

Przebiegi w sieciach z izolowanym punktem neutralnym

Streszczenie. W artykule omówiono problemy związane z przebiegami ferorezonansowymi oraz łukowymi przy jednofazowych zwarciach doziemnych w sieciach z izolowanym punktem neutralnym. Zaprezentowano model obliczeniowy i wyniki badań symulacyjnych mające na celu określenie zakresu parametrów sieci, przy jakich występują warunki stabilnego ferorezonansu. Przedstawiono wyniki badań dotyczące przebiegów ziemnozwarciowych. W obu przypadkach założono stochastyczny charakter zjawisk. Wykazano, że krotność przebiegu ziemnozwarciowego jest proporcjonalna do napięcia przebicia izolacji.

Abstract. The paper deals with problems regarding feroresonance overvoltages and transient overvoltages due to single-phase faults in isolated networks. The calculation model has been presented as well as simulation results aiming at the determination of network parameters for stable feroresonance conditions. Results are presented concerning transient overvoltages under ground faults. The stochastic character of phenomena has been taken into account. It has been shown that the multiplicity of overvoltage fault is proportional to the voltage insulation breakdown. (**Overvoltages in networks with isolated neutral**)

Słowa kluczowe: ferorezonans, jednofazowe zwarcia doziemne, analiza widmowa, modelowanie stochastyczne.

Keywords: feroresonance, single-phase ground fault, spectral analysis, stochastic modeling.

Wstęp

Sieci średniego napięcia z izolowanym punktem neutralnym są szeroko stosowane w praktyce światowej. Ważnym problemem występującym w tych sieciach są przebiegi wewnętrzne o wartościach przekraczających wartość $3U_f$. Stanowią one istotne zagrożenie dla izolacji urządzeń, głównie zainstalowanych w tych sieciach silników. Przyjmuje się, że przebiegi o wartości $2,2U_f$ mogą uszkodzić izolację silnika.

W tabeli 1 zestawiono dane dotyczące uszkodzeń silników wysokiego napięcia zainstalowanych w układach potrzeb własnych dziesięciu elektrowni ciepłych. Jak widać, silniki wysokiego napięcia podlegają częstym uszkodzeniom. Potwierdzoną przyczyną uszkodzeń były najczęściej przebiegi powodujące przebicia izolacji fazowej względem ziemi.

Tabela 1. Zestawienie uszkodzeń silników elektrycznych w wybranych elektrowniach ciepłych

Nazwa elektrowni (Ukraina)	Liczba zainstalowanych silników	Liczba uszkodzeń silników	
	szt.	szt.	% zainstalowanych
Uglegorska	273	35	12,80
Burszyńska	468	56	12,00
Mosenergo	273	27	9,87
Przybaltycka	468	28	5,97
Reftińska	390	23	5,90
Zaporoska	273	10	3,66
Kostromska	312	5	1,60
Ładyżyńska	234	2	0,85
Litewska	312	2	0,64
Estońska	312	9	2,89

Analiza statystyczna pokazuje, że najczęściej występującymi przebiegami w sieciach z izolowanym punktem zerowym są przebiegi ziemnozwarciowe i ferorezonansowe [1], [2]. Dlatego zostaną one bardziej szczegółowo omówione w artykule. Jak wiadomo, przebiegi ziemnozwarciowe mogą przekraczać 3-krotnie poziom napięcia fazowego U_f , przy czym największa ich wartość występuje w początkowej fazie zwarcia łukowego. Z kolei zagrożenie spowodowane przebiegami ferorezonansowymi jest związane z długim czasem ich trwania, bowiem oscylacje ferorezonansowe mogą ustąpić na przykład dopiero po odłączeniu części sieci elektroenergetycznej.

Celem artykułu jest przedstawienie wyników badań symulacyjnych dotyczących przebiegów ferorezonansowych przy zmieniających się warunkach pracy sieci oraz przebiegów ziemnozwarciowych z uwzględnieniem przypadkowego charakteru zwarcia łukowego. Badania wykonano za pomocą modelu matematycznego opracowanego w środowisku programu MATLAB/Simulink.

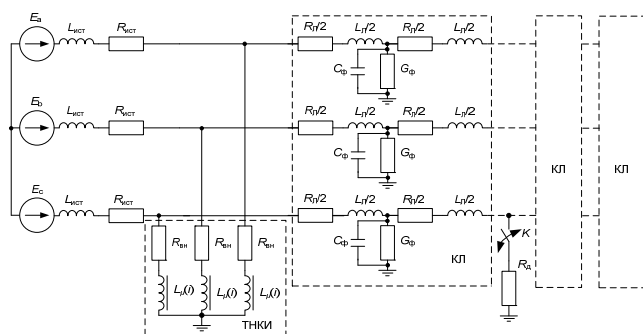
Wyniki badań

Przyjęty do badań schemat zastępczy sieci z izolowanym punktem neutralnym pokazano na rysunku 1. Schemat ten zawiera:

- Źródło zasilania reprezentowane przez trzy symetryczne siły elektromotoryczne oraz impedancje wewnętrzne, na które składa się szeregowe połączenie rezystancji R_{ist} i indukcyjności L_{ist} .
- Trójfazowy przekładnik napięciowy przeznaczony do kontroli stanu izolacji (TNKI) odwzorowany przez rezystancję uzwojenia wysokiego napięcia R_{BH} i nieliniową indukcyjność magnesowania $L_{\mu(i)}$.
- Linie kablową zamodelowaną w postaci szeregowego połączenia czwórników typu T, niezbędnego do przybliżonego odwzorowania rozkładu parametrów sieci i lokalizacji miejsca zwarcia doziemnego.
- Klucz K i rezystancję liniową R_d do symulacji łuku przerywanego.

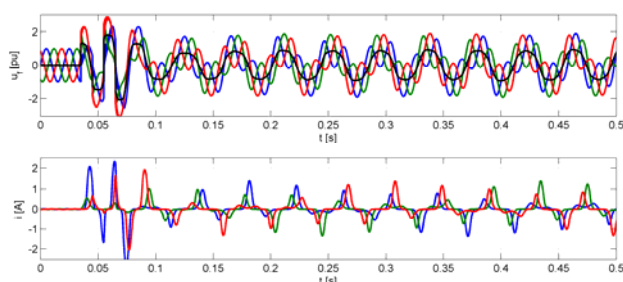
Wzbudzenie oscylacji ferorezonansowych może nastąpić w przypadku wystąpienia asymetrii układu dla składowej kolejności zerowej [2]. Drgania te pojawiają się też częstokroć przy odłączaniu jednofazowego zwarcia z ziemią, załączenia lub wyłączenia fragmentu sieci, lub załączenia nieobciążonych szyn podstawacji z podłączonym przekładnikiem napięciowym. Zjawisko ferorezonansu polega na tym, że po ustąpieniu asymetrii układu spowodowanej zwarcie doziemnym następuje, dla składowej zerowej, rozładowanie pojemności sieci poprzez rezystancję izolacji sieci i uziemione uzwojenie pierwotne (wysokiego napięcia) przekładnika napięciowego (TNKI).

Na rysunku 2 pokazano wyniki symulacji, prezentujące przebiegi napięć i prądów fazowych w uzwojeniach pierwotnych przekładnika napięciowego w warunkach ferorezonansu powstałego w wyniku samoczynnego odłączenia jednofazowego łukowego zwarcia doziemnego. Całkowity prąd pojemnościowy sieci jest w tym przypadku równy 2 A.



Rys. 1. Schemat zastępczy badanej sieci

Rozpatrywany przypadek dotyczy najczęściej spotykanego [3] podharmonicznego ferorezonansu napięć zachodzącego dla częstotliwości 25 Hz. Jak wynika z przeprowadzonych obliczeń przepięcie osiąga wartość $1,85U_n$, która z uwagi na czas trwania zjawiska oscylacji ferorezonansowych stwarza poważne zagrożenie dla izolacji sieci.



Rys. 2. Przebiegi napięć fazowych i prądów w uzwojeniach wysokiego napięcia przekładnika napięciowego w warunkach zjawiska oscylacji ferorezonansowych

Ten rodzaj przepięć może powodować nieprawidłowe działanie zabezpieczeń ziemnozwarciowych. Obecność składowej zerowej fałszuje sygnalizację wystąpienia jednofazowego zwarcia doziemnego, zmuszając obsługę do zbędnego podejmowania próby lokalizacji miejsca uszkodzenia.

Aby na drodze symulacji komputerowej określić obszary sprzyjające powstawaniu w sieci warunków dla stabilnego zjawiska ferorezonansu, najczęściej stosuje się metody sortowania parametrów, tzn. wielokrotne obliczanie stanów nieustalonych przy zmianie pojemności fazowej sieci [4]. Takie podejście nie uwzględnia jednak wpływu odchyłek napięcia zasilającego na wielkość obszaru występowania stabilnego ferorezonansu. Na dokładność obliczeń wpływa również krok, z jakim następuje zmiana pojemności sieci.

Proste przeszukiwanie zakresu parametrów, bez uwzględnienia zmian napięcia zasilania wykazało, że warunki stabilnego ferorezonansu w badanej sieci, występują dla pojemności fazowej sieci w zakresie $(0,08-0,62) \mu F$. W celu jednoczesnego uwzględnienia zmiany napięcia zasilającego i zmiany pojemności sieci (rozległości sieci), w opracowanym modelu symulacyjnym zastosowano metodę Monte Carlo. W obliczeniach założono, że napięcie zasilające ma rozkład normalny z wartością oczekiwaną $E(U) = U_n$ i wariancją $D(U) = 0,12 U_n$, natomiast pojemność sieci ma rozkład normalny z wartością oczekiwaną $E(C_f) = 0,5 \mu F$ i wariancją $D(C_f) = 1/12 \mu F$. Proces obliczeniowy był realizowany N -krotnie ($N = 10000$) przy różnych wartościach napięcia zasilania i pojemności fazowej sieci, wynikającymi z przyjętych rozkładów statystycznych.

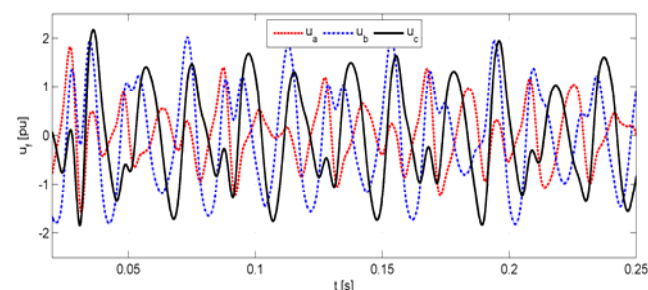
Wyniki obliczeń otrzymane z uwzględnieniem jednoczesnych zmian napięcia i pojemności sieci wykazały,

że dolna granica obszaru stabilnego ferorezonansu odpowiada pojemności $0,037 \mu F$ i napięciu sieci równym $1,07U_n$, natomiast górna – pojemności $0,66 \mu F$ i napięciu $1,09U_n$. Wobec tego obszar występowania warunków stabilnego ferorezonansu jest – w porównaniu z wynikami obliczeń przy napięciu znamionowym – poszerzony, i występuje w obu granicznych przypadkach przy dodatnich odchyleniach wartości napięcia.

Poza przepięciami, ferorezonans powstający przy częstotliwościach mniejszych niż przemysłowa (50 Hz) stwarza niebezpieczeństwo przeciążenia prądowego uzwojeń pierwotnych (WN) przekładników napięciowych. Znanе są przypadki licznych awarii przekładników towarzyszące zjawiskom ferorezonansowym. W niektórych sieciach średnia liczba awarii osiągała 50% wszystkich zainstalowanych przekładników napięciowych, przy czym awarie te były często poprzedzone wystąpieniem jednofazowych zwarc doziemnych.

Przepięcia ferorezonansowe przy częstotliwości podstawowej i wyższej mają większą amplitudę w porównaniu z przepięciami przy częstotliwościach podharmonicznych. Przepięcia takie mogą wystąpić przy przełączeniach odcinków sieci o małej pojemności (mniej niż $0,08 \mu F$) lub w przypadku załączenia przekładnika napięciowego. Przepięcie może w takich przypadkach osiągnąć 3-krotną wartość napięcia fazowego U_f , co stanowi poważne zagrożenie dla izolacji sieci i urządzeń.

W warunkach eksploatacyjnych, podczas podawania napięcia na nieobciążone szyny podstacji, personel obsługi nie powinien reagować na fałszywe sygnalizowanie doziemienia, lecz załączać kolejne linie zasilane z tej podstacji. Takie działanie, zwiększając w każdym kroku pojemności fazowe sieci względem ziemi likwiduje warunki podtrzymywania drgań ferorezonansowych. Na rysunku 3 pokazano przebiegi napięć fazowych obliczone dla przypadku przyłączenia przekładnika napięciowego do nieobciążonych szyn podstacji.



Rys. 3. Przebiegi napięć fazowych podczas ferorezonansu o częstotliwości 150 Hz, powstałego w wyniku załączenia przekładnika napięciowego do nieobciążonych szyn podstacji

Dla ochrony przed przepięciami ferorezonansowymi w układach z indukcyjnymi przekładnikami napięciowymi opracowano szereg rozwiązań technicznych. Skutecznym i często stosowanym sposobem jest rezystancyjne dociążenie głównych uzwojeń wtórnych lub dołączenie rezystora tłumiącego do zacisków otwartego trójkąta skojarzonego z uzwojeń wtórnych dodatkowych trójfazowego przekładnika napięciowego lub trzech przekładników jednofazowych. Dla identyfikacji ferorezonansu zachodzącego dla składowych podharmonicznych skuteczne jest zastosowanie metody spektralnej [5], a przy podstawowej lub wyższych harmonicznych – analizy falkowej [6]. Zastosowanie rezystorów o rezystancji w zakresie $(8-10) \Omega$ pozwala na tłumienie drgań ferorezonansowych w czasie 2-3 okresów i skuteczne ograniczenie przepięć.

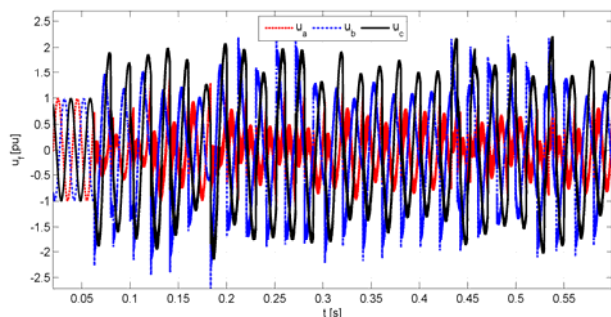
Poważnym problemem w sieciach z izolowanym punktem neutralnym są przebiegi ziemnozwarciowe. Przerwane jednofazowe zwarcie doziemne związane jest z naprzemiennym procesem zapłonu i gaśnięcia łuku w miejscu zwarcia. Składowe przejściowe związane z ładowaniem i rozładowaniem pojemności sieci, nakładając się na napięcie zasilające kształtują wypadkowy przebieg przebiegu. Jego amplituda w sieciach z izolowanym punktem neutralnym może osiągnąć wartość $3,2U_f$ lub nawet ją przekroczyć.

W matematycznym modelowaniu jednofazowych zwarć o charakterze łukowym przyjmuje się często stałą wartość napięcia przebicia, co nie w pełni odpowiada fizycznemu procesowi palenia się łuku [7]. Jak wiadomo, w czasie wyładowania łukowego napięcie przebicia zmienia się losowo a proces ten jest niestacjonarny. Jak pokazują wyniki monitorowania stanów przejściowych w rzeczywistych sieciach, w początkowej fazie zapłonu wartość oczekiwana napięcia przebicia jest większa niż na etapie ustalonego palenia się łuku. Wartość napięcia przebicia w procesie palenia się łuku podlega rozkładowi normalnemu.

W opracowanym modelu matematycznym przyjęto, że napięcie przebicia ma rozkład normalny, dzięki czemu wyniki symulacji stają się bliższe rzeczywistym procesom zachodzącym w sieci.

Z analizy przebiegów prądów jednofazowego zwarcia doziemnego zarejestrowanych w sieciach kablowych z izolacją polwinitową wynika, że wygaśnięcie prądu ziemnozwarciowego występuje przy trzecim, a najwcześniej przy drugim przejściu przez zero składowej wysokoczęstotliwościowej. Badania przebiegów ziemnozwarciowych z uwzględnieniem stochastycznego charakteru łuku pozwalają na określenie relacji pomiędzy krotnością przebicia a napięciem przebicia.

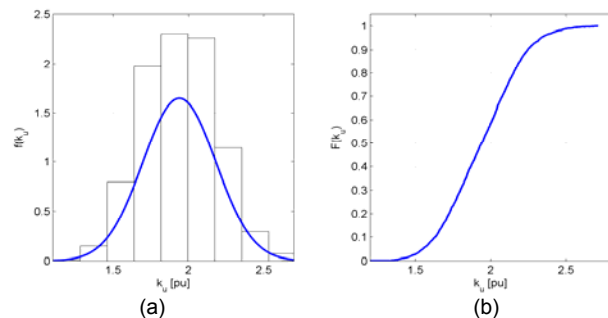
Na rysunku 4 przedstawiono przebiegi napięć fazowych przy jednofazowym łukowym zwarciu doziemnym w sieci z izolowanym punktem neutralnym, wyznaczone dla rozkładu normalnego napięcia przebicia o następujących parametrach: wartość oczekiwana $E(U) = 0,85U_f$, odchylenie standardowe $\sigma(U) = 0,15U_f$. Przebiegi izolacji następuje w odstępach czasu równych połowie okresu napięcia.



Rys.4. Przebiegi napięć fazowych podczas jednofazowego zwarcia łukowego w sieci z izolowanym punktem neutralnym z uwzględnieniem losowych zmian napięcia przebicia

Obliczenia wykonane przy zmianie parametrów rozkładu napięcia przebicia wykazały, że wartości przebiegów, przy niezmiennych pozostałych parametrach sieci, są proporcjonalnie do napięcia przebicia. Maksymalne przebiegi uzyskane w wyniku obliczeń wynosi $3,2U_f$. Odpowiada ono napięciu przebicia $1,52U_f$. Krotność przebicia maleje ze wzrostem rezystancji obwodu między źródłem a miejscem zwarcia i pogarszającym się stanem izolacji sieci (większa wartość przewodności fazowej izolacji sieci G_f).

Na rysunku 5 pokazano wyznaczone empirycznie (dla $E(U) = 0,85U_f$ i $\sigma(U) = 0,15U_f$): funkcję gęstości prawdopodobieństwa i dystrybuantę krotności przebiegów. Na podstawie wyników obliczeń można stwierdzić, że krotność przebicia ma rozkład normalny i nie przekracza wartości 2,51 z prawdopodobieństwem 99%.



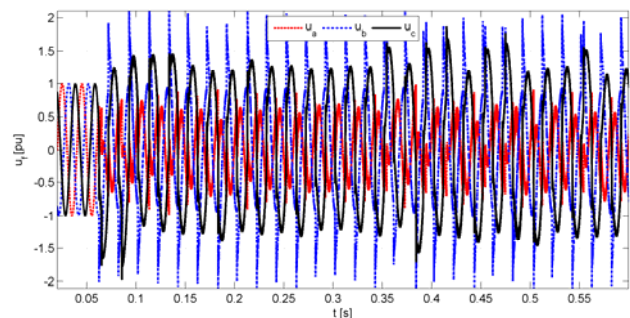
Rys.5. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa (a) i dystrybuanta (b) rozkładu krotności przebiegów dla jednofazowego łukowego zwarcia doziemnego w sieci z izolowanym punktem neutralnym ($E(U) = 0,85U_f$ i $\sigma(U) = 0,15U_f$)

Kompleksowym rozwiązaniem problemów związanych z przebiegami ziemnozwarciowymi i ferorezonansowymi jest uziemienie punktu neutralnego sieci przez rezystor.

Można przy tym zastosować nisko lub wysokooporowe uziemienia rezystancyjne punktu neutralnego. W pierwszym przypadku jednofazowe zwarcie doziemne jest wyłączone natychmiast przez zabezpieczenie, a rezystor dobierany jest na podstawie wartości prądu ziemnozwarciowego rzędu 300-500 A. W drugim przypadku zwarcie doziemne nie jest wyłączane a rezystor pozostaje pod napięciem przez czas trwania zwarcia.

Efektywność ograniczenia przebiegów ziemnozwarciowych w sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor zależy od drogi przepływu ładunku z pojemności sieci dla składowej zerowej.

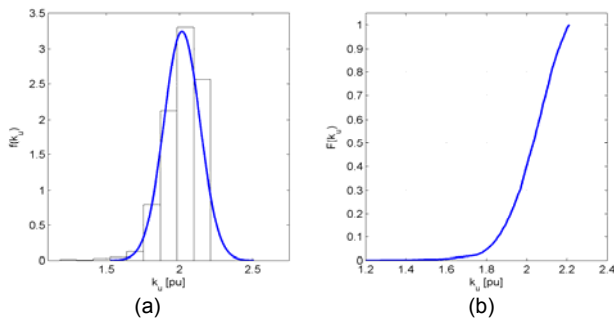
Przy jednofazowych zwarcia z ziemią następuje rozładowanie pojemności fazowej sieci w czasie do następnego przebicia izolacji, co powoduje, że wartości przebiegów nie przekraczają $2,2U_f$. Na rysunku 6 przedstawiono przebiegi napięć fazowych przy jednofazowym zwarciu doziemnym w sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor. Parametry rozkładu napięcia przebicia przyjęto takie same jak w sieci izolowanej: wartość oczekiwana $E(U) = 0,85U_f$, odchylenie standardowe $\sigma(U) = 0,15U_f$. Rezystor uziemiający dobrano przyjmując jednakowe wartości składowej czynnej i pojemnościowej prądu zwarcia doziemnego.



Rys.6. Przebiegi napięć fazowych podczas jednofazowego zwarcia łukowego w sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor z uwzględnieniem losowych zmian napięcia przebicia

Na rysunku 7 pokazano wyznaczone empirycznie: funkcję gęstości prawdopodobieństwa i dystrybuantę

krotności przepięć dla sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor. Krotność przepięcia nie przekracza wartości 2,2 z prawdopodobieństwem 99%.



Rys.7. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa (a) i dystrybuanta rozkładu krotności przepięcia dla jednofazowego łukowego zwarcia doziemnego w sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor ($E(U) = 0,85U_f$ i $\sigma(U) = 0,15U_f$)

Wnioski

Główną przyczyną uszkodzenia izolacji w sieciach z izolowanym punktem neutralnym są przepięcia, przy czym ze względu na ich krotność i czas trwania, największe zagrożenie stanowią przepięcia ziemnozwarciowe i ferorezonansowe.

Badania zjawiska ferorezonansu w sieci z izolowanym punktem neutralnym, z uwzględnieniem możliwych odchyłeń napięcia zasilającego mieszczących się w granicach $\pm 10\%$ napięcia znamionowego, wykazały, że obszar ustalonego ferorezonansu obejmuje sieć o pojemności fazowej w zakresie od $0,037 \mu F$ do $0,66 \mu F$. Krotność przepięć ferorezonansowych może osiągać nawet wartość 3. Skutecznym sposobem identyfikacji zjawiska ferorezonansu są metody spektralne umożliwiające rozpoznanie ferorezonansu na tle innych stanów przejściowych.

Badania jednofazowych zwarcć doziemnych z uwzględnieniem losowego charakteru łuku wykazały, że krotność przepięcia zależy od napięcia przebiecia, przy czym

przepięcia są większe dla większych napięć przebiecia. Przy normalnym rozkładzie napięcia przebiecia rozkład krotności przepięć jest też normalny. Uziemienie punktu neutralnego sieci przez rezystor skutecznie ogranicza przepięcia w porównaniu z przepięciami w sieci z izolowanym punktem neutralnym.

LITERATURA

- [1] Kizilcay, M., Pniok, T., Digital simulation of fault arc in power system, *ETEP*, 1991, Vol. 1, No.1, pp. 55 – 60.
- [2] Yu Y., Zhou H., Study on Simulation of Ferroresonance Elimination in 10kV Power System, Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, 2005, pp. 1 – 7.
- [3] Serhat S., Tahir C., Sezai T., Spectral and statistical analysis for ferroresonance phenomenon in electric power systems, *Electrical Engineering*, 2012, Vol. 94, Issue 2, pp. 117 – 124.
- [4] Milicevic K., Rutnik I., Lukacevic I., Impact of Voltage Source and Initial Conditions on the Initiation of Ferroresonance, *WSEAS TRANSACTIONS on CIRCUITS and SYSTEMS*, 2008, Vol. 7, Issue 8, pp. 800 – 810.
- [5] He J.-J., Chen J.-W., Zou Y.-P., Zhou Z.-C., Discussion on the detecting method of TV harmonic ferroresonance, *High Voltage Engineering*, 2009, Vol. 35 (2). – pp. 266 – 271.
- [6] Mokryani G., Haghighat M.-R., Esmailpoor J., Identification of ferroresonance based on wavelet transform and artificial neural networks, Power Engineering Conference, (AUPEC 2007), Perth, Western Australia, 2007, pp. 1 – 6.
- [7] Kachesov V., Ovsyannikov A., Larionov V., Overvoltage monitoring for single-phase arc-to-ground failures in distribution cable networks, *Power Technology and Engineering*, 2002, Vol. 36, No.4, pp. 207 – 213.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Yuriy Sayenko, Przyazowski Państwowy Uniwersytet Techniczny w Mariupolu, ul. Uniwersytecka 7, 87500 Mariupol, Ukraina, E-mail: yurisayenko@mail.ru; mgr inż. Artem Popov, Przyazowski Państwowy Uniwersytet Techniczny w Mariupolu, ul. Uniwersytecka 7, 87500 Mariupol, Ukraina, E-mail: yurisayenko@mail.ru; dr inż. Ryszard Pawełek, Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: ryszard.pawelek@p.lodz.pl