



Tomasz BOCZAR, Sebastian BORUCKI, Andrzej CICHÓN, Marcin LORENC

Politechnika Opolska, Instytut Elektroenergetyki

Rozpoznawanie wyładowań elektrycznych rejestrowanych metodą emisji akustycznej przy wykorzystaniu sieci neuronowych

Streszczenie. W artykule przedstawiono możliwości zastosowania sztucznych sieci neuronowych do rozpoznawania podstawowych form wyładowań niepełnych (WNZ), rejestrowanych metodą emisji akustycznej (EA), jakie mogą występować w papierowo-olejowych układach izolacyjnych. Scharakteryzowano układ do generacji oraz rejestracji podstawowych form WNZ, a następnie przeprowadzono analizę skuteczności rozpoznawania poszczególnych form WNZ przez zaimplementowaną sieć neuronową.

Abstract. (Application of artificial neural networks for recognition of electrical discharges registered by acoustic emission method). The paper presents possibilities of using the artificial neural network (ANN) for recognition of basic forms of partial discharges (PDs), measured by the acoustic emission method (AE), which can exist in oil-paper insulation systems of power appliances. The authors present the measuring setup and analysis of the AE and show the results of effectiveness of diagnostics of basic forms of PDs by created ANN.

Słowa kluczowe: wyładowania niepełne, metoda emisji akustycznej, sztuczne sieci neuronowe, izolacja papierowo-olejowa.

Keywords: partial discharge, acoustic emission method, artificial neural network, paper-oil insulation.

Wstęp

Poprawna ocena stopnia uszkodzenia izolacji papierowo-olejowej wysokonapięciowych urządzeń elektroenergetycznych, metodą EA, to nie tylko dogłębne poznanie czynników fizycznych i chemicznych mogących wpływać na mierzone sygnały pochodzące od generowanych WNZ, lecz przede wszystkim prawidłowe rozpoznanie i interpretowanie zarejestrowanych sygnałów. Rejestrowane sygnały EA można ściśle powiązać z opisywanymi w literaturze podstawowymi formami WNZ [1,2]. Poszczególne formy WNZ można utożsamiać z rodzajem, jak również ze stopniem uszkodzenia izolacji. Dzięki poprawnemu procesowi rozpoznawania zarejestrowanych sygnałów EA, pochodzących od poszczególnych form WNZ, możliwe jest zidentyfikowanie rodzaju uszkodzenia układu izolacyjnego, jak również dokonanie wstępnej oceny stopnia degradacji tej izolacji.

Dotychczasowe badania i prace dotyczące poprawnego rozpoznawania podstawowych form WNZ opierały się głównie na porównywaniu graficznej reprezentacji wybranych parametrów rejestrowanych sygnałów EA (charakterystyka widma amplitudowego, charakterystyka widmowej gęstości mocy) oraz na analizie deskryptorów je reprezentujących (współczynnik kształtu, współczynnik szczytu, częstotliwość medianowa). Powodowało to znaczne wydłużenie czasu obróbki danych pomiarowych, jak również oceny rodzaju i stopnia uszkodzenia izolacji. Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych w procesie rozpoznawania podstawowych form WNZ, poprzez równoległe przetwarzanie danych, stanowi znaczne przyspieszenie tego procesu, a prowadzone prace badawcze stanowią kolejny krok budowy systemu diagnostycznego, opartego na metodzie EA, pozwalającego na poprawną ocenę stanu izolacji papierowo-olejowej.

Badane formy WNZ

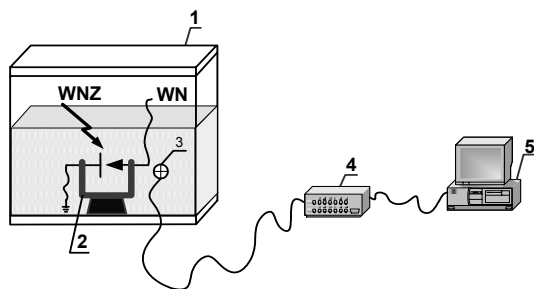
Na podstawie doniesień literaturowych [1,2], jak również własnych prac badawczych, autorzy artykułu wyróżnili następujące podstawowe formy WNZ:

- wyładowania w układzie ostrze-ostrze w oleju, które mogą modelować WNZ powstałe na skutek uszkodzenia izolacji dwóch sąsiadujących zwojów uzwojenia transformatora,

- wyładowania w układzie ostrze-ostrze w oleju z pęcherzykami gazowymi, które mogą modelować WNZ w oleju zagazowanym i spowodowane są uszkodzeniem izolacji dwóch sąsiadujących uzwojeń transformatora,
- wyładowania w układzie ostrze-płyta w oleju, które mogą modelować WNZ występujące między uszkodzoną częścią izolacji uzwojenia transformatora a uziemionymi częściami płaskimi (elementy kadzi),
- wyładowania w układzie powierzchniowym dwóch elektrod płaskich między którymi znajduje się izolacja papierowo-olejowa; najczęstsza forma WNZ występująca w tzw. punkcie potrójnym, w którym powierzchnia elektrody styka się z dielektrykiem stałym i ciekłym,
- wyładowania w układzie powierzchniowym jednej elektrody płaskiej, drugiej wielostrzowej, między którymi znajduje się izolacja papierowo-olejowa; inny rozkład natężenia pola elektrycznego w porównaniu z wyładowaniami w układzie powierzchniowym z dwoma elektrodami płaskimi,
- wyładowania w układzie wielostrze-płyta w oleju, które mogą modelować WNZ występujące między wielopunktowym uszkodzeniem izolacji uzwojenia transformatora a uziemionymi częściami płaskimi (elementy kadzi),
- wyładowania w układzie wielostrze-płyta w oleju z pęcherzykami gazowymi, które mogą modelować WNZ występujące między wielopunktowym uszkodzeniem izolacji uzwojenia transformatora a uziemionymi częściami płaskimi (elementy kadzi), lecz w oleju zawierającym cząsteczki gazowe.

Układ rejestracji sygnałów EA generowanej przez WNZ

Schemat układu do generacji WNZ oraz rejestracji sygnałów EA przedstawiono na rysunku 1. Do generacji przyjętych form WNZ wykorzystano modelujące je iskierniki, które umieszczono w kadzi transformatorowej, wypełnionej olejem elektroizolacyjnym. Iskierniki zasilono napięciem przemiennym, o częstotliwości sieciowej oraz napięciu skutecznym równym $0,8 U_p$ (U_p – napięcie przebicia) każdego z układów.



Rys.1 Schemat układu pomiarowego

1-kadz transformatorowa wypełniona olejem elektroizolacyjnym, 2 - iskiernik modelujący WNZ, 3 - przetwornik pomiarowy, 4 - wzmacniacz i filtr pomiarowy, 5 - komputer z kartą pomiarową

Generowane przez WNZ sygnały EA mierzono, przytwierdzonym do kadzi za pomocą magnetycznego uchwytu, piezoelektrycznym przetwornikiem WD AH17 firmy Physical Acoustics Corporation. Zastosowany przetwornik charakteryzuje się dobrą czułością ($55 \text{ dB} \pm 1,5 \text{ dB}$ w odniesieniu do V/ms^{-1}) oraz szerokim pasmem przenoszenia od 100 kHz do 1 MHz w zakresie $\pm 10 \text{ dB}$ [3].

Dla wzmocnienia sygnału pomiarowego, wyjścia przetwornika WD AH17 połączono z wejściami różnicowymi wzmacniacza AE Signal Conditioner firmy EA System, o stałym wzmocnieniu 40dB i paśmie 0÷1,5 MHz. Dodatkowo układ wyposażony jest w filtr pasmowo-przepustowy o częstotliwościach odcięcia 10 kHz oraz 700 kHz. Zastosowanie filtracji pasmowej jest konieczne ze względu na eliminację sygnałów zakłócających występujących w dolnym i górnym paśmie częstotliwości jak również w celu eliminacji zjawiska aliasingu [4].

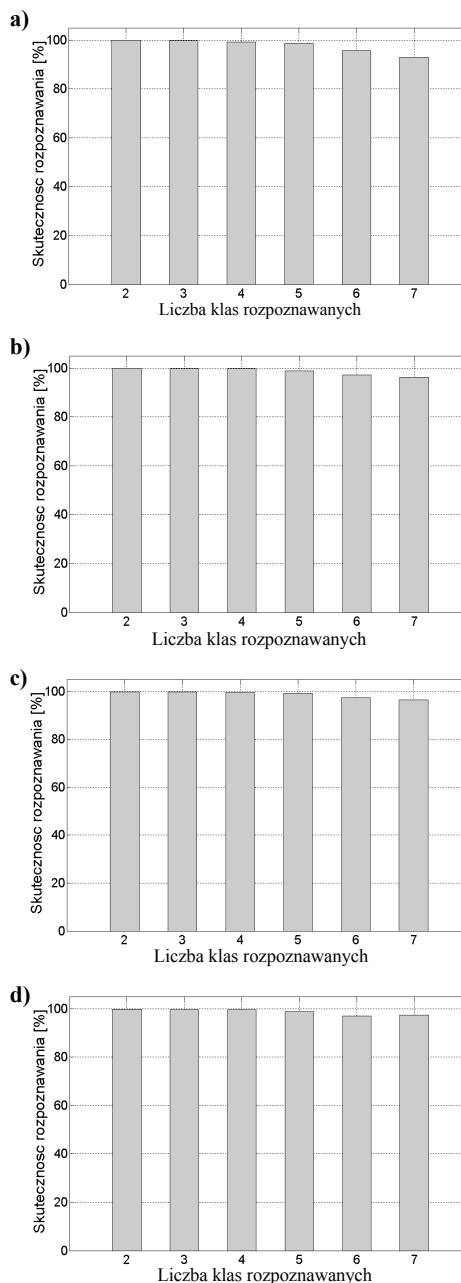
Do obserwacji i rejestracji mierzonych sygnałów EA wykorzystano komputer z kartą pomiarową typu NI 5911 firmy National Instrument oraz specjalistyczne oprogramowanie Virtual Bench Scope. W pomiarach stosowano częstotliwość próbkowania 2,56 MHz, co pozwoliło na zastosowanie 14-bitowej rozdzielczości przetwornika A/C.

Wykorzystanie sieci neuronowej do rozpoznawania poszczególnych form WNZ

Do implementacji, uczenia i testowania sieci neuronowej, wykorzystywanej w procesie rozpoznawania poszczególnych form WNZ, wykorzystano środowisko Matlab. Z uwagi na doniesienia literaturowe [5,6] dotyczące zastosowania sieci neuronowych jako klasyfikatorów i narzędzi rozpoznających wzorce, do badań zaproponowano sieć jednokierunkową, trójwarstwową typu *Feed-Forward Backpropagation Network (F-F BP)*. Dla każdego z neuronów występujących w strukturze sieci określono sigmoidalną funkcję aktywacji. Jako parametr sygnału EA podczas uczenia i testowania sieci zaproponowano widmo gęstości mocy (PSD).

Dla każdej z przyjętych form WNZ zarejestrowano po 100 plików pomiarowych, z czego część plików stanowiła wektory ciągu uczącego (CU), natomiast pozostała część wektory ciągu testowego (CT) – uczenie z nauczycielem. W procesie uczenia i testowania sieci przeprowadzono szereg symulacji, których celem było uzyskanie jak najlepszej skuteczności rozpoznawania przyjętych form WNZ. W artykule przedstawiono fragment prowadzonych badań, a mianowicie dokonano analizy wpływu ilości neuronów w warstwie ukrytej oraz ilość wektorów CU i CT na skuteczność rozpoznawania badanych form WNZ.

W celu określenia skuteczności rozpoznawania przyjętych form WNZ przez zaimplementowaną sieć wprowadzono pojęcie „klasy”, które w tym wypadku określa przyjęte formy WNZ.

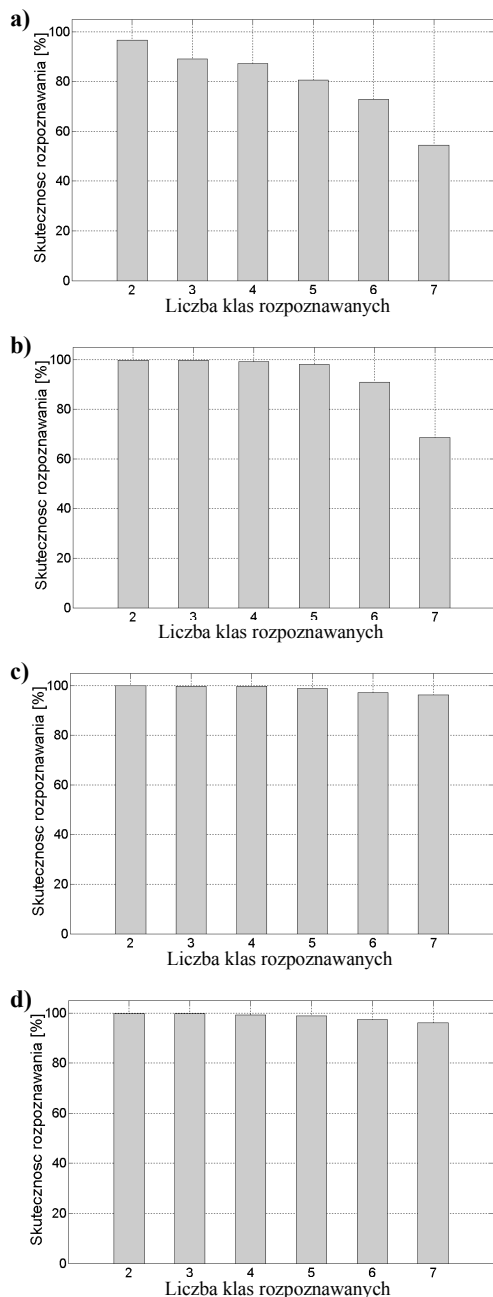


Rys.2 Skuteczność rozpoznawania form WNZ przez zastosowaną sieć w zależności od liczby klas rozpoznawanych, 210 wektorów CU, 490 wektorów CT: a) 5 neuronów w warstwie ukrytej, b) 10 neuronów w warstwie ukrytej, c) 15 neuronów w warstwie ukrytej, d) 20 neuronów w warstwie ukrytej

Przyjmując do analizy siedem wymienionych w poprzednim rozdziale form WNZ zdefiniowano siedem klas:

- klasa1 – wyładowania w układzie ostrze-ostrze w oleju,
- klasa2 – wyładowania w układzie ostrze-ostrze w oleju z pęcherzykami gazowymi,
- klasa3 – wyładowania ostrze-płyta w oleju,
- klasa4 – wyładowania w układzie powierzchniowym dwóch elektrod płaskich, między którymi znajduje się izolacja papierowo-olejowa,
- klasa5 – wyładowania w układzie powierzchniowym z jedną elektrodą płaską, drugą wieloostrową, między którymi znajduje się izolacja papierowo-olejowa,
- klasa6 – wyładowania w układzie wieloostrowe-płyta w oleju,
- klasa7 – wyładowania w układzie wieloostrowe-płyta w oleju z pęcherzykami gazowymi.

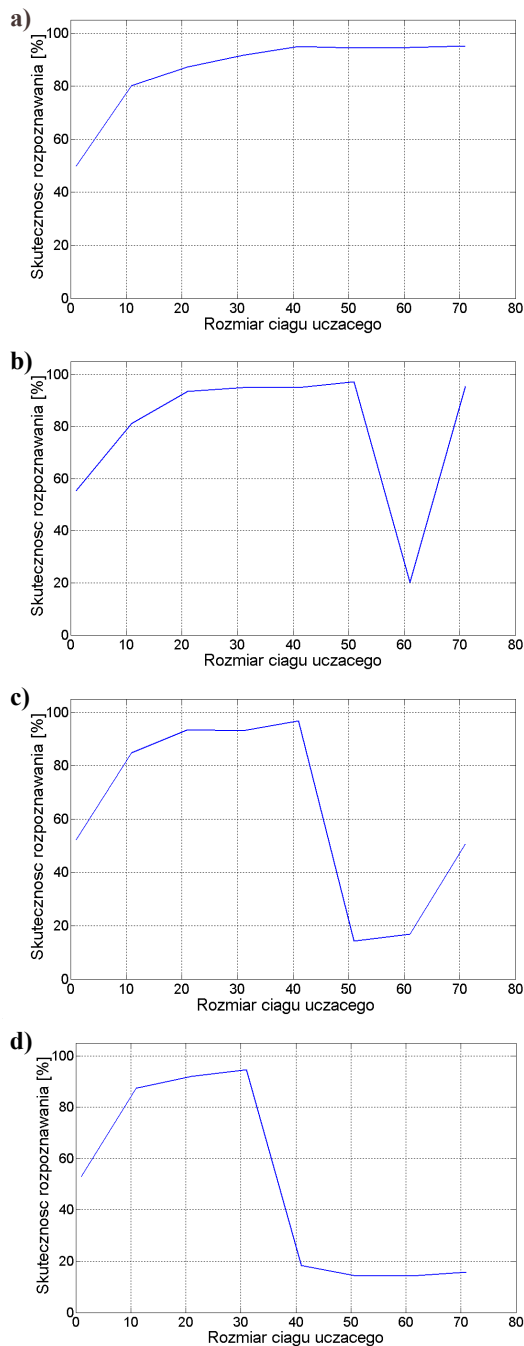
Rysunek 2 przedstawia skuteczność rozpoznawania badanych form WNZ w zależności od liczby klas rozpoznawanych, dla stałej ilości wektorów CU i CT oraz zmiennej ilości neuronów w warstwie ukrytej. Z zaprezentowanej na rysunkach 2a do 2d skuteczności rozpoznawania poszczególnych form WNZ wynika, że wraz ze wzrostem liczby klas rozpoznawanych spada skuteczność rozpoznawania testowanej sieci. Skuteczność ta jest jednak wystarczająca, gdyż przekracza 90%. Poprawę skuteczności można osiągnąć poprzez zwiększenie ilości neuronów w warstwie ukrytej – dla 15 neuronów skuteczność ta waha się w granicach 97%, co jest bardzo dobrym wynikiem.



Rys.3 Skuteczność rozpoznawania form WNZ przez zastosowaną sieć w zależności od liczby klas rozpoznawanych dla 10 neuronów w warstwie ukrytej:

a) 7 wektorów CU, 693 wektory CT b) 70 wektorów CU, 630 ciągów testowych, c) 210 wektorów CU, 490 wektorów CT, d) 350 wektorów CU, 350 wektorów CT

Rysunek 3 przedstawia skuteczności rozpoznawania poszczególnych form WNZ w zależności od liczby klas rozpoznawanych dla stałej ilości neuronów w warstwie ukrytej oraz zmieniającej się ilości wektorów CU i CT. Z zaprezentowanej na rysunkach 3a do 3d skuteczności rozpoznawania poszczególnych form WNZ, można wnioskować, podobnie jak poprzednio, że wraz ze zwiększaniem liczby klas rozpoznawanych maleje skuteczność rozpoznawania. Poprawę skuteczności rozpoznawania, dla poszczególnej liczby klas rozpoznawanych, można osiągnąć poprzez zwiększanie ilości wektorów CU.



Rys.4 Skuteczność rozpoznawania form WNZ przez zastosowaną sieć w zależności od rozmiaru ciągu uczącego dla 7 klas rozpoznawanych:

a) 5 neuronów w warstwie ukrytej, b) 10 neuronów w warstwie ukrytej, c) 15 neuronów w warstwie ukrytej, d) 20 neuronów w warstwie ukrytej

Przykładowo, dla siedmiu klas z rysunku 3a (7 wektorów CU) skuteczność rozpoznawania wynosi ok. 55%, natomiast dla tej samej liczby klas, lecz przy 210-ciu wektorach CU (rys. 3c) osiągnięto skuteczność ok. 92%.

Rysunek 4 przedstawia skuteczność rozpoznawania form WNZ w zależności od rozmiaru CU, przy zmiennej ilości neuronów w warstwie ukrytej oraz stałej liczbie klas rozpoznawanych. Z przedstawionych na rysunkach 4a do 4d zależności skuteczności rozpoznawania przez sieć poszczególnych form WNZ wynika, że dla stałej ilości neuronów w warstwie ukrytej oraz stałej ilości wektorów w CU, istnieje taki punkt, po przekroczeniu, którego następuje nagły spadek skuteczności rozpoznawania przez sieć poszczególnych form WNZ. Dzieje się tak, ponieważ wraz ze zwiększaniem ilości wektorów CU następuje stopniowe nasycanie się poszczególnych wag neuronów sieci, co prowadzi do utraty zbieżności procesu uczenia sieci, a bezpośrednio objawia się znaczącym spadkiem skuteczności rozpoznawania. Z prezentowanych charakterystyk wynika również fakt, iż zwiększając liczbę neuronów w warstwie ukrytej można wykorzystać mniejszy rozmiar CU, aby osiągnąć podobne wartości skuteczności rozpoznawania.

Wnioski

Dotychczasowa analiza wyników prowadzonych badań, potwierdza możliwość zastosowania sztucznych sieci neuronowych do rozpoznawania form WNZ, mierzonych przy pomocy metody EA. Przyjęty rodzaj sieci neuronowej typu F-F BP o trójwarstwowej strukturze w bardzo dobrym stopniu pozwala rozpoznawać poszczególne formy WNZ. Świadczą o tym zaprezentowane w artykule wyniki skuteczności rozpoznawania zarejestrowanych sygnałów EA pochodzących od generowanych WNZ.

Przeprowadzone badania dowiodły również przydatność widma gęstości mocy (PSD), parametru reprezentującego sygnał EA, jako kryterium uczenia i testowania zastosowanej sieci neuronowej.

Aby uzyskać skuteczność rozpoznawania poszczególnych form WNZ na poziomie przewyższającym 90% (przy 7-miu klasach rozpoznawanych) liczba neuronów warstwy ukrytej powinna wynosić co najmniej 10, a liczba wektorów CU powinna wynosić od 210 do 280.

W dalszym etapie badań prowadzone będą prace nad poprawieniem skuteczności rozpoznawania form WNZ przez zaimplementowaną sieć neuronową. Metodyka badań opierać się będzie na zmianie elementów sieci, jak również na wyborze innego parametru określającego zarejestrowane sygnały EA. Prowadzone analizy zostaną również rozbudowane o kolejne formy WNZ.

LITERATURA

- [1] Boczar T., Widma emisji akustycznej generowanej przez wyładowania niepełne w izolacji olejowej, *SiM*, z. 114, *Politechnika Opolska*, 2000.
- [2] Boczar T., Obiektywizacja wyników akustycznej metody oceny wyładowań niepełnych przy zastosowaniu do opisu sygnałów analizy statystycznej i cyfrowych metod przetwarzania, *Oficyna Wyd. Politechniki Opolskiej*, 2003 r.
- [3] PAC, Acoustic emission broad-band transducer type WD AH 17, 2004
- [4] EA System, AE Signal Conditioner – instrukcja obsługi, Warszawa 2001
- [5] Osowski S., Sieci neuronowe w ujęciu algorytmicznym, *WNT*, Warszawa, 1996
- [6] Nałęcz M., Duch W., Korbicz J., Rutkowski L., Tadeusiewicz R., *Biocybernetyka i inżynieria biomedyczna 2000*, tom 6, Sieci neuronowe, *Akademicka Of. Wyd.*, 2000

Autorzy:

dr hab. Inż. Tomasz Boczar, prof. n. PO, Politechnika Opolska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Sosnkowskiego 31, 45-272 Opole, E-mail: tboczar@po.opole.pl; mgr inż. Sebastian Borucki, Politechnika Opolska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Sosnkowskiego 31, 45-272 Opole, E-mail: sborucki@po.opole.pl; mgr inż. Andrzej Cichoń, Politechnika Opolska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Sosnkowskiego 31, 45-272 Opole, E-mail: acichyji@po.opole.pl; dr inż. Marcin Lorenc, Politechnika Opolska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Sosnkowskiego 31, 45-272 Opole, E-mail: lem@op.pl