

mgr inż. ADAM GŁOWACZ  
Akademia Górniczo-Hutnicza  
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej  
dr inż. ANDRZEJ GŁOWACZ  
Akademia Górniczo-Hutnicza  
Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji  
dr hab. inż. ZYGFRYD GŁOWACZ  
Akademia Górniczo-Hutnicza  
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej

# Diagnostyka generatora prądu stałego oparta na analizie obrazów termowizyjnych z zastosowaniem histogramu obrazu i zmodyfikowanego klasyfikatora opartego na słowach

*Artykuł prezentuje metodę analizy monochromatycznych obrazów termowizyjnych wybranego generatora prądu stałego, uzyskanych za pomocą kamery termowizyjnej i oprogramowania komputerowego. Omówiono badania dla dwóch stanów generatora prądu stałego. Do analizy obrazów zostały zastosowane następujące algorytmy: histogram obrazu i zmodyfikowany klasyfikator oparty na słowach. Przy stosowaniu tych algorytmów wyniki rozpoznawania obrazu były bardzo dobre. Uzyskane efekty potwierdziły poprawność proponowanej metody.*

## 1. WPROWADZENIE

---

W ostatnich latach obserwowany jest rozwój techniki termowizyjnej. Ceny kamer termowizyjnych obniżyły się do poziomu, który pozwala na ich szersze komercyjne zastosowanie (dotychczas było to zastosowanie głównie wojskowe). Technologia może być wykorzystana w wielu systemach przemysłowych, będąc nie tylko uzupełnieniem już istniejących metod, lecz również otwierając zupełnie nowe możliwości analizy i diagnostyki urządzeń, maszyn, budynków, ciepłociągów czy kabli energetycznych. Kamera termowizyjna opiera swoje działanie na zjawisku polegającym na emisji promieniowania podczerwonego przez każde ciało, którego temperatura jest wyższa od temperatury  $-273,15^{\circ}\text{C}$ , czyli w praktyce przez wszystko, co nas otacza. Kamera termowizyjna nie emituje w kierunku mierzonego obiektu żadnego promieniowania, ponieważ wszystkie ota-

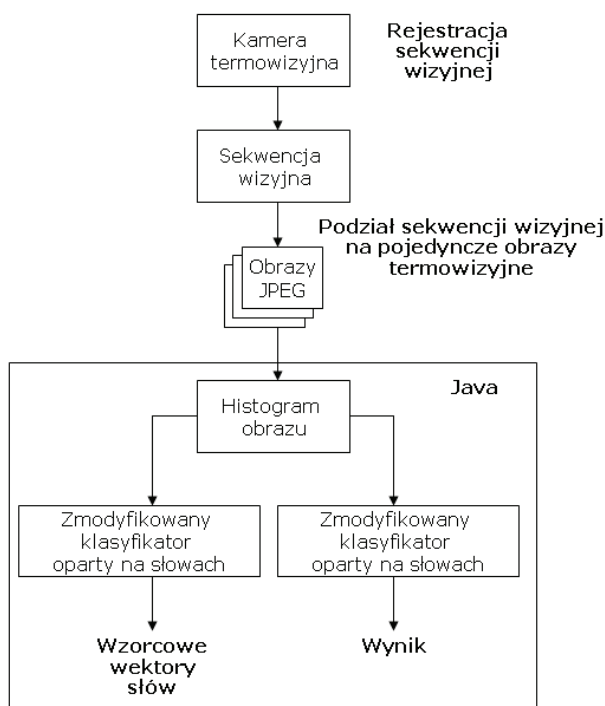
czające nas ciała w sposób naturalny same są źródłem promieniowania podczerwonego [7]. Gdy temperatura przekracza  $700^{\circ}\text{C}$ , to nasze oczy są w stanie zobaczyć promieniowanie podczerwone, np. roztopiona stal ma kolor czerwono-żółty. Wielu znakomych operatorów na walcowniach, odlewniach czy hutach szkła może rozróżnić temperaturę na podstawie barwy. Wiedza ich jest ograniczona do rodzaju materiału i do obiektów o temperaturze wyższej niż  $700^{\circ}\text{C}$ . Poniżej tej temperatury obiekty wysyłają promieniowanie, które jest niewidoczne dla człowieka. Z tego powodu ludzie swoim wzrokiem nie mogą obserwować promieniowania podczerwonego pochodzącego od roślin, zimnej blachy czy betonu, chociaż promieniowanie to jest cały czas wszechobecne. Kamera termowizyjna zamienia wartość temperatury w danym punkcie na powierzchni obiektu na pewien, określony przez inżyniera, kolor; z reguły temperaturze minimalnej odpowiada kolor czarny, natomiast temperaturze maksymalnej – kolor biały.

Termowizja pozwala na badanie silników i generatorów elektrycznych pod napięciem, w czasie pracy, przy pełnym obciążeniu [1, 4, 5 i 10].

W artykule omówiona została metoda analizy monochromatycznych obrazów termowizyjnych wybranego generatora prądu stałego.

## 2. PROCES ROZPOZNAWANIA OBRAZU TERMOWIZYJNEGO GENERATORA

Proces rozpoznawania obrazu termowizyjnego generatora prądu stałego składa się z procesu tworzenia wzorców do rozpoznawania i procesu identyfikacji (rys. 1).



Rys. 1. Proces rozpoznawania obrazu termowizyjnego generatora prądu stałego z zastosowaniem histogramu obrazu i zmodyfikowanego klasyfikatora opartego na słowach [1]

Na początku procesu tworzenia wzorców do rozpoznawania wykonywana jest rejestracja obrazu z zastosowaniem kamery termowizyjnej. Następnie otrzymana sekwencja wizyjna dzielona jest na obrazy termowizyjne. W dalszej kolejności z każdego obrazu termowizyjnego tworzony jest wektor cech (histogram obrazu), a z tego wektora – wektor słów. Wektor słów będzie służył jako wzorec w procesie rozpoznawania. W procesie identyfikacji etapy przetwarzania obrazu termowizyjnego są takie same, jak

dla procesu tworzenia wzorców do rozpoznawania. Istotną zmianą polega na dodaniu etapu klasyfikacji [2, 3, 6, 8 i 9]. W tym etapie porównywane są ze sobą wektory słów (wzorcowy wektor słów z nieznanym wektorem słów nowego obrazu termowizyjnego). W tym celu stosowany jest zmodyfikowany klasyfikator oparty na słowach.

W procesie rejestracji sekwencji wizyjnej zastosowano kamerę termowizyjną, zapisującą obrazy w rozdzielczości PAL D-1 (720×576 pikseli) w skali szarości o rozdzielczości 8 bitów (wartości 0-255). Sekwencje wizyjne były przesyłane do komputera i zapisywane w pamięci w formacie AVI (ang. *Audio Video Interleave*) z użyciem kodeka MJPEG. W badaniach kamera została ustawiona w odległości  $d = 25$  cm od wirnika generatora prądu stałego.

Każda sekunda sekwencji wizyjnej zawierała 24 monochromatyczne obrazy termowizyjne. Aby wydobyc pojedyncze obrazy termowizyjne z sekwencji wizyjnej, przygotowano program w języku skryptowym *Perl*, korzystający z biblioteki multimedialnej *mplayer*. Poszczególne klatki były ekstrahowane i zapisywane w postaci bezstratnej.

## 3. ROZPOZNAWANIE OBRAZU TERMOWIZYJNEGO GENERATORA PRĄDU STAŁEGO

Przedstawiona metoda rozpoznawania obrazu termowizyjnego została zaimplementowana z wykorzystaniem oprogramowania Java. Następnie zbudowano układ pomiarowy, w którym odpowiednio przygotowano stan przedawaryjny. Maszyna prądu stałego pracowała jako generator przy obciążeniu  $R_{obc} = 365$  mΩ. Kamera termowizyjna rejestrowała dwa obrazy – monochromatyczny obraz termowizyjny zezwojów wirnika maszyny prądu stałego bez uszkodzeń i monochromatyczny obraz termowizyjny przy zwarciu zezwojów wirnika (3 zwarte zezwoje ze 126 zezwojów). Zwarcie zostało zlokalizowane w obwodzie wirnika przy prądzie wzbudzenia generatora 3,1 A. Maszyna miała następujące parametry operacyjne:  $P_N = 13$  kW,  $U_N = 75$  V,  $I_{ZW} = 420$  A,  $U_{fN} = 170$  V,  $R_{bz} = 4$  mΩ,

gdzie:

$P_N$  – moc czynna na wirniku,

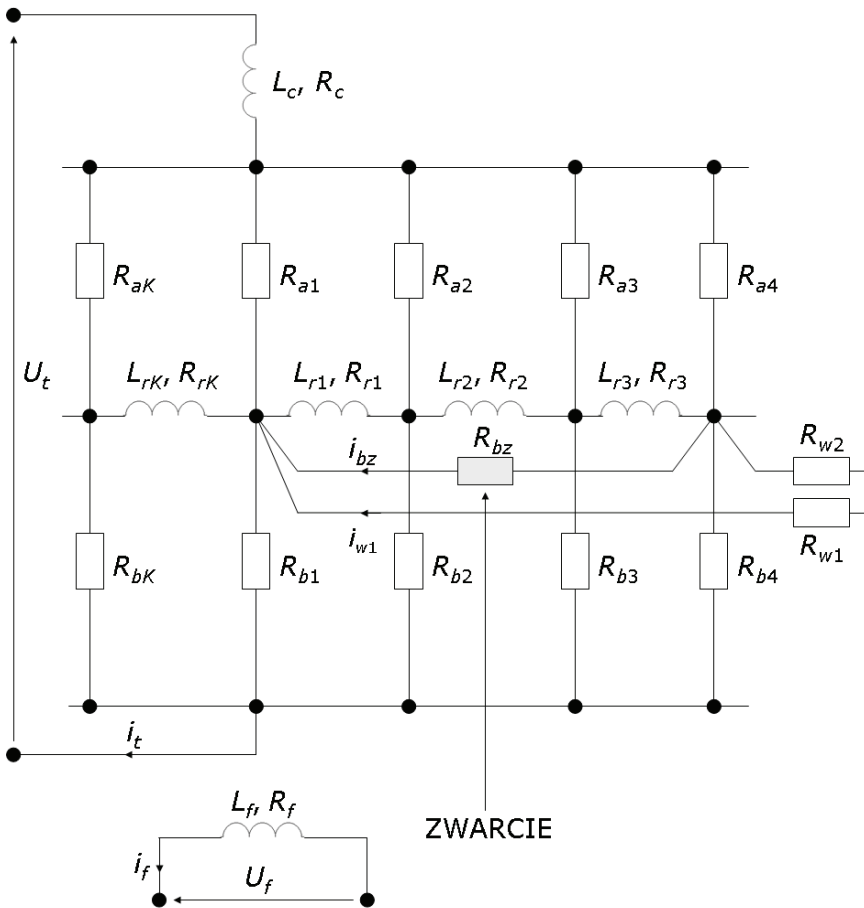
$U_N$  – napięcie generatora badanego,

$I_{ZW}$  – prąd zwarcia,

$U_{fN}$  – napięcie generatora zasilającego,

$R_{bz}$  – rezystancja zwierająca zezwoje.

Schemat badanych uzwojeń wirnika dla generatora prądu stałego ze zwartymi zezwojami został pokazany na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat uzwojeń wirnika generatora prądu stałego ze zwartymi zezwojami [2]

Symbole pokazane na schemacie (rys. 2) oznaczają:  
 $R_{a1}, \dots, R_{aK}, R_{b1}, \dots, R_{bK}$  – rezystancje komutatora,  
 $R_{r1}, \dots, R_{rK}$  – rezystancja zezwojów wirnika,  
 $L_{r1}, \dots, L_{rK}$  – indukcyjność zezwojów wirnika,  
 $L_f$  – indukcyjność uzwojenia wzbudzenia,  
 $R_f$  – rezystancja uzwojenia wzbudzenia,  
 $i_f$  – prąd wzbudzenia,  
 $R_{bz}$  – rezystancja zwierająca,  
 $i_{bz}$  – prąd rezystancji zwierającej,  
 $i_{w1}$  – prąd wyrównawczy w pierwszym połączeniu wyrównawczym,  
 $R_{w1}$  – rezystancja uzwojenia pierwszego połączenia wyrównawczego,  
 $R_{w2}$  – rezystancja uzwojenia drugiego połączenia wyrównawczego,  
 $L_c$  – indukcyjność uzwojenia komutacyjnego,  
 $R_c$  – rezystancja uzwojenia komutacyjnego,  
 $U_t$  – napięcie twornika,  
 $i_t$  – prąd twornika.

Proces tworzenia wzorców do rozpoznawania został przeprowadzony dla 10 monochromatycznych obrazów termowizyjnych, a proces identyfikacji – dla 100 monochromatycznych obrazów termowizyjnych. Każdy wektor cech zawierał 256 współrzędnych.

Skuteczność rozpoznawania obrazu termowizyjnego była zdefiniowana następująco:

$$T = \frac{K_1}{K} \quad (1)$$

gdzie:

$T$  – skuteczność rozpoznawania obrazu termowizyjnego,  
 $K_1$  – liczba poprawnie rozpoznanych obrazów termowizyjnych,  
 $K$  – liczba wszystkich obrazów termowizyjnych w procesie identyfikacji.

Skuteczność rozpoznawania obrazu termowizyjnego dla generatora prądu stałego bez uszkodzeń wynosiła 100%, a dla generatora prądu stałego ze zwartymi zezwojami w obwodzie wirnika była na poziomie 100%.

#### 4. ZMODYFIKOWANY KLASYFIKATOR OPARTY NA SŁOWACH

W zmodyfikowanym klasyfikatorze opartym na słowach przyjęto, że wzorzec to wektor cech

$\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ . Klasy wzorców oznaczono jako  $w_1, w_2, \dots, w_j$ , gdzie indeks  $j$  jest numerem klasy. W procesie użycia zmodyfikowanego klasyfikatora opartego na słowach wyróżnia się dwa etapy: tworzenia wzorców do rozpoznawania oraz identyfikacji.

Podczas etapu tworzenia wzorców do rozpoznawania otrzymywane są wektory cech  $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_j$ . Kolejno każda współrzędna  $x_i$  wektora cech  $\mathbf{x}_j$  jest przekształcana odpowiednio we współrzędną wektora słów  $\mathbf{v}_j$  (współrzędna ta jest pojedynczym słowem reprezentującym pewien przedział wartości):

$$\begin{cases} x_i \in [k, 2k) \Rightarrow x_i \rightarrow v_{i1} \\ x_i \in [2k, 3k) \Rightarrow x_i \rightarrow v_{i2} \\ \dots \\ x_i \in [kg, kg+k) \Rightarrow x_i \rightarrow v_{ig} \end{cases} \quad (2)$$

gdzie:

$k$  jest liczbą rzeczywistą,  $g$  jest liczbą słów,  $v_{ig}$  oznacza słowo,  $x_i$  jest współrzędną wektora cech.

Wektor słów jest oznaczony następująco:  $\mathbf{v}_j = [v_1, v_2, \dots, v_n]$ , gdzie  $v_1, v_2, \dots, v_n$  są kolejnymi współrzędnymi (słowa), które tworzą wektor słów dla  $j$ -tej klasy wzorców. Każda klasa wzorców jest reprezentowana przez kilka wektorów słów. Należy zauważyć, że dla wektora  $\mathbf{v}_j = [v_1, v_2, \dots, v_n]$  słowo  $v_{i1}$  może wystąpić 0 razy lub nawet  $n$  razy. W rozważaniach powinno się przyjąć ograniczoną liczbę słów  $v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{ig}$ , a następnie tak operować parametrem  $k$ , aby uzyskać odpowiednią dokładność.

Identyfikacja nowego wektora cech  $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_n]$  polega na zamianie go na wektor słów  $\mathbf{f} = [f_1, f_2, \dots, f_n]$  i przydzieleniu go do klasy, w której wektor słów  $\mathbf{v}_j$  znajduje się najbliżej otrzymanego wektora słów  $\mathbf{f}$ . Zamiana wektora cech  $\mathbf{y}$  na wektor słów  $\mathbf{f}$  odbywa się dokładnie tak samo, jak zamiana wektora cech  $\mathbf{x}_j$  na wektor słów  $\mathbf{v}_j$ :

$$\begin{cases} y_i \in [k, 2k) \Rightarrow y_i \rightarrow v_{i1} \\ y_i \in [2k, 3k) \Rightarrow y_i \rightarrow v_{i2} \\ \dots \\ y_i \in [kg, kg+k) \Rightarrow y_i \rightarrow v_{ig} \end{cases} \quad (3)$$

gdzie:

$k$  jest liczbą rzeczywistą,  $g$  jest liczbą słów,  $v_{ig}$  oznacza słowo,  $y_i$  jest współrzędną nowego wektora cech.

Zmodyfikowany klasyfikator oparty na słowach używa porównania leksykograficznego. W tym przy-

padku porównywane są dwa łańcuchy znaków (współrzędna wektora słów  $\mathbf{v}_j$  ze współrzędną nowego wektora słów  $\mathbf{f}$ ). Porównanie to jest przeprowadzane w następujący sposób:

$$\begin{array}{c} ? \\ f_1 = v_1 \\ \\ ? \\ f_2 = v_2 \\ \\ \dots \\ ? \\ f_n = v_n \end{array}$$

Wynik każdego jednego porównania jest albo *prawdą* albo *falszem*. Aby określić, która klasa wzorców (kategoria obrazu) powinna być wybrana, wprowadza się następujący wzór:

$$U_j = 100\% \cdot \frac{U_1}{U_2} \quad (4)$$

gdzie:  $U_1$  jest liczbą dobrze porównanych słów dla  $j$ -tej klasy wzorców,  $U_2$  jest liczbą wszystkich porównań (równą liczbie współrzędnych w wektorze słów  $U_2 = n$ ), a  $U_j$  jest liczbą wyrażoną w procentach reprezentującą dobrze rozpoznane słowa dla  $j$ -tej klasy wzorców. Aby uzyskać wynik rozpoznawania obrazu, stosuje się następującą zależność:

$$\max(U_j) \Rightarrow \mathbf{f} \rightarrow w_j \quad j = 1, 2, \dots, M, \quad (5)$$

gdzie:  $\mathbf{f}$  jest nowym wektorem słów, a  $U_j$  jest liczbą reprezentującą dobrze rozpoznane słowa należące do  $j$ -tej klasy wzorców.

Przewiduje się, że największy wpływ na rozpoznawanie histogramu obrazu zmodyfikowanym klasyfikatorem opartym na słowach mają: liczba słów potrzebna do oznaczenia współrzędnych wektora cech i parametr  $k$ . Liczba słów będzie wynosić 260, co stanowi wielkość wystarczającą do rozpoznawania, a parametr  $k$  w ramach prowadzonych badań będzie zmienny.

## 5. WYBÓR CECH OBRAZU TERMOWIZYJNEGO MASZYNY PRĄDU STAŁEGO

Podczas oglądania zdjęć termowizyjnych maszyny prądu stałego można zauważyć różnice wynikające z różnych stanów pracy urządzenia (rys. 3 i 4). Cechy obrazu zostały wybrane na podstawie histogramu. Histogram był wektorem o tylu składowych, ile kolorów mogło wystąpić na obrazie. Wyrażony był on

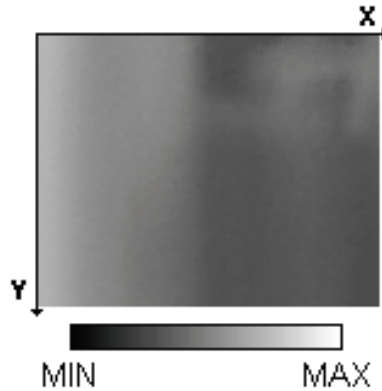
następującym wzorem:

$$H_g = \sum_{w=1}^{L_w} \sum_{k=1}^{L_k} p(g, x_{w,k}) \quad (6)$$

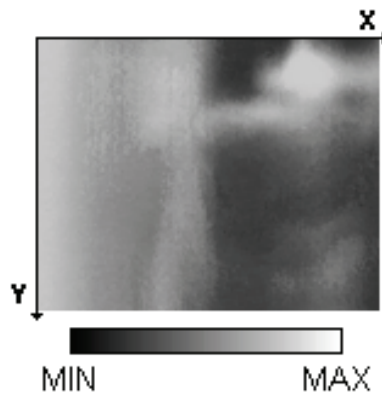
przy czym

$$p(g, x_{w,k}) = \begin{cases} 1 & \text{gdy } x_{w,k} = g \\ 0 & \text{gdy } x_{w,k} \neq g \end{cases} \quad (7)$$

gdzie składowa  $H_g$  wskazuje, ile jest na obrazie pikseli o kolorze  $g = 1, 2, \dots, L_g$ .



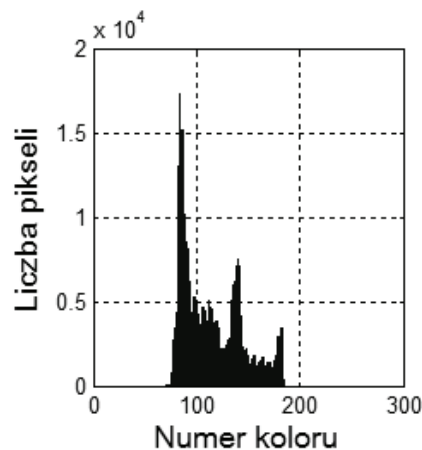
Rys. 3. Monochromatyczny obraz termowizyjny zezwojów wirnika generatora prądu stałego bez uszkodzeń [5]



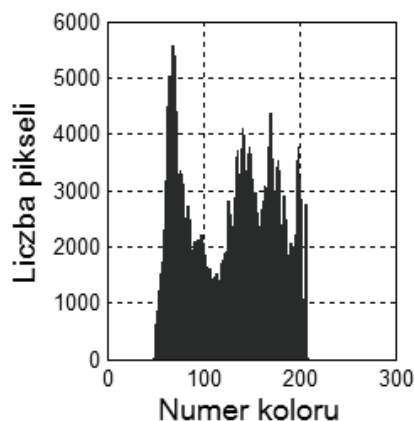
Rys. 4. Monochromatyczny obraz termowizyjny zezwojów wirnika generatora prądu stałego ze zwartymi zezwojami [5]

W przypadku obrazu monochromatycznego kolorów było 256, a zatem wektor cech składał się z 256

wartości (rys. 5 i 6). Wektor ten był stosowany w etapie klasyfikacji.



Rys. 5. Histogram monochromatycznego obrazu termowizyjnego zezwojów wirnika generatora prądu stałego bez uszkodzeń [5]



Rys. 6. Histogram monochromatycznego obrazu termowizyjnego zewojów wirnika generatora prądu stałego ze zwartymi zewojami [5]

Analizując histogramy obrazu przedstawione na rysunkach 5. i 6., można zauważyć wzrost liczby pikseli o kolorach jaśniejszych.

## 6. PODSUMOWANIE

Metoda przedstawiona w niniejszym artykule opiera się na diagnostyce generatora prądu stałego przy użyciu kamery termowizyjnej i oprogramowania komputerowego. Oprogramowanie to jest bardzo przydatne w prowadzeniu eksperymentów, gdyż pozwala analizować obrazy termowizyjne. Do analizy monochromatycznego obrazu termowizyjnego wykorzystane zostały: histogram obrazu i zmodyfikowany klasyfikator oparty na słowach. Przy stosowaniu tych algorytmów wyniki rozpoznawania obrazu termowizyjnego były bardzo dobre. Skuteczność rozpoznawania obrazu termowizyjnego wynosiła 100%.

Metoda ta może być zastosowana do wykrywania uszkodzeń oraz ochrony generatorów i silników. Ponadto termowizja znajduje zastosowanie wszędzie tam, gdzie na podstawie rozkładów temperatury można wnioskować o zachodzących zjawiskach, czyli m.in. w górnictwie, medycynie, elektronice, energetyce, budownictwie, hutnictwie, rolnictwie, ochronie środowiska czy mechanice.

Praca została sfinansowana częściowo ze środków AGH – umowa AGH nr 11.11.120.612 (Adam Głowacz), a częściowo z grantu dziekańskiego przyznanego w roku 2012 (Andrzej Głowacz).

### Literatura

1. Adamczewski W.: *Zastosowania termowizji w diagnostyce urządzeń elektroenergetycznych w budynkach mieszkalnych, przemysłowych, biurowych i użyteczności publicznej*. „Elektroinstalator”, nr 10/2008, s. 83-86.

2. Głowacz Z., Kozik J.: *Selekcja symptomów zwarć uzwojeń twornika silnika synchronicznego z wykorzystaniem algorytmu genetycznego i odległości Mahalanobisa*. „Przegląd Elektrotechniczny”, cz. 88, nr 2, 2012, s. 204-207.
3. Gomółka Z., Kwiatkowski B., Pękala R.: *Bezinwazyjna diagnostyka uzwojeń magnesujących przy użyciu sztucznych sieci neuronowych*. „Przegląd Elektrotechniczny”, cz. 87, nr 8, s. 66-69.
4. Gutten M., Jurcik J., Brandt M., Polansky R.: *Mechanical effects of short-circuit currents analysis on autotransformer windings*. „Przegląd Elektrotechniczny”, cz. 87, nr 7, 2012, s. 272-275.
5. Kowalski C., Wolkiewicz M., Ewert P.: *Analiza zwarć zwojowych stojana silnika indukcyjnego zasilanego z sieci i przemiennika częstotliwości*. „Przegląd Elektrotechniczny”, cz. 84, nr 12, 2008, s. 64-67.
6. Osowski S., Sikorska-Lukasiewicz K.: *PCA transformation and Support Vector Machine for recognition of the noisy images*. „Przegląd Elektrotechniczny”, cz. 88, nr 3a, 2012, s. 4-6.
7. Owen Earl D.: *Thermographic applications and loss control*. Willis North America, 13 Mar 2008.
8. Szczebiot R., Cieślak S.: *Application of genetic algorithm for optimal placement of wind generators in the MV power grid*. „Przegląd Elektrotechniczny”, cz. 87, nr 3, 2011, s. 198-200.
9. Tarasiuk J., Wierzbowski K., Lodini A.: *Use of Genetic Algorithms for Optimisation of Materials Properties*. „Archives of Metallurgy and Materials”, vol. 54, issue 1/2009, pp. 35-39.
10. Internet: <http://www.termowizja.biz> (dostęp: maj 2013).