

Adam GLOWACZ
Andrzej GLOWACZ
Zygryd GLOWACZ

RECOGNITION OF MONOCHROME THERMAL IMAGES OF SYNCHRONOUS MOTOR WITH THE APPLICATION OF QUADTREE DECOMPOSITION AND BACKPROPAGATION NEURAL NETWORK

ROZPOZNAWANIE MONOCHROMATYCZNYCH OBRAZÓW CIEPLNYCH SILNIKA SYNCHRONICZNEGO Z ZASTOSOWANIEM KWADRATOWO-DRZEWOWEJ DEKOMPOZYCJI I SIECI NEURONOWEJ*

Technological progress and decreasing prices of thermographic cameras make their application to monitoring and assessing a technical state of machines is profitable. In article is described the recognition method of imminent failure conditions of synchronous motor. The proposed approach is based on a study of thermal images of the rotor. Extraction of relevant diagnostic information coded in thermal images is important for diagnosing of machine. It can be performed with the use of selected methods of analysis and recognition of images. Studies were carried out for two conditions of motor with the application of quadtree decomposition and backpropagation neural network. The experiments show that the method can be useful for protection of synchronous motor. Moreover, this method can be used to diagnose equipments in steelworks and other industrial plants.

Keywords: Maintenance, recognition, thermal images, synchronous motor, neural network.

Postęp techniczny i malejące ceny kamer termowizyjnych sprawiają, że ich zastosowanie do monitorowania i oceny stanu technicznego maszyn jest opłacalne. W artykule opisano metodę rozpoznawania stanów przedawaryjnych silnika synchronicznego. Proponowane podejście jest oparte na badaniu obrazów cieplnych wirnika. Ekstrakcja istotnej informacji diagnostycznej zakodowanej w obrazach cieplnych jest ważna dla diagnozowania maszyny. Zabieg taki może być wykonany z użyciem wybranych metod analizy i rozpoznawania obrazów. Przeprowadzono badania dla dwóch stanów silnika z zastosowaniem kwadratowo-drzewowej dekompozycji i sieci neuronowej z algorytmem wstecznej propagacji błędów. Eksperymenty pokazują, że metoda może być przydatna do zabezpieczania silników synchronicznych. Ponadto metoda może być stosowana do diagnozowania urządzeń w hutach i innych zakładach przemysłowych.

Słowa kluczowe: Eksploracja, rozpoznawanie, obrazy cieplne, silnik synchroniczny, sieć neuronowa.

1. Introduction

Thermography is a non-invasive, safe and modern technique of thermal visualisation. Every object on the earth generates infrared radiation. The intensity and spectrum distribution of this radiation depends on the temperature of the mass and the radiation properties of its surface layer. Thermographic camera is able to detect this type of radiation, even small changes in temperature can be accurately monitored. Afterwards recorded data are computer-processed and shown in the form of temperature maps that provide for a detailed analysis of the temperature field. Thermographic camera measures the infrared radiation emitted from an object. This camera shows an image of these temperature differences. The darker areas are those that radiate less thermal radiation. Radiation is emitted from the surroundings and is reflected by the object. To measure temperature accurately, it is necessary to compensate for the effects of a number of the different radiation sources. This is done automatically by the thermographic camera. The thermographic techniques have found many applications, for example in industry, building, energetics, veterinary medicine.

In animals or humans, changes in vascular circulation result in

an increase or decrease in their tissue temperature. Thermographic process can be used to evaluate the situation in that area of the body. For example, heat generated by inflammation is transmitted to the overlying skin. After that this energy is dissipated as internal energy. Next thermographic camera and special software can measure thermal radiation.

Advantage of this technique is that it does not require physical contact with the object. It enables measuring temperature distribution of surface. There are also some limitations for thermography. Thermal images should be taken for the clear object (free of dirt and moisture). The investigated object should be out of direct sunlight and wind currents [16].

Studies of infrared thermography have been conducted for numerous applications [16]. Infrared thermography is also used in diagnostics of electrical machines. These machines are constructed of steel elements. Thermal and mechanical properties of steel elements were investigated in the literature [12-15, 17, 21, 23, 24, 27, 28, 30-33, 36, 37]. The article describes the method of diagnosis of a synchronous motor. This technique is based on recognition of thermal

(*) Tekst artykułu w polskiej wersji językowej dostępny w elektronicznym wydaniu kwartalnika na stronie www.ein.org.pl

images of the rotor with the application of quadtree decomposition and backpropagation neural network.

2. Process of recognition of thermal images of synchronous motor

The process of recognition of thermal images contains two phases. First of them is patterns creation process (fig. 1).

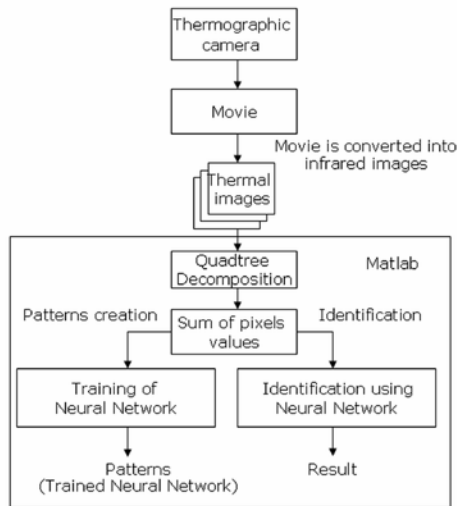


Fig. 1. Process of recognition of thermal image of synchronous motor with the use of quadtree decomposition and neural network

Second phase is identification process. These phases include methods used in image processing. At the beginning of patterns creation process movie is recorded in the computer memory. After that movie is converted into thermal images. These images create training set. Next quadtree decomposition of the image is used. In next step sum of pixels values is calculated. Each sample which is used in patterns creation process gives us one sum of pixels values. This sum of pixels creates feature vector. Next all vectors are used to training of neural network. Steps of identification process are the same as for pattern creation process. Significant change occurs in the classification. In this step neural network is used to identify sample from test set.

2.1. Video recording

All objects emit a certain amount of infrared radiation as a function of their temperatures. Generally the higher an object's temperature is, the more thermal energy this object emits. Thermographic camera can detect this radiation in a way similar to a video camera recording visible light. Thermographic camera can work in darkness because it does not need an external light. Thermographic camera used in experiments was installed 0.25m above rotor of synchronous motor. It recorded images at a resolution of PAL D-1 (640 × 460 pixels) in grayscale with a resolution of 8 bits (values 0–255). Next recorded movie is transferred to a PC. It is stored in permanent memory in AVI format (Audio Video Interleave).

2.2. Acquisition of thermal images

Film with a duration of 1 second has 25 monochrome thermal images. To extract a single thermal image from the movie, a program in a Perl scripting language was implemented. This program uses *mplayer* library. As a result, monochrome thermal images are obtained. Each monochrome image has resolution 256 × 256 pixels.

2.3. Quadtree decomposition of monochrome image

Quadtree decomposition divides a square image into four equal-sized square blocks. Next it analyzes each block to see if it meets criterion of homogeneity [19]. In the event that a square block meets the criterion, it is not divided any further. If it does not meet the criterion, it is subdivided again into four blocks and the criterion is used to those blocks. This process is repeated iteratively until each block meets the criterion. The result can have blocks of several different sizes.

Moreover quadtree decomposition is appropriate primarily for square images whose dimensions are a power of 2, such as 128 × 128, 256 × 256 or 512 × 512. These images can be divided until the blocks are 1 × 1 [19].

Monochrome thermal images of rotor of synchronous motor were presented in figures 2–3.

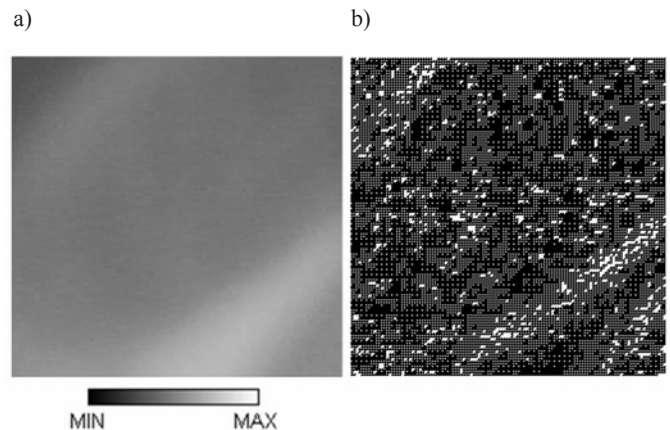


Fig. 2. a) Monochrome thermal image of rotor of faultless synchronous motor, b) Thermal image of rotor of faultless synchronous motor after quadtree decomposition

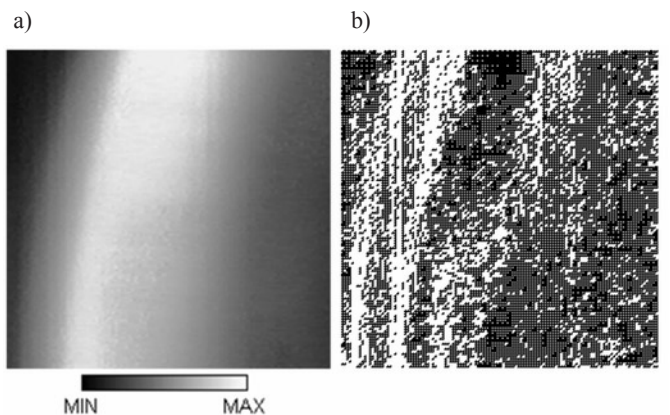


Fig. 3. a) Monochrome thermal image of rotor of synchronous motor with faulty ring of squirrel-cage, b) Thermal image of rotor of synchronous motor with faulty ring of squirrel-cage after quadtree decomposition

2.4. Selection of features

Thermal image contains 256 × 256 pixels. Each pixel has a value from range 1–16 (1 – black pixel, 16 – white pixel). The sum of all pixels values of the image is a feature. This feature creates a feature vector (fig. 4).

Feature vector will be used in classification step.

2.5. Backpropagation neural network

In the literature there are many methods of analysis and recognition [1–11, 18, 20, 22, 25, 26, 29, 35, 38]. The patterns creation process uses feature vectors and backpropagation neural network. Neural

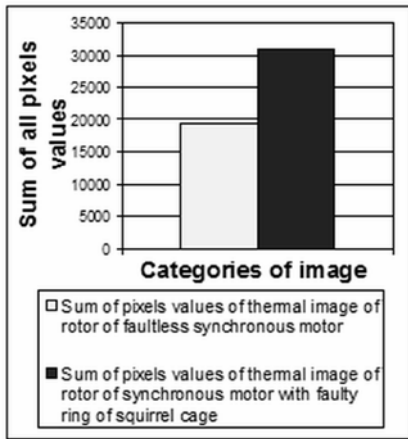


Fig. 4. Sums of pixels values for two categories of thermal images

network consists of many neurons connected by synapses. The learning process of a back-propagation neural network takes place in two phases. In the forward phase, the output of each neuron in each layer and the errors between the actual outputs from the output layer and the target outputs are computed, in the backward phase, weights are modified by the back-propagation errors that occurred in each layer of the network [34]. Structure of backpropagation neural network is shown in figure 5.

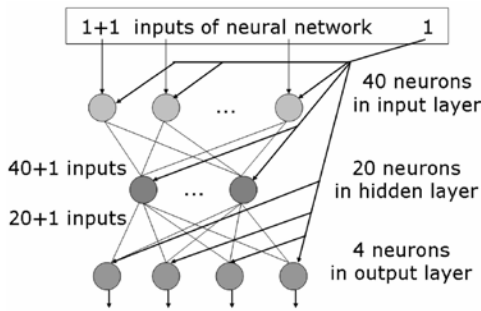


Fig. 5. Structure of backpropagation neural network used in proposed method

During the training of neural network patterns are stored in the form of floating point numbers. System uses character encoding. It converts name of category into the floating-point numbers (ASCII code divided by 128 – vector **a**). Neural network collects the values from all of its input connections (1 feature). After the training of neural network it is necessary to perform the identification process. During identification process floating point values are obtained on the output of neural network (vector **c**).

These four values are converted to ASCII characters. In the identification process the value of the output neuron in the output layer is not equal to the exact value of the character in ASCII code divided by 128. One of the two characters is selected with the help of Manhattan metric (1). This metric calculates the distance defined as:

$$d(\mathbf{c}, \mathbf{a}) = \sum_{i=1}^n (|c_i - a_i|) \quad (1)$$

where **c** and **a** are vectors with the same lengths, $\mathbf{c} = [c_1, c_2, \dots, c_n]$, $\mathbf{a} = [a_1, a_2, \dots, a_n]$.

For example, for the category of recognition “ring” (image of rotor of synchronous motor with faulty ring of squirrel-cage) the following values should be obtained:

$$\begin{aligned} \text{ASCII_CODE (r)} / 128 &= 114 / 128 = 0.890625, \\ \text{ASCII_CODE (i)} / 128 &= 105 / 128 = 0.8203125, \\ \text{ASCII_CODE (n)} / 128 &= 110 / 128 = 0.859375, \\ \text{ASCII_CODE (g)} / 128 &= 103 / 128 = 0.8046875. \end{aligned}$$

New feature vector **y** is assigned to the class w_j when:

$$d(\mathbf{c}, \mathbf{a}_j) = \min_i (d(\mathbf{c}, \mathbf{a}_i)) \Rightarrow \mathbf{y} \rightarrow w_j \quad (2)$$

where $i=1, 2, \dots, M, j=1, 2, \dots, M$,

$\mathbf{a}_i, \mathbf{a}_j$ are vectors containing floating point numbers, **y** is a new feature vector, **c** is a new vector, obtained in the identification process (in output layer), M is the number of classes.

3. Results of thermal image recognition of synchronous motor

Investigations were carried out for two different categories of thermal image of synchronous motor. They are defined as follows: faultless synchronous motor, synchronous motor with faulty ring of squirrel-cage (fig. 6).

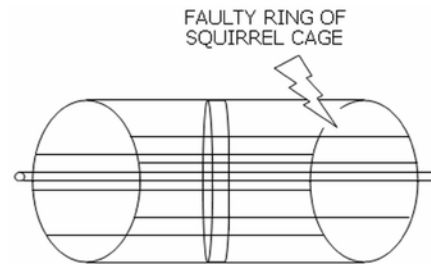


Fig. 6. Faulty ring of squirrel-cage of synchronous motor

Synchronous motor had following operational parameters: faultless synchronous motor, $U = 300 \text{ V}, I = 21.5 \text{ A}$, synchronous motor with faulty ring of squirrel-cage, $U = 300 \text{ V}, I = 77 \text{ A}$, where: U – supply voltage, I – current of one motor phase.

Thermographic camera recorded two movies. These movies contained thermal images of faultless synchronous motor and synchronous motor with failure.

The process of patterns creation was carried out for 20 monochrome thermal images. Identification process was carried out for 80 monochrome thermal images. Efficiency of recognition of thermal image is defined as:

$$T = \frac{K_1}{K} \quad (3)$$

where: T – efficiency of recognition of thermal image, K_1 – number of correctly identified samples, K – number of all samples.

Efficiency of recognition of thermal image of synchronous motor was presented (tab. 1).

Table 1. Results of recognition of thermal images

Kind of thermal image	Efficiency of recognition of thermal image
Faultless synchronous motor	100%
Synchronous motor with faulty ring of squirrel-cage	100%

4. Conclusion

Thermography can generate important information when the possibilities of conventional diagnostic techniques have been exhausted. In this paper authors proposed a method and a system of recognition of thermal images of synchronous motor. Researches involving the use of image processing methods to thermal diagnostics has been carried out for synchronous motor without faults and motor with faulty ring. Results of recognition of thermal images were good for quadtree

decomposition and backpropagation neural network. Efficiency of recognition of thermal images of synchronous motor was 100%. The experiments show that the method can be useful for protection of synchronous motor in steelworks and other industrial plants. A limitation of the method was that the thermographic camera recorded the image of temperature of the surface of the rotor. Further researches should be continued to examine other failures of electrical machines.

Acknowledgments: This work has been partly supported by AGH University of Science and Technology, grant nr 11.11.120.612 (Adam Glowacz). This work has been partly financed under AGH researcher grant in 2013 (Andrzej Glowacz). This work has been partly supported by AGH University of Science and Technology, grant nr 11.11.120.354 (Zygfryd Glowacz).

References

1. Akinci TC, Nogay HS, Yilmaz O. Application of Artificial Neural Networks for Defect Detection in Ceramic Materials. *Archives of Acoustics* 2012; 37 (3): 279–286.
2. Barbato G, Genta G, Germak A, Levi R, Vicario G. Treatment of Experimental Data with Discordant Observations: Issues in Empirical Identification of Distribution. *Measurement Science Review* 2012; 12 (4): 133–140.
3. Dudek-Dyduch E, Tadeusiewicz R, Horzyk A. Neural network adaptation process effectiveness dependent of constant training data availability. *Neurocomputing* 2009; 72 (13–15): 3138–3149.
4. Dudzikowski I, Ciurys M. Analysis of operation of a car starter with BLDC motor. *Przeglad Elektrotechniczny* 2010; 86 (4): 166–169.
5. Glowacz A, Glowacz Z. Diagnostics of induction motor based on analysis of acoustic signals with application of FFT and classifier based on words. *Archives of Metallurgy and Materials* 2010; 55 (3): 707–712.
6. Glowacz A, Glowacz Z. Diagnostics of DC machine based on analysis of acoustic signals with application of MFCC and classifier based on words. *Archives of Metallurgy and Materials* 2012; 57 (1): 179–183.
7. Glowacz A, Glowacz A, Korohoda P. Recognition of Color Thermograms of Synchronous Motor with the Application of Image Cross-Section and Linear Perceptron Classifier. *Przeglad Elektrotechniczny* 2012; 88 (10a): 87–89.
8. Glowacz A, Glowacz A, Glowacz Z. Diagnostics of Direct Current generator based on analysis of monochrome infrared images with the application of cross-sectional image and nearest neighbor classifier with Euclidean distance. *Przeglad Elektrotechniczny* 2012; 88 (6): 154–157.
9. Glowacz W. Diagnostics of Induction motor based on Spectral Analysis of Stator Current with Application of Backpropagation Neural Network. *Archives of Metallurgy and Materials* 2013; 58 (2): 559–562.
10. Glowacz Z, Kozik J. Feature selection of the armature winding broken coils in synchronous motor using genetic algorithm and Mahalanobis distance. *Archives of Metallurgy and Materials* 2012; 57 (3): 829–835.
11. Glowacz Z, Kozik J. Detection of synchronous motor inter-turn faults based on spectral analysis of park's vector. *Archives of Metallurgy and Materials* 2013; 58 (1): 19–23.
12. Godlewski S, Szymonski M. Adsorption and Self-Assembly of Large Polycyclic Molecules on the Surfaces of TiO₂ Single Crystals. *International Journal of Molecular Sciences* 2013; 14 (2): 2946–2966.
13. Golanski G, Slania J. Effect of Different Heat Treatments on Microstructure and Mechanical Properties of the Martensitic GX12CrMoVNbN91 Cast Steel. *Archives of Metallurgy and Materials* 2013; 58 (1): 25–30.
14. Gwozdziejewicz M, Zawilak J. Influence of the rotor construction on the single-phase line start permanent magnet synchronous motor performances. *Przeglad Elektrotechniczny* 2011; 87 (11): 135–138.
15. Kogtenkova O A, Protasova S G, Mazilkin A A, Straumal B B, Zieba P, Czeppe T, Baretzky B. Heat effect of grain boundary wetting in Al-Mg alloys. *Journal of Materials Science* 2012; 47 (24): 8367–8371.
16. Kunc P, Knizkova I, Prikryl M, Maloun J. Infrared Thermography as a Tool to Study the Milking Process: A Review. *Agricultura Tropica et Subtropica* 2007; 40 (1): 29–32.
17. Kulesza G, Panek P, Zieba P. Silicon Solar Cells Efficiency Improvement by the Wet Chemical Texturization in the HF/HNO₃. *Archives of Metallurgy and Materials* 2013; 58 (1): 291–295.
18. Markiewicz M, Skomorowski M. Public Transport Information System for Visually Impaired and Blind People. 10th Conference on Transport Systems Telematics 2010; Katowice; Poland: 271–277.
19. MathWorks – MATLAB and SimuLink for Technical Computing 2013; www.mathworks.com.
20. Mazurkiewicz D. Problems of identification of strength properties of rubber materials for purposes of numerical analysis: a review. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2010; 10 (1): 69–84.
21. Musial D. Numerical Analysis of the Process of Heating of a Bed of Steel Bars. *Archives of Metallurgy and Materials* 2013; 58 (1): 63–66.
22. Olszewski R, Trawinski Z, Wojcik J, Nowicki A. Mathematical and Ultrasonographic Model of the Left Ventricle: in Vitro Studies. *Archives of Acoustics* 2012; 37 (4): 583–595.
23. Orlewski W, Siwek A. Hydroelectric power plant using dump industrial water. *Rynek Energii* 2010; 6: 87–91.
24. Parzych S, Krawczyk J. The Influence of heat treatment on microstructure and tribological properties of resistance butt welds made of a cast bainitic steel. *Archives of Metallurgy and Materials* 2012; 57 (1): 261–264.
25. Pinheiro E, Postolache O, Girao P. Contactless Impedance Cardiography Using Embedded Sensors. *Measurement Science Review* 2013; 13 (3): 157–164.
26. Pribil J, Gogola D, Dermek T, Frollo I. Design, Realization and Experiments with a new RF Head Probe Coil for Human Vocal Tract Imaging in an NMR device. *Measurement Science Review* 2012; 12 (3): 98–103.

27. Romelczyk B, Kulczyk M, Pakiela Z. Microstructure and mechanical properties of fine-grained iron processed by hydroextrusion. Archives of Metallurgy and Materials 2012; 57 (3): 883–887.
28. Smalcerz A. Aspects of Application of Industrial Robots in Metallurgical Processes. Archives of Metallurgy and Materials 2013; 58 (1): 203–209.
29. Sobieszczyk S. Fuzzy reasoning system design and assessment of load-bearing endoprostheses and their fabrication processes. Archives of Metallurgy and Materials 2012; 57 (3): 759–766.
30. Solek K, Trebacz L. Thermo-Mechanical model of steel continuous casting process. Archives of Metallurgy and Materials 2012; 57 (1): 355–361.
31. Sudhakar K V, Konen K, Floreen K. Beta-Titanium biomedical alloy: Effect of thermal processing on mechanical properties. Archives of Metallurgy and Materials 2012; 57 (3): 753–757.
32. Szymanski Z. Application of the Magnetic Field Distribution in Diagnostic Method of Special Construction Wheel Traction Motors. Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, Advanced Computer Techniques in Applied Electromagnetics 2007; 30: 449–456.
33. Szyszkiewicz K, Dziembaj P, Filipek R. Heat Transfer and Inverse Problems; Selected Cases in 1D and 3D Geometries. Archives of Metallurgy and Materials 2013; 58 (1): 9–18.
34. Tadeusiewicz R. Sieci Neuronowe 1993; Akademicka Oficyna Wydawnicza. Warszawa.
35. Tasinkevych Y, Trots I, Nowicki A, Lewandowski M. Optimization of the Multi-element Synthetic Transmit Aperture Method for Medical Ultrasound Imaging Applications. Archives of Acoustics 2012; 37 (1): 47–55.
36. Tkadleckova M, Machovcak P, Gryc K, Michalek K, Socha L, Klus P. Numerical Modelling of Macrosegregation in Heavy Steel Ingot. Archives of Metallurgy and Materials 2013; 58 (1): 171–177.
37. Wlodarczyk R, Wronska A. Effect of pH on Corrosion of Sintered Stainless Steels Used for Bipolar Plates in Polymer Exchange Membrane Fuel Cells. Archives of Metallurgy and Materials 2013; 58 (1): 89–93.
38. Zawilak T. Investigation of higher harmonics in a Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor. Przegląd Elektrotechniczny 2008; 84 (12): 122–125.

Adam GLOWACZ

AGH University of Science and Technology,
Faculty of Electrical Engineering, Automatics, Computer Science and
Biomedical Engineering,
Department of Automatics and Biomedical Engineering
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Krakow, Poland
e-mail: adglow@agh.edu.pl

Andrzej GLOWACZ

AGH University of Science and Technology,
Faculty of Computer Science, Electronics and Telecommunications,
Department of Telecommunications
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Krakow, Poland
e-mail: aglowacz@agh.edu.pl

Zygfryd GLOWACZ

AGH University of Science and Technology,
Faculty of Electrical Engineering, Automatics, Computer Science and
Biomedical Engineering,
Department of Power Electronics and Energy Control Systems,
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Krakow, Poland
e-mail: glowacz@agh.edu.pl

Adam GŁOWACZ

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej,
Katedra Automatyki i Inżynierii Biomedycznej,
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków,
e-mail: adglow@agh.edu.pl

Andrzej GŁOWACZ

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza,
Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji,
Katedra Telekomunikacji,
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków,
e-mail: aglowacz@agh.edu.pl

Zygryd GŁOWACZ

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej,
Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii,
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków,
e-mail: glowacz@agh.edu.pl

Rozpoznawanie monochromatycznych obrazów cieplnych silnika synchronicznego z zastosowaniem kwadratowo-drzewowej dekompozycji i sieci neuronowej

Słowa kluczowe: eksploatacja, rozpoznawanie, obrazy cieplne, silnik synchroniczny, sieć neuronowa

Streszczenie: Postęp techniczny i malejące ceny kamer termowizyjnych sprawiają, że ich zastosowanie do monitorowania i oceny stanu technicznego maszyn jest opłacalne. W artykule opisano metodę rozpoznawania stanów przedawaryjnych silnika synchronicznego. Proponowane podejście jest oparte na badaniu obrazów cieplnych wirnika. Ekstrakcja istotnej informacji diagnostycznej zakodowanej w obrazach cieplnych jest ważna dla diagnozowania maszyny. Zabieg taki może być wykonany z użyciem wybranych metod analizy i rozpoznawania obrazów. Przeprowadzono badania dla dwóch stanów silnika z zastosowaniem kwadratowo-drzewowej dekompozycji i sieci neuronowej z algorytmem wstecznej propagacji błędów. Eksperymenty pokazują, że metoda może być przydatna do zabezpieczania silników synchronicznych. Ponadto metoda może być stosowana do diagnozowania urządzeń w hutach i innych zakładach przemysłowych.

1. Wstęp

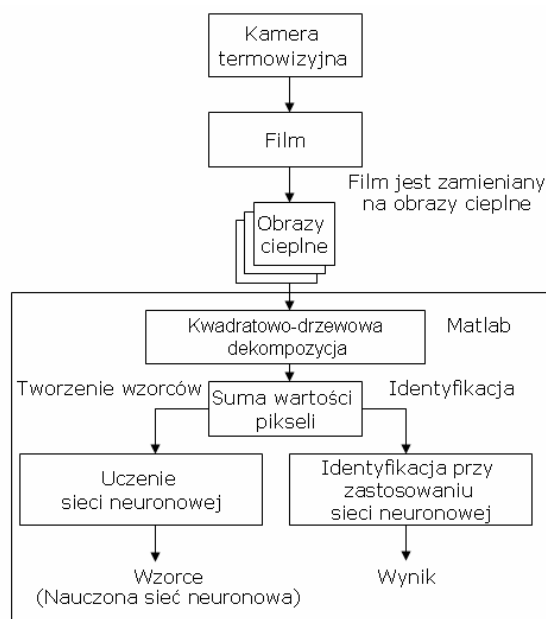
Termowizja jest nieinwazyjną, bezpieczną i nowoczesną techniką cieplnej wizualizacji. Każdy obiekt na ziemi wytwarza promieniowanie podczerwone. Rozkład natężenia i widmo promieniowania zależy od temperatury masy i właściwości promieniowania jego warstwy powierzchniowej. Kamera termowizyjna jest w stanie wykryć ten rodzaj promieniowania, nawet niewielkie zmiany temperatury mogą być dokładnie

monitorowane. Później zapisane dane są przetwarzane przez komputer i wyświetlane w formie map temperatury, które umożliwiają szczegółową analizę pola temperatury. Kamera termowizyjna mierzy promieniowanie podczerwone emitowane przez obiekt. Kamera ta pokazuje obraz różnic temperatur. Ciemniejsze obszary to te, które emitują mniej promieniowania ciepłego. Promieniowanie to jest emitowane z otoczenia i jest odbijane przez obiekt. Aby dokładnie zmierzyć temperaturę, konieczne jest, aby zrekomensować działanie wielu różnych źródeł promieniowania. Odbywa się to automatycznie przez kamerę termowizyjną. Techniki termograficzne znalazły wiele zastosowań, np. w przemyśle, budownictwie, energetyce, czy weterynarii. Przykładowo, u ludzi lub zwierząt, zmiany naczyniowego obiegu powstają w wyniku zwiększenia lub zmniejszenia temperatury tkanki. Proces ten służy do oceny sytuacji w tym obszarze ciała. Ciepło wytwarzane przy stanie zapalnym jest przekazywane do skóry. Energia jest rozpraszana w postaci energii wewnętrznej. Następnie kamera termowizyjna i specjalne oprogramowanie może zmierzyć promieniowanie ciepłe. Zaletą tej techniki jest to, że nie wymaga fizycznego kontaktu z obiektem. Pozwala to na pomiar rozkładu temperatury na powierzchni. Istnieją również pewne ograniczenia dla termografii. Obrazy ciepłe powinny być robione dla czystego obiektu (wolnego od brudu i wilgoci). Badany obiekt powinien być umieszczony z dala od słońca i wiatru [16].

Badania termografii przeprowadzono dla wielu zastosowań [16]. Termografia służy również do diagnostyki maszyn elektrycznych. Maszyny te są wykonane z elementów stalowych. Właściwości termiczne i mechaniczne elementów stalowych badano w literaturze [12-15, 17, 21, 23, 24, 27, 28, 30-33, 36, 37]. W artykule opisano metodę diagnostyki silnika synchronicznego. Technika ta opiera się na rozpoznawaniu ciepłych obrazów wirnika z zastosowaniem kwadratowo-drzewowej dekompozycji i sieci neuronowej.

2. Proces rozpoznawania obrazów ciepłych silnika synchronicznego

Proces rozpoznawania obrazów ciepłych składa się z dwóch etapów. Pierwszy z nich jest to proces tworzenia wzorców (rys. 1).



Rys.1. Proces rozpoznawania obrazu ciepłego silnika synchronicznego z zastosowaniem kwadratowo-drzewowej dekompozycji i sieci neuronowej

Drugi etap to proces identyfikacji. Etapy te zawierają metody używane przy przetwarzaniu obrazu. Na początku procesu tworzenia wzorców film jest zapisywany w pamięci komputera. Film jest przekształcany do obrazów cieplnych, które tworzą zbiór uczący. Następnie jest użyta kwadratowo-drzewowa dekompozycja obrazu. Każda próbka, która jest stosowana w procesie tworzenia wzorców daje jedną sumę wartości pikseli. Ta suma pikseli tworzy wektor cech. Następnie wszystkie wektory są używane do uczenia sieci neuronowej. Kroki procesu identyfikacji są takie same jak dla procesu tworzenia wzorca. Znaczna zmiana następuje w klasyfikacji. W tym kroku sieć neuronowa jest stosowana do identyfikacji próbki z zbioru testowego.

2.1. Nagrywanie filmu

Wszystkie obiekty emitują pewną ilość promieniowania podczerwonego w funkcji ich temperatury. Generalnie wyższa temperatura obiektu oznacza, że obiekt emituje więcej energii cieplnej. Kamera termowizyjna może wykryć to promieniowanie w sposób podobny do kamery wideo, która rejestruje światło widzialne. Kamera termowizyjna może pracować w ciemności, ponieważ nie jest jej potrzebne zewnętrzne oświetlenie. Kamera termowizyjna stosowana w eksperymentach została zainstalowana 0,25 metra powyżej wirnika silnika synchronicznego. Rejestruje ona obrazy w rozdzielczości PAL D-1 (640×460 pikseli) w skali szarości o rozdzielczości 8 bitów (wartości w przedziale 0-255). Następnie nagrany film zostaje przeniesiony do komputera. Film ten jest przechowywany w pamięci masowej w formacie AVI (ang. *Audio Video Interleave*).

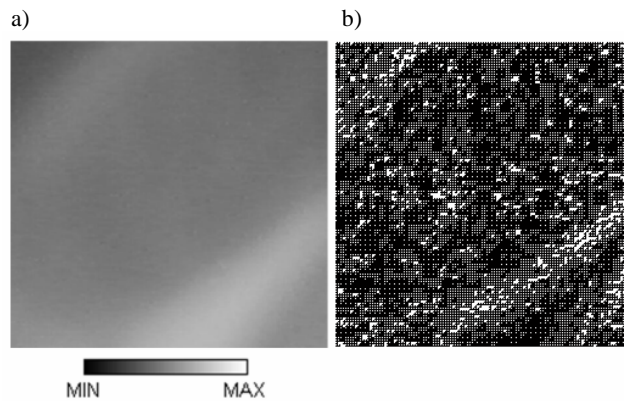
2.2. Otrzymywanie obrazów cieplnych

Film o czasie trwania 1 s zawiera 25 monochromatycznych obrazów termowizyjnych. Aby wyodrębnić pojedynczy obraz cieplny z filmu, program w języku skryptowym Perl został zaimplementowany. Program korzysta z biblioteki *mplayer*. W rezultacie, monochromatyczne obrazy cieplne zostają otrzymane. Każdy obraz monochromatyczny o rozdzielczości 256×256 pikseli.

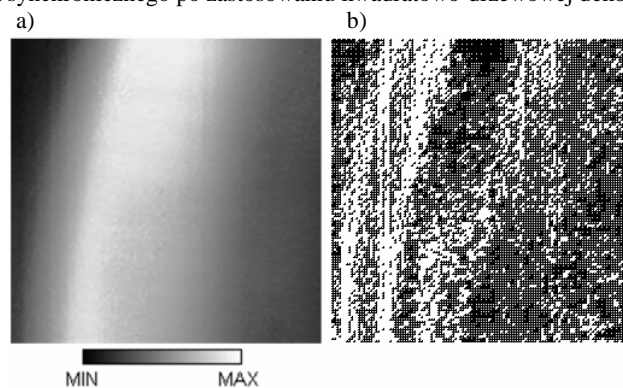
2.3. Kwadratowo-drzewowa dekompozycja obrazu monochromatycznego

Kwadratowo-drzewowa dekompozycja dzieli kwadratowy obraz na cztery równej wielkości bloki kwadratowe. Następnie analizowany jest każdy blok pod kątem spełnienia kryterium jednorodności [19]. W przypadku kwadratowego bloku, który spełnia kryterium, metoda nie dzieli obrazu dalej. Jeśli jednak kryterium nie jest spełnione, wówczas obraz ponownie jest dzielony na cztery bloki. Kolejno kryterium jest stosowane do otrzymanych bloków. Proces ten powtarza się iteracyjnie do momentu, gdy każdy z bloków będzie spełniać kryterium jednorodności. Wynik może zawierać bloki o kilku różnych rozmiarach. Kwadratowo-drzewowa dekompozycja jest odpowiednia dla kwadratowych obrazów, których wymiary są potęgami liczby 2, takich jak 128×128 , 256×256 lub 512×512 . Obrazy te można podzielić do bloków 1×1 [19].

Monochromatyczne obrazy cieplne wirnika silnika synchronicznego przedstawiono na rysunkach 2-3.



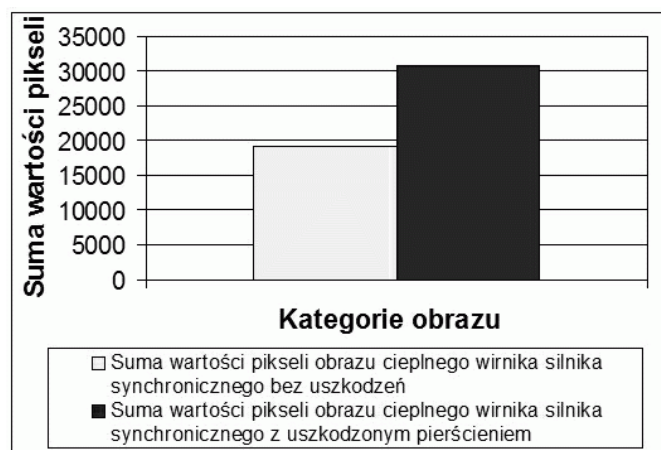
Rys. 2. a) Monochromatyczny obraz cieplny wirnika silnika synchronicznego bez uszkodzeń, b) Obraz cieplny wirnika silnika synchronicznego po zastosowaniu kwadratowo-drzewowej dekompozycji



Rys. 3. a) Monochromatyczny obraz cieplny wirnika silnika synchronicznego z uszkodzonym pierścieniem, b) Obraz cieplny wirnika silnika synchronicznego z uszkodzonym pierścieniem po zastosowaniu kwadratowo-drzewowej dekompozycji

2.4. Wybór cech

Obraz cieplny zawiera 256×256 pikseli. Każdy piksel ma wartość z przedziału od 1 do 16 (1 - czarny piksel, 16 - biały piksel). Suma wszystkich wartości pikseli obrazu jest cechą. Ta cecha tworzy wektor cech (rys. 4).

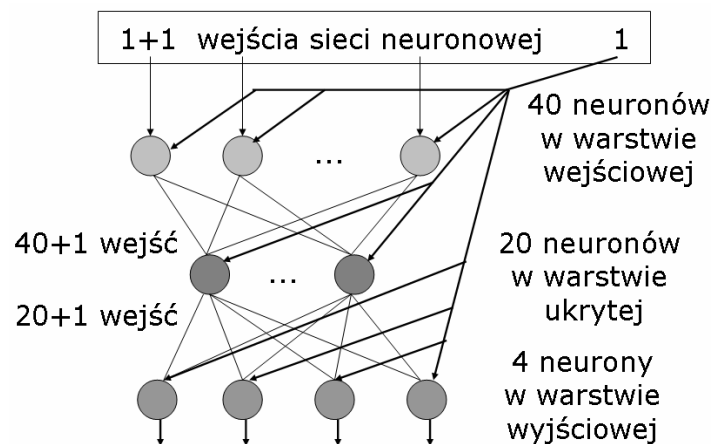


Rys. 4. Sumy wartości pikseli dla dwóch kategorii obrazów cieplnych

Wektor cech będzie używany w kroku klasyfikacji.

2.5. Sieć neuronowa z algorytmem wstecznej propagacji błędów

W literaturze zostało opracowanych wiele metod analizy i rozpoznawania [1-11, 18, 20, 22, 25, 26, 29, 35, 38]. Proces tworzenia wzorców używa wektorów cech i sieci neuronowej z algorytmem wstecznej propagacji błędów. Sieć neuronowa składa się z wielu neuronów połączonych przez synapsy. Stosując algorytm wstecznej propagacji błędów można nauczyć całą sieć, ponieważ każdy neuron warstwy ukrytej albo znajduje się w przedostatniej warstwie sieci i przesyła swoje sygnały do neuronów wyjściowych (wtedy jego błąd może być wyznaczony wyżej podaną metodą) albo znajduje się w jednej z głębiej ukrytych warstw podając sygnały do neuronów innych warstw ukrytych (jego błąd można oszacować z chwilą obliczania błędów w neuronach, które są odbiorcami jego sygnałów). W trakcie etapu uczenia parametry połączeń sieci neuronowej są modyfikowane. Sieć neuronowa, która będzie użyta do rozpoznawania sygnałów akustycznych została przedstawiona na rysunku 5. Struktura sieci jest trójwarstwowa, gdzie każda kolejna warstwa ma coraz mniej neuronów. Jest to typowe podejście stosowane dla sieci neuronowych [34].



Rys. 5. Struktura sieci neuronowej z algorytmem wstecznej propagacji błędów używana w proponowanej metodzie

Podczas uczenia sieci neuronowej wzorce są przechowywane w postaci liczb zmiennoprzecinkowych. System wykorzystuje kodowanie znaków. Przekształca on nazwę kategorii stanu pracy silnika w liczby zmiennoprzecinkowe (kod ASCII podzielony przez 128 – wektor \mathbf{a}). Sieć neuronowa pobiera wartości ze wszystkich swoich połączeń wejściowych (jedna cecha). Po uczeniu sieci neuronowej konieczne jest przeprowadzenie procesu identyfikacji. Podczas procesu identyfikacji wartości zmiennoprzecinkowe są otrzymywane na wyjściach sieci neuronowej (wektor \mathbf{c}). Te cztery wartości są konwertowane do znaków ASCII.

W procesie identyfikacji wartość neuronu wyjściowego w warstwie wyjściowej nie jest równa dokładnie wartości znaku w kodzie ASCII, podzielonej przez 128. Jeden z dwóch znaków jest wybierany przy pomocy metryki Manhattan (1). Ta metryka oblicza odległość wyrażoną wzorem:

$$d(\mathbf{c}, \mathbf{a}) = \sum_{i=1}^n (|c_i - a_i|) \quad (1)$$

gdzie \mathbf{c} i \mathbf{a} są wektorami o tych samych długościach, $\mathbf{c} = [c_1, c_2, \dots, c_n]$, $\mathbf{a} = [a_1, a_2, \dots, a_n]$.

Na przykład dla kategorii rozpoznawania "ring" (obraz wirnika silnika synchronicznego z uszkodzonym pierścieniem) następujące wartości powinny zostać otrzymane:

$$\text{ASCII_KOD (r)} / 128 = 114 / 128 = 0,890625,$$

$$\text{ASCII_KOD (i)} / 128 = 105 / 128 = 0,8203125,$$

$$\text{ASCII_KOD (n)} / 128 = 110 / 128 = 0,859375,$$

$$\text{ASCII_KOD (g)} / 128 = 103 / 128 = 0,8046875.$$

Nowy wektor cech \mathbf{y} jest przydzielany do klasy w_j kiedy:

$$d(\mathbf{c}, \mathbf{a}_j) = \min_i(d(\mathbf{c}, \mathbf{a}_i)) \Rightarrow \mathbf{y} \rightarrow w_j \quad (2)$$

gdzie $i = 1, 2, \dots, M$, $j = 1, 2, \dots, M$; $\mathbf{a}_i, \mathbf{a}_j$ są wektorami zawierającymi liczby zmiennoprzecinkowe, \mathbf{y} jest nowym wektorem cech, \mathbf{c} jest nowym wektorem, otrzymanym w procesie identyfikacji (w warstwie wyjściowej sieci neuronowej), M jest numerem klas.

3. Wyniki rozpoznawania obrazów monochromatycznych silnika synchronicznego

Badania przeprowadzono dla dwóch różnych kategorii obrazów cieplnych silnika synchronicznego. Są one zdefiniowane w następujący sposób: silnik synchroniczny bez uszkodzeń, silnik synchroniczny z uszkodzonym pierścieniem (rys. 6).



Rys. 6. Uszkodzony pierścień klatki wirnika silnika synchronicznego

Silnik synchroniczny miał następujące parametry pracy: silnik synchroniczny bez uszkodzeń, $U = 300 \text{ V}$, $I = 21,5 \text{ A}$, silnik synchroniczny z uszkodzonym pierścieniem klatki wirnika, $U = 300 \text{ V}$, $I = 77 \text{ A}$, gdzie: U - napięcie, I - prąd jednej fazy silnika.

Kamera termowizyjna została użyta do zarejestrowania dwóch nagrań. Filmy te zawierały obrazy cieplne silnika bez uszkodzeń i silnika synchronicznego z uszkodzonym pierścieniem klatki wirnika. Proces tworzenia wzorców przeprowadzono dla 20 monochromatycznych obrazów cieplnych. Proces identyfikacji przeprowadzono dla 80 monochromatycznych obrazów cieplnych. Skuteczność rozpoznawania obrazów cieplnych jest określona jako:

$$T = \frac{K_1}{K} \quad (3)$$

gdzie: T - skuteczność rozpoznawania obrazu cieplnego, K_1 - liczba prawidłowo zidentyfikowanych próbek, K - liczba wszystkich próbek.

Skuteczność rozpoznawania obrazu cieplnego została zaprezentowana poniżej (tab. 1).

Tab. 1. Wyniki rozpoznawania obrazów cieplnych

Rodzaj obrazu cieplnego	Skuteczność rozpoznawania obrazu cieplnego
Silnik synchroniczny bez uszkodzeń	100%
Silnik synchroniczny z uszkodzonym pierścieniem klatki wirnika	100%

4. Wnioski

Termografia może dostarczyć ważnych informacji, gdy możliwości tradycyjnych technik diagnostycznych zostały wyczerpane. W artykule autorzy zaproponowali metodę i system rozpoznawania obrazów cieplnych silnika synchronicznego. Badania obejmujące zastosowanie metod przetwarzania obrazu do diagnostyki cieplnej przeprowadzono dla silnika synchronicznego nieuszkodzonego i silnika z uszkodzonym pierścieniem klatki wirnika. Wyniki rozpoznawania obrazów cieplnych były dobre dla kwadratowo-drzewowej dekompozycji i sieci neuronowej z algorytmem wstecznej propagacji błędów. Skuteczność rozpoznawania obrazów cieplnych silnika synchronicznego wynosiła 100%. Eksperymenty pokazały, że metoda może być przydatna do zabezpieczania silników synchronicznych w hutach i innych zakładach przemysłowych. Ograniczeniem metody było, że kamera termowizyjna rejestrowała tylko temperaturę powierzchni wirnika maszyny. Dalsze badania powinny być kontynuowane do zbadania innych uszkodzeń maszyn elektrycznych.

Podziękowania

Praca była finansowana częściowo ze środków AGH, umowa AGH nr 11.11.120.612 (Adam Głowacz).

Praca została częściowo zrealizowana w ramach grantu dziekańskiego (Andrzej Głowacz) w roku 2013.

Praca była finansowana częściowo ze środków AGH, umowa AGH nr 11.11.120.354 (Zygfryd Głowacz).

Literatura

1. Akinci T C, Nogay H S, Yilmaz O. Application of Artificial Neural Networks for Defect Detection in Ceramic Materials. *Archives of Acoustics* 2012, 37 (3): 279-286.
2. Barbato G, Genta G, Germak A, Levi R, Vicario G. Treatment of Experimental Data with Discordant Observations: Issues in Empirical Identification of Distribution. *Measurement Science Review* 2012, 12 (4): 133-140.
3. Dudek-Dyduch E, Tadeusiewicz R, Horzyk A. Neural network adaptation process effectiveness dependent of constant training data availability. *Neurocomputing* 2009; 72 (13-15): 3138-3149.
4. Dudzikowski I, Ciurys M. Analysis of operation of a car starter with BLDC motor. *Przegląd Elektrotechniczny* 2010; 86 (4): 166-169.
5. Głowacz A, Głowacz Z. Diagnostics of induction motor based on analysis of acoustic signals with application of FFT and classifier based on words, *Archives of Metallurgy and Materials* 2010; 55 (3): 707-712.
6. Głowacz A, Głowacz Z. Diagnostics of DC machine based on analysis of acoustic signals with application of MFCC and classifier based on words. *Archives of Metallurgy and Materials* 2012; 57 (1): 179-183.
7. Głowacz A, Głowacz A, Korohoda P. Recognition of Color Thermograms of Synchronous Motor with the Application of Image Cross-Section and Linear Perceptron Classifier. *Przegląd Elektrotechniczny* 2012; 88 (10a): 87-89.

8. Glowacz A, Glowacz A, Glowacz Z. Diagnostics of Direct Current generator based on analysis of monochrome infrared images with the application of cross-sectional image and nearest neighbor classifier with Euclidean distance. *Przeegląd Elektrotechniczny* 2012; 88 (6): 154-157.
9. Glowacz W. Diagnostics of Induction motor based on Spectral Analysis of Stator Current with Application of Backpropagation Neural Network. *Archives of Metallurgy and Materials* 2013; 58 (2): 561-564.
10. Glowacz Z, Kozik J. Feature selection of the armature winding broken coils in synchronous motor using genetic algorithm and Mahalanobis distance. *Archives of Metallurgy and Materials* 2012; 57 (3): 829-835.
11. Glowacz Z, Kozik J. Detection of synchronous motor inter-turn faults based on spectral analysis of park's vector. *Archives of Metallurgy and Materials* 2013; 58 (1): 19-23.
12. Godlewski S, Szymonski M. Adsorption and Self-Assembly of Large Polycyclic Molecules on the Surfaces of TiO₂ Single Crystals. *International Journal of Molecular Sciences* 2013; 14 (2): 2946-2966.
13. Golanski G, Slania J. Effect of Different Heat Treatments on Microstructure and Mechanical Properties of the Martensitic GX12CrMoVNbN91 Cast Steel. *Archives of Metallurgy and Materials* 2013; 58 (1): 25-30.
14. Gwozdziwicz M, Zawilak J. Influence of the rotor construction on the single-phase line start permanent magnet synchronous motor performances. *Przeegląd Elektrotechniczny* 2011; 87 (11): 135-138.
15. Kogtenkova O A, Protasova S G, Mazilkin A A, Straumal B B, Zieba P, Czepe T, Baretzky B. Heat effect of grain boundary wetting in Al-Mg alloys. *Journal of Materials Science* 2012; 47 (24): 8367-8371.
16. Kunc P, Knizkova I, Prikryl M, Maloun J. Infrared Thermography as a Tool to Study the Milking Process: A Review. *Agricultura Tropica et Subtropica* 2007; 40 (1): 29-32.
17. Kulesza G, Panek P, Zieba P. Silicon Solar Cells Efficiency Improvement by the Wet Chemical Texturization in the HF/HNO₃. *Archives of Metallurgy and Materials* 2013; 58 (1): 291-295.
18. Markiewicz M, Skomorowski M. Public Transport Information System for Visually Impaired and Blind People. 10th Conference on Transport Systems Telematics 2010; Katowice; Poland: 271-277.
19. MathWorks – MATLAB and SimuLink for Technical Computing 2013; www.mathworks.com.
20. Mazurkiewicz D. Problems of identification of strength properties of rubber materials for purposes of numerical analysis: a review. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2010; 10 (1): 69-84.
21. Musial D. Numerical Analysis of the Process of Heating of a Bed of Steel Bars. *Archives of Metallurgy and Materials* 2013; 58 (1): 63-66.
22. Olszewski R, Trawinski Z, Wojcik J, Nowicki A. Mathematical and Ultrasonographic Model of the Left Ventricle: in Vitro Studies. *Archives of Acoustics* 2012; 37 (4): 583-595.
23. Orlewski W, Siwek A. Hydroelectric power plant using dump industrial water. *Rynek Energii* 2010; 6: 87-91.
24. Parzych S, Krawczyk J. The Influence of heat treatment on microstructure and tribological properties of resistance butt welds made of a cast bainitic steel. *Archives of Metallurgy and Materials* 2012; 57 (1): 261-264.
25. Pinheiro E, Postolache O, Girao P. Contactless Impedance Cardiography Using Embedded Sensors. *Measurement Science Review* 2013; 13 (3): 157-164.
26. Pribil J, Gogola D, Dermek T, Frollo I. Design, Realization and Experiments with a new RF Head Probe Coil for Human Vocal Tract Imaging in an NMR device. *Measurement Science Review* 2012, 12 (3): 98-103.
27. Romelczyk B, Kulczyk M, Pakiela Z. Microstructure and mechanical properties of fine-grained iron processed by hydroextrusion. *Archives of Metallurgy and Materials* 2012; 57 (3): 883-887.
28. Smalcerz A. Aspects of Application of Industrial Robots in Metallurgical Processes. *Archives of Metallurgy and Materials* 2013; 58 (1): 203-209.
29. Sobieszczyk S. Fuzzy reasoning system design and assessment of load-bearing endoprostheses and their fabrication processes. *Archives of Metallurgy and Materials* 2012; 57 (3): 759-766.
30. Solek K, Trebacz L. Thermo-Mechanical model of steel continuous casting process. *Archives of Metallurgy and Materials* 2012; 57 (1): 355-361.
31. Sudhakar K V, Konen K, Floreen K. Beta-Titanium biomedical alloy: Effect of thermal processing on mechanical properties. *Archives of Metallurgy and Materials* 2012; 57 (3): 753-757.

32. Szymanski Z. Application of the Magnetic Field Distribution in Diagnostic Method of Special Construction Wheel Traction Motors. *Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, Advanced Computer Techniques in Applied Electromagnetics* 2007; 30: 449-456.
33. Szyszkiewicz K, Dziembaj P, Filipek R. Heat Transfer and Inverse Problems; Selected Cases in 1D and 3D Geometries. *Archives of Metallurgy and Materials* 2013; 58 (1): 9-18.
34. Tadeusiewicz R. *Sieci Neuronowe* 1993; Akademicka Oficyna Wydawnicza. Warszawa.
35. Tasinkevych Y, Trots I, Nowicki A, Lewandowski M. Optimization of the Multi-element Synthetic Transmit Aperture Method for Medical Ultrasound Imaging Applications. *Archives of Acoustics* 2012; 37 (1): 47-55.
36. Tkadleckova M, Machovcak P, Gryc K, Michalek K, Socha L, Klus P. Numerical Modelling of Macrosegregation in Heavy Steel Ingot. *Archives of Metallurgy and Materials* 2013; 58 (1): 171-177.
37. Włodarczyk R, Wronska A. Effect of pH on Corrosion of Sintered Stainless Steels Used for Bipolar Plates in Polymer Exchange Membrane Fuel Cells. *Archives of Metallurgy and Materials* 2013; 58 (1): 89-93.
38. Zawilak T. Investigation of higher harmonics in a Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor. *Przegląd Elektrotechniczny* 2008; 84 (12): 122-125.