysis is performed with the developed algorithms (Fig. 5) using neural network approach (Fig. 6). The obtained results are promising as the software managed to properly assess the FeO content in 27 test cases (Fig. 7).

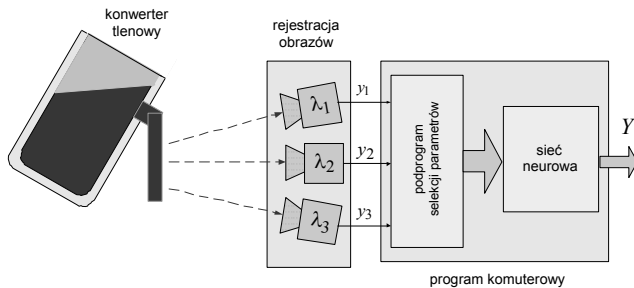
Keywords: steel slag, emissivity, thermography, multispectral system.

1. Wprowadzenie

W procesie metalurgicznym wytopu stali w agregatach hutniczych, w wyniku reakcji wypalania składników wsadu, tworzy się żużel o charakterze utleniającym. Podczas spustu stali z konwertora tlenowego do kadzi w pierwszej kolejności wypływa stal, a następnie żużel, który jest produktem ubocznym. Parametry żuźła stalowniczego pojawiającego się podczas spustu stali z konwertora do kadzi mają istotny wpływ na dalszy proces wytwarzania wyrobów stalowych. Szczególne znaczenie ma zawartość FeO w żuźlu świadcząca o stopniu jego przetlenienia a więc i o jakości stali [1, 2].

Do oceny zawartości FeO w żuźlu stalowniczym pojawiającym się podczas spustu stali z konwertora tlenowego autorzy pracy

proponują wykorzystanie systemu wizyjnego i termalnego, pracujących w różnych zakresach widma promieniowania elektromagnetycznego [3, 4]. W systemie tym do rejestracji termogramów spustu stali i żużła z konwertera wykorzystane są dwie kamery termowizyjne: niechłodzoną długofalową λ_1 (7,5..13,0 μm - FLIR SC 660) i chłodzoną średniofalową λ_2 (3..5 μm - CEDIP Titanium) oraz cyfrowy aparat fotograficzny λ_3 (NIKON D5100) - rys. 1.



Rys. 1. Schemat blokowy systemu pomiarowego do oceny zawartości FeO w żużlu stalowniczym (λ_1, λ_2 kamery termowizyjne odpowiednio długo i średniofalowa, λ_3 - aparat cyfrowy)

Fig. 1. Block diagram of the measurement system for estimation of FeO content in steel slag (λ_1, λ_2 long and mid-wavelength thermal cameras respectively, λ_3 - digital single lens reflex camera)

Autorzy artykułu przyjęli, że głównymi parametrami promiennymi żużła, charakteryzującymi zawartość FeO w jego składzie [5, 6, 7], są emisyjności wyznaczone na podstawie pomiarów termalnych w zakresie średnio (3.5 μm) i długofalowym (7,5..13,0 μm) widma promieniowania podczerwonego oraz na podstawie pomiarów temperatury spustu zmierzonej bezpośrednio za pomocą lancy pomiarowej [1]. Oprócz emisyjności do oszacowania zawartości FeO w żużlu wykorzystali dodatkowe parametry statystyczne, których wartość wyznaczyli dla prostokątnego fragmentu termogramów i zdjęć wykonanych cyfrowym aparatem fotograficznym, który mieści się w strudze spustu i zawiera co najmniej 400 pikseli. Obszar ten w artykule nazywany jest obszarem zainteresowania.

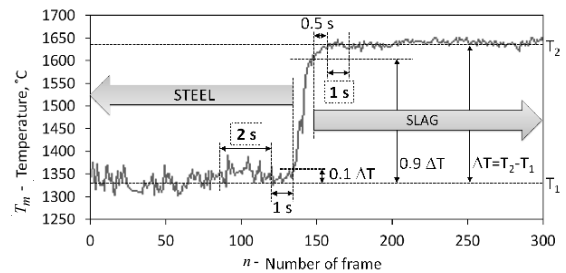
W systemie przedstawionym na rys. 1 do oszacowania zawartości FeO w żużlu stalowniczym przeznaczona jest sieć neuronowa zaimplementowana w pamięci komputera. Wektor wejściowy tej sieci tworzą emisyjności żużła oraz odpowiednio wyselekcjonowane dodatkowe parametry statystyczne. Do wyznaczania wartości i selekcji tych parametrów przeznaczony jest program selekcji parametrów *Slagizer*[®] opracowany w środowisku MATLAB. Program ten pozwala również na oszacowanie zawartości FeO w żużlu stalowniczym. Opis działania programu *Slagizer*[®] jest przedmiotem artykułu.

2. Szacowanie FeO w żużlu na podstawie parametrów promiennych

Wyznaczenie wartości emisyjności żużła oraz wyznaczenie wartości oraz wyselekcjonowanie odpowiedniej liczby dodatkowych statystycznych parametrów promiennych wymagało stworzenia odpowiedniej bazy danych pomiarowych. Elementami tej bazy są termogramy oraz zdjęcia w zakresie światła widzialnego zarejestrowane w trakcie 25 wytopów stali.

Do wyznaczenia dodatkowych parametrów promiennych niezbędna jest wstępna obróbka danych pomiarowych. W tym celu operator systemu pomiarowego dla wszystkich termogramów oraz dla wszystkich zdjęć fotograficznych każdego spustu stali i żużła wyznacza referencyjne chwile czasowe $t_{0,1}$ i $t_{0,9}$, szerokość czasowych okien pomiarowych spustu stali t_s i spustu żużła t_2 oraz przesunąć tych okien względem chwil czasowych $t_{0,1}$ i $t_{0,9}$. Wymienione parametry czasowe wyznaczyć należy na podstawie przebiegu czasowego funkcji $f_{max}(n)$ maksymalnej temperatury lub sygnału odpowiadającego maksymalnej intensywności promieniowania w danym zakresie dla wszystkich n ramek sekwencji

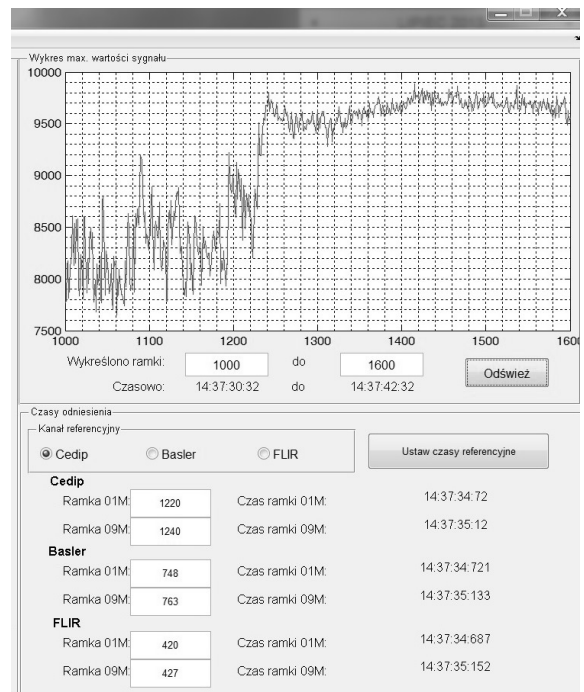
spustu z konwertera tlenowego. Przykład przebiegu czasowego maksymalnej temperatury każdej ramki jednego spustu przedstawia rys. 2.



Rys. 2. Przebieg maksymalnej wartości radiacyjnej temperatury stali i żużła mierzony przy pomocy kamery termowizyjnej w dziedzinie czasu; na rysunku wskazano sposób wyznaczania okien czasowych do analizy

Fig. 2. The plot of the maximum steel and slag radiative temperature value measured with a thermal camera in the time domain; the way of determining the time windows for analysis is shown in the figure

Na podstawie zmiany wartości funkcji $f_{max}(n)$ wyznaczane są numery ramek spustu odpowiadające końcowi spustu stali ($t_{0,1}$) oraz początkowej fazie spustu żużła ($t_{0,9}$). W chwili $t_{0,1}$ funkcja $f_{max}(n)$ osiąga wartość $T_1 + 0.1 \cdot \Delta T$ a chwili $t_{0,9}$ funkcja ta przyjmuje wartość $T_1 + 0.9 \cdot \Delta T$, gdzie $\Delta T = T_2 - T_1$ - rys. 3.



Rys. 3. Okno interfejsu użytkownika programu *Slagizer*[®] do określania referencyjnych chwil czasowych $t_{0,1}$ i $t_{0,9}$

Fig. 3. The window of *Slagizer*[®] software for determination of reference time instants $t_{0,1}$ and $t_{0,9}$

Przyczyną skokowej zmiany temperatury spustu zarejestrowanej przez kamery jest wartość emisyjności żużła, która jest większa od wartości emisyjności stali, nawet przy jednakowej wartości temperatury stali i żużła mierzony bezpośrednio u wylotu z konwertera. Zróżnicowanie wartości emisyjności stali i żużła jest przyczyną skokowej zmiany ilości ciepła wypromieniowanego drogą radiacyjną przez strugę spustu, co rejestrują wszystkie kanały multispektralnego systemu pomiarowego. Definiując maksymalną średnią temperaturę stali podczas spustu jako T_1 i maksymalną średnią temperaturę żużła jako T_2 , definiujemy referencyjne chwile czasowe.

Po wyznaczeniu referencyjnych chwil czasowych następuje selekcja ramek do analizy dla danego kanału. Ramki stali wybierane

są ze zdefiniowanego okna czasowego (t_s), którego koniec wyznaczony przez opóźnienie $t_{\Delta s}$, jako chwila $t=t_{0,1}-t_{\Delta s}$. Analogicznie wyznaczane jest okno pomiarowe żużla o czasie trwania t_z , które zaczyna się w chwili czasowej $t=t_{0,9}+t_{\Delta z}$. Dla przedstawionego na rysunku 2. wykresu parametry czasowe wynoszą: $t_s=2s$, $t_{\Delta z}=1s$, $t_{\Delta z}=0,5s$, $t_z=1s$.

Opisana procedura wyboru referencyjnych chwil czasowych może być przeprowadzona tylko dla jednego z kanałów pomiarowych. W stworzonym oprogramowaniu *Slagizer*® zaimplementowano możliwość automatycznej selekcji okien pomiarowych dla pozostałych kanałów. Oprogramowanie wyszukuje w sekwencji obrazów ramek o czasie akwizycji najbardziej zbliżonym do już określonych czasów $t_{0,1}$, $t_{0,9}$ i oznacza je jako ramki referencyjne dla danego kanału. Ostatecznie ilość ramek, które zawiera dane okno pomiarowe, może różnić się dla poszczególnych kanałów. Związane jest to w szybkością akwizycji danych użytych urządzeń pomiarowych. Powyżej opisaną procedurę wyboru ramek opracowano w celu porównania wyników analizy cech promiennych żużla stalowniczego dla wielu wytopów.

Oprócz analizy czasowej sekwencji ramek (termogramów) każdego spustu operator systemu musi zdefiniować dla każdego kanału region zainteresowania, który poddany zostanie analizie. Związane jest to z różnym parametrem kąta widzenia optyki urządzeń wchodzących w skład multispektralnego systemu pomiarowego, a także ich różnymi pozycjami podczas pomiarów w hucie stali. Zaznaczony region zainteresowania mający kształt prostokąta powinien obejmować obszar pomiędzy otworem spustowym konwertora tlenowego, a krawędzią kadzi. Procedura ta powinna być przeprowadzona po wyznaczeniu referencyjnych chwil czasowych i okien pomiarowych. W związku ze zmiennym kształtem strugi podczas spustu, użytkownik powinien zadbać aby dla każdej ramki w oknie pomiarowym cała struga została objęta zdefiniowanym regionem zainteresowania. Na podstawie zdefiniowanego regionu oprogramowanie dokonuje automatycznej detekcji obszaru samej strugi żużla i stali dla każdej ramki okna pomiarowego. Istnieje możliwość wyświetlenia wyników algorytmu detekcji strugi i modyfikacji jego parametrów jeżeli działa on niepoprawnie. Użytkownik ma możliwość zmiany takich parametrów jak: górny i dolny próg sygnału detekcji strugi oraz typ, kształt i rozmiar elementów strukturujących używanych w operacjach morfologicznych. Dodatkowo w oprogramowaniu zaimplementowano możliwość przedłużenia wykrytego obszaru strugi w dół na daną szerokość określoną w pikselach od osi strugi. Przy użyciu tej opcji operator programu może powiększyć obszar analizy nie biorąc pod uwagę gorących ścian kadzi, które przy automatycznej detekcji bez określenia regionu zainteresowania zostałyby włączone do obszaru strugi. Przykładowy wynik detekcji w oknie graficznego interfejsu użytkownika oprogramowania *Slagizer*® przedstawiono na rys. 4.

Po wstępnej obróbce następuje analiza danych pomiarowych i obliczanie cech promiennych żużla stalowniczego. W tym celu uruchamiany jest moduł obliczania cech oprogramowania *Slagizer*®, który za pomocą informacji wprowadzonych przez operatora w poprzednim etapie dokonuje ekstrakcji wszystkich ramek pomiarowych i detekcji obszaru strugi. Następnie dla każdego okna pomiarowego, każdego kanału obliczane są dwa zestawy parametrów: pierwotne i wtórne. Parametry pierwotne opisują statystycznie rozkład temperatury/sygnału w obszarze strugi i obliczane są dla pojedynczej ramki obrazu.

Obliczane parametry pierwotne to: wartość średnia ($P_{1,fi}$), mediana ($P_{2,fi}$), dominanta ($P_{3,fi}$), wartość minimalna ($P_{4,fi}$), wartość maksymalna ($P_{5,fi}$), wariancja ($P_{6,fi}$), odchylenie standardowe ($P_{7,fi}$), skośność ($P_{8,fi}$), kurtoza ($P_{9,fi}$), stosunek mediany do średniej ($P_{10,fi}$), entropia ($P_{11,fi}$), wartość średnia 100 pikseli o największej intensywności promieniowania ($P_{12,fi}$), wartość minimalna 100 pikseli o największej intensywności promieniowania ($P_{13,fi}$), współczynniki a i b prostej trendu zmian wartości intensywności promieniowania wzdłuż strugi spustu uśrednionego dla każdego wiersza jej obszaru ($P_{14,fi}$ i $P_{15,fi}$). Efektem obliczenia

parametrów pierwotnych są wektory ich wartości opisujące zmiany każdego parametru w czasie trwania okna pomiarowego.



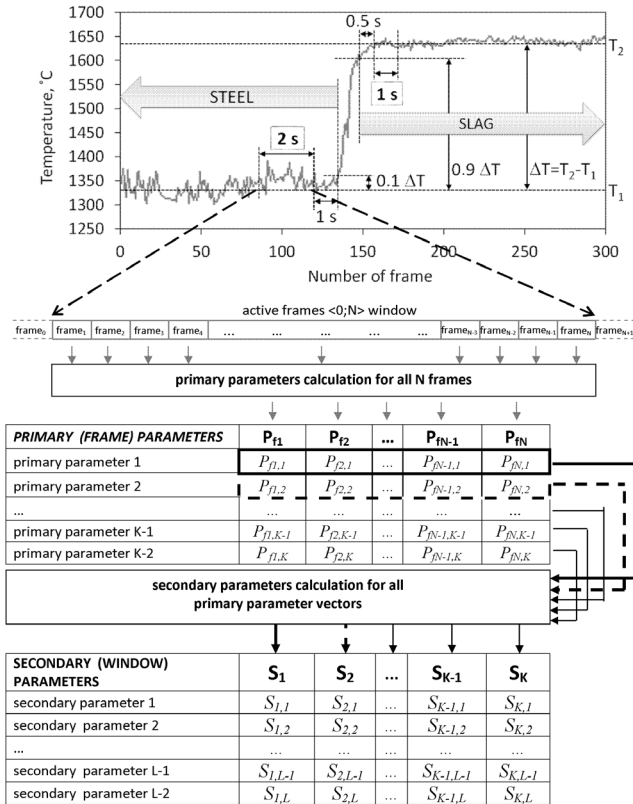
Rys. 4. Okno interfejsu użytkownika programu *Slagizer*® do określania obszaru strugi oraz ustawiania parametrów jej progowania

Fig. 4. The window of *Slagizer*® software for determination and thresholding of the region of interest covering the discharged stream

Parametry wtórne obliczane są jako cechy opisujące zmiany każdego z parametrów pierwotnych dla każdego okna pomiarowego danego wytopu. Obliczane parametry pierwotne to: wartość średnia ($S_{1,k}$), mediana ($S_{2,k}$), wartość maksymalna ($S_{3,k}$), minimalna ($S_{4,k}$), wariancja ($S_{5,k}$), odchylenie standardowe ($S_{6,k}$), kurtoza ($S_{7,k}$), stosunek mediany do średniej ($S_{8,k}$), suma modułów zmian wartości parametru ($P_{fi,k}$) pomiędzy kolejnymi ramkami ($S_{9,k}$), średnia modułów zmian wartości parametru ($P_{fi,k}$) pomiędzy kolejnymi ramkami ($S_{10,k}$), wariancja modułów zmian wartości parametru ($P_{fi,k}$) pomiędzy kolejnymi ramkami ($S_{11,k}$). Parametry wtórne nie są obliczane dla kanału pomiarowego aparatu fotograficznego pracującego w świetle widzialnym. Dla każdej składowej RGB do analizy wzięto pod uwagę tylko 2. zdjęcia (stal i żużel), co wynika z szybkości akwizycji urządzenia oraz skutkuje brakiem możliwości opisanie zmian parametrów pierwotnych w czasie.

Po wyznaczeniu parametrów wtórnych dla obu okien pomiarowych pojedynczego wytopu obliczana jest macierz wtórnych parametrów różnicowych, której wartości równe są różnicy parametrów wtórnych okna stali i okna żużla. Końcowym wynikiem procedury jest 1080. parametrów będącymi cechami promiennymi żużla stalowniczego dla analizowanego wytopu. Dodatkowo do każdego wytopu dodawane są dwa parametry emisyjności. Algorytm wyznaczania pierwotnych i wtórnych statystycznych parametrów promiennych wyjaśnia rys. 5.

Danymi wejściowymi do sieci neuronowej jest maksymalnie 10. wyselekcjonowanych parametrów spośród obliczonych 1080 cech promiennych oraz wyznaczone emisyjności rzeczywiste z dwóch kanałów spektralnych (średnio- i długofalowego). W celu selekcji cech najbardziej dyskryminujących zawartość FeO obliczany jest współczynnik korelacji pomiędzy zawartością tlenku żelaza w próbce, a wartościami każdego parametru dla wszystkich wytopów. Dodatkowo obliczana jest wzajemna korelacja wszystkich wyznaczonych cech promiennych. Użytkownik ma możliwość wyboru sposobu obliczania współczynnika korelacji metodą Pearsona (korelacja liniowa) lub Spearmana (korelacja monotoniczna) [8]. Ostateczny wybór parametrów podanych na wejścia sieci neuronowej przebiega dwuetapowo. Pierwszym etapem jest selekcja cech o wartości współczynnika korelacji większej od ustalonego P_{FeO} . Następnie spośród wszystkich wybranych parametrów wybierane są te, których wzajemna korelacja jest mniejsza od ustalonej P_{rank} .



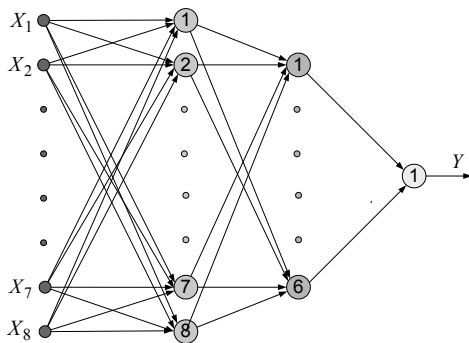
Rys. 5. Metodyka wyznaczania statystycznych parametrów pierwotnych i wtórnych żużla stalowniczego

Fig. 5. The methodology of determining the primary and secondary statistical parameters of the steel slag

Wstępne testy oszacowania zawartości FeO w żużlu przeprowadzono za pomocą jednokierunkowej trójwarstwowej sieci neuronowej, której wektor wejściowy tworzyły dwie emisyjności średnio i długofalowa oraz 6 dodatkowych parametrów statystycznych wybranych automatycznie dla współczynników korelacji $p_{FeO}=0,55$ oraz $p_{rank}=0,45$.

Testowana sieć miała 8 neuronów wejściowych, 6 neuronów ukrytych i 1 neuron wyjściowy (rys. 6). Funkcje aktywacji wszystkich neuronów sieci miały przebieg log-sigmoidalny [9, 10].

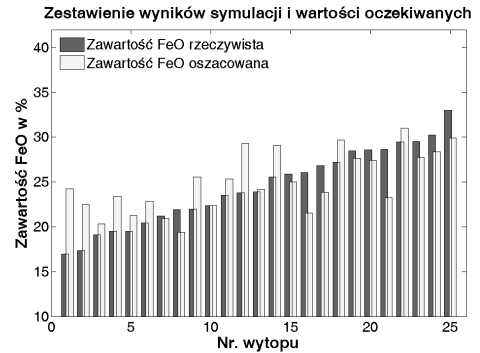
Sieć perceptronową z rys. 6 uczono metodą wstecznej propagacji błędu [11]. Zbiór wektorów uczących stanowiły parametry wszystkich wytopów pomniejszone o wektor jednego wytopu. Brakujący wektor wykorzystano do testowania prawidłowego doboru wag sieci. Dla każdego z zarejestrowanych spustów wykonano 10. symulacji uczenia i testowania. Wynik końcowy szacowania zawartości FeO w żużlu stalowniczym dla danego wytopu został obliczony jako średnia z 10. wykonanych symulacji.



Rys. 6. Trójwarstwowa sieć neuronowa

Fig. 6. A three layer neural network

Po 27. symulacjach uczenia sieci bezwzględny, średni błąd wyznaczania zawartości FeO w żużlu dla wszystkich wytopów wyrażony w punktach procentowych osiągnął wartość 2,63%. Porównanie rzeczywistych (zmierzonych w laboratorium chemicznym) wartości FeO w żużlu z wartościami wyznaczonymi za pomocą opisywanego w artykule programu zostało pokazane na rys. 7.



Rys. 7. Zestawienie rzeczywistych wartości FeO w żużlu z wartościami wyznaczonymi za pomocą opisywanego w artykule programu

Fig. 7. The collation of real FeO content values in the slag with the values obtained with the software presented in this paper

3. Podsumowanie

Planowane są kolejne testy działania sieci jednokierunkowej w celu poprawy skuteczności jej działania z modyfikacją liczby i typów parametrów wejściowych, liczby neuronów w warstwie ukrytej oraz z funkcjami aktywacji neuronów o innym przebiegu niż log-sigmoidalny. Badana będzie również sieć radialna.

4. Literatura

- [1] Różański P., Wittchen W., Borecki M., Pogorzalek J. Smolec B.: Opracowanie uproszczonej metody szacowania zawartości FeO w żużlu konwertorowym, Sprawozdanie IMŻ Nr S0-0673/BS/2008.
- [2] Wittchen W., Borecki M., Pogorzalek J.: Określenie możliwości wspomagania technologii wytapiania stali w oparciu o współczynnik emisyjności żużla stalowniczego, Sprawozdanie IMŻ Nr S0-0647/BS/2007.
- [3] Więcek B., De Mey G.: Termowizja w podczerwieni, Wydawnictwo PAK, 2011.
- [4] Minkina W., Dudzik S.: Infrared thermography – errors and uncertainties, John Wiley & Sons Ltd, Chichester 2009 r.
- [5] Więcek B., Świętczak T., Olbrycht R., Wittchen W., Borecki M.: Badania emisyjności żużla stalowniczego w zakresie podczerwieni MWIR i LWIR, PAK, nr 11/2009, str. 914-918.
- [6] Wiecek M., Strakowski R., Wiecek B., Olbrycht R., Świętczak T., Wittchen W., Borecki M.: Estimation of steel slag parameters using thermal imaging and neural networks classification, 10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography, QIRT2010, Quebec, Laval University, 2010.
- [7] Strand J., Nakajima K., Eriksson R., Jonsson P.: A Mathematical Model to Study Liquid Inclusion Behavior at the Steel-Slag Interface, ISIJ International, vol. 45 (2005) No 12 s. 1838-1847.
- [8] Best D.J., Roberts D.E.: Algorithm AS 89: The Upper Tail Probabilities of Spearman's rho, Applied Statistics, 1975, 24:377-379.
- [9] Osowski S.: Metody i narzędzia eksploracji danych. Warszawa, Wydawnictwo BTC, 2013.
- [10] Matlab® Statistic Toolbox User's Guide, Version 7.2, The Mathworks.
- [11] Tadeusiewicz R.: Sieci neuronowe, Akademicka Oficyna Wydawnicza, Warszawa 1993, ISBN 83-85769-03-X.

otrzymano / received: 19.06.2013

przyjęto do druku / accepted: 01.08.2013

artykuł recenzowany / revised paper