

Bartłomiej KERCEL
Wiesław NOWAK

FERROREZONANS W UKŁADACH ELEKTROENERGETYCZNYCH ŚREDNICH NAPIĘĆ

STRESZCZENIE *Najczęstszą przyczyną uszkodzeń przekładników napięciowych instalowanych w układach elektroenergetycznych średnich napięć (SN) są drgania ferrorezonansowe. Nieliniowy charakter tych układów utrudnia analizę tego zjawiska. Istotne znacznie mają opracowywane modele matematyczne oraz przeprowadzane z ich wykorzystaniem symulacje komputerowe. W artykule przedstawiono na wybranych przykładach problemy modelowania przebiegów dorywczych w postaci ferrorezonansowych drgań napięć w sieciach SN. Do symulacji komputerowych zastosowano program ElectroMagnetic Transients Program (EMTP).*

Słowa kluczowe: sieci średnich napięć, ferrorezonans, EMTP

1. WSTĘP

Pomimo, że pierwsze publikacje na temat ferrorezonansu ukazały się już z początkiem XX wieku, do dnia dzisiejszego nie zostały jednoznacznie określone kryteria jego powstawania, ani nie opracowano skutecznych metod jego

mgr inż. Bartłomiej KERCEL
e-mail: kercel@agh.edu.pl

dr hab. inż. Wiesław NOWAK, prof. n.
e-mail: wieslaw.nowak@agh.edu.pl

Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki
Akademia Górniczo-Hutnicza, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

PRACE INSTYTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 248, 2010

eliminacji [3, 4]. Ze względu jednak na zagrożenia, jakie stwarza ferrorezonans w sieciach elektrycznych, w dalszym ciągu jest on przedmiotem zainteresowania nie tylko wielu ośrodków badawczych, ale i służb eksploatacyjnych energetyki [5].

W układzie elektroenergetycznym do drgań ferrorezonansowych dochodzi w wyniku szeregowego lub równoległego połączenia liniowej pojemności oraz nieliniowej indukcyjności, co może być przyczyną jego wystąpienia. W zależności od sposobu połączenia elementów układu, dochodzi w przypadku połączenia szeregowego do ferrorezonansu napięć, natomiast przy połączeniu równoległym do ferrorezonansu prądów [6]. Z praktycznego punktu widzenia w układach elektroenergetycznych nieliniową indukcyjność stanowi najczęściej indukcyjność odwzorowująca zjawisko magnesowania rdzenia transformatora oraz przekładników napięciowych. Zjawisko ferrorezonansu jest uważane za główną przyczynę uszkodzeń przekładników napięciowych instalowanych w układach elektroenergetycznych. Skutkiem ferrorezonansu jest znaczne nasycenie rdzenia przekładnika oraz wzrost prądu w uzwojeniu pierwotnym, prowadzące w efekcie do termicznego zniszczenia układu izolacyjnego.

Dodatkowym negatywnym skutkiem jego inicjacji jest także powstawanie przepięć dorywczych w postaci ferrorezonansowych drgań napięć, stanowiących narażenia dla pozostałych elementów układów elektroenergetycznych. Nieliniowy charakter tych obwodów utrudnia analizę tego zjawiska, ze względu na odkształcenia przebiegów prądów i napięć, w momencie jego wystąpienia.

Znaczący postęp w analizie zjawisk ferrorezonansowych zapewniają, zatem dedykowane programy obliczeniowe umożliwiające symulację komputerową obwodów nieliniowych [5, 2]. Istotne znacznie mają w głównej mierze opracowywane modele matematyczne oraz przeprowadzane z ich wykorzystaniem symulacje komputerowe.

W artykule przedstawiono wybrane wyniki symulacji komputerowych układów elektroenergetycznych średnich napięć, w których wystąpił ferrorezonans. Zastosowanie programu EMTP (ElectroMagnetic Transients Program) pozwoliło na określenie potencjalnego zagrożenia, a otrzymane wyniki analizy mogą być istotnym elementem przy projektowaniu i eksploatacji układów elektroenergetycznych.

2. ANALIZA ZJAWISKA FERROREZONANSU

Wystąpienie przepięć dorywczych w postaci drgań ferrorezonansowych, jest uzależnione przede wszystkim od konfiguracji układu elektroenergetycz-

nego oraz od parametrów jego poszczególnych elementów. Zasadniczą rolę odgrywa sposób połączenia punktu neutralnego układu z ziemią.

Rozpatrując to zjawisko w wysokonapięciowych układach elektroenergetycznych należy zwrócić uwagę na dwa przypadki:

- ferrorezonans w układach elektroenergetycznych wysokich napięć z bezpośrednio uziemionym punktem neutralnym,
- ferrorezonans w układach elektroenergetycznych średnich napięć z izolowanym punktem neutralnym.

W układach wysokich napięć pracujących z bezpośrednio uziemionym punktem neutralnym, drgania ferrorezonansowe mogą wystąpić przede wszystkim wtedy, gdy w wyniku pewnych czynności łączeniowych powstanie szeregowo lub szeregowo – równoległy układ drgający.

W przypadku układów elektroenergetycznych średnich napięć z izolowanym punktem neutralnym transformatora, do ferrorezonansu może dojść w wyniku nagłej zmiany napięcia sieci będącej wynikiem zwarcia doziemnego. Na skutek tych zmian powstaje równoległy lub szeregowo – równoległy układ drgający. Bezpośrednią przyczyną powstawania ferrorezonansu w sieci może być dowolna zmiana jej konfiguracji lub zakłócenia, takie jak załączenie napięcia czy powstanie i włączenie zwarcia jednej fazy z ziemią.

Zjawisko ferrorezonansu określane jest jako: drgania ferrorezonansowe, drgania nieliniowe, drgania relaksacyjne (przy dużym nasyceniu rdzeni przekładników przebieg napięcia punktu gwiazdowego sieci jest znacznie odkształcony i ma cechy drgań relaksacyjnych).

Często ferrorezonans mylony jest z rezonansem. Jednakże w przeciwieństwie do rezonansu liniowego, gdzie częstotliwość rezonansowa jest ściśle określona, ferrorezonans może wystąpić dla częstotliwości uzależnionej od warunków pracy układu [9]. Podstawowa różnica pomiędzy tymi zjawiskami jest zasadnicza, ponieważ rezonans może wystąpić przy określonej częstotliwości, wobec tego do jego uzyskania, konieczna jest zmiana częstotliwości źródła układu. Natomiast w przypadku ferrorezonansu, zainicjowanie drgań ferrorezonansowych, może nastąpić poprzez zmianę wartości skutecznej napięcia zasilającego, zachowując stałą częstotliwość źródła.

Wystąpienie zjawiska ferrorezonansu na podstawie przeglądu literaturowego można podzielić na trzy podstawowe grupy:

- analiza drgań ferrorezonansowych przy użyciu zaawansowanej metodologii zawierającej nieliniowe dynamiczne modelowanie i teorię chaosu,
- rozpoznanie zjawiska ferrorezonansu w systemach elektroenergetycznych,
- zapobieganie ferrorezonansowi.

3. MODEL UKŁADU

Do wystąpienia drgań ferrezonansowych może dojść w złożonej strukturze kopalnianych sieci elektroenergetycznych średnich napięć. Przyczyną drgań napięcia punktu gwiazdowego w sieciach kopalnianych, które są sieciami o izolowanym punkcie gwiazdowym, jest duża liczba indukcyjnych przekładników napięciowych tworzących filtry składowej symetrycznej zerowej napięcia. Przekładniki tworzące filtr mają połączone w gwiazdę uzwojenia pierwotne, a punkt gwiazdowy tego połączenia jest bezpośrednio uziemiony. Zatem nieliniowa indukcyjność magnesowania przekładników tworzy wraz z pojemnością doziemną obwód, w którym mogą powstać i utrzymać się drgania relaksacyjne [1].

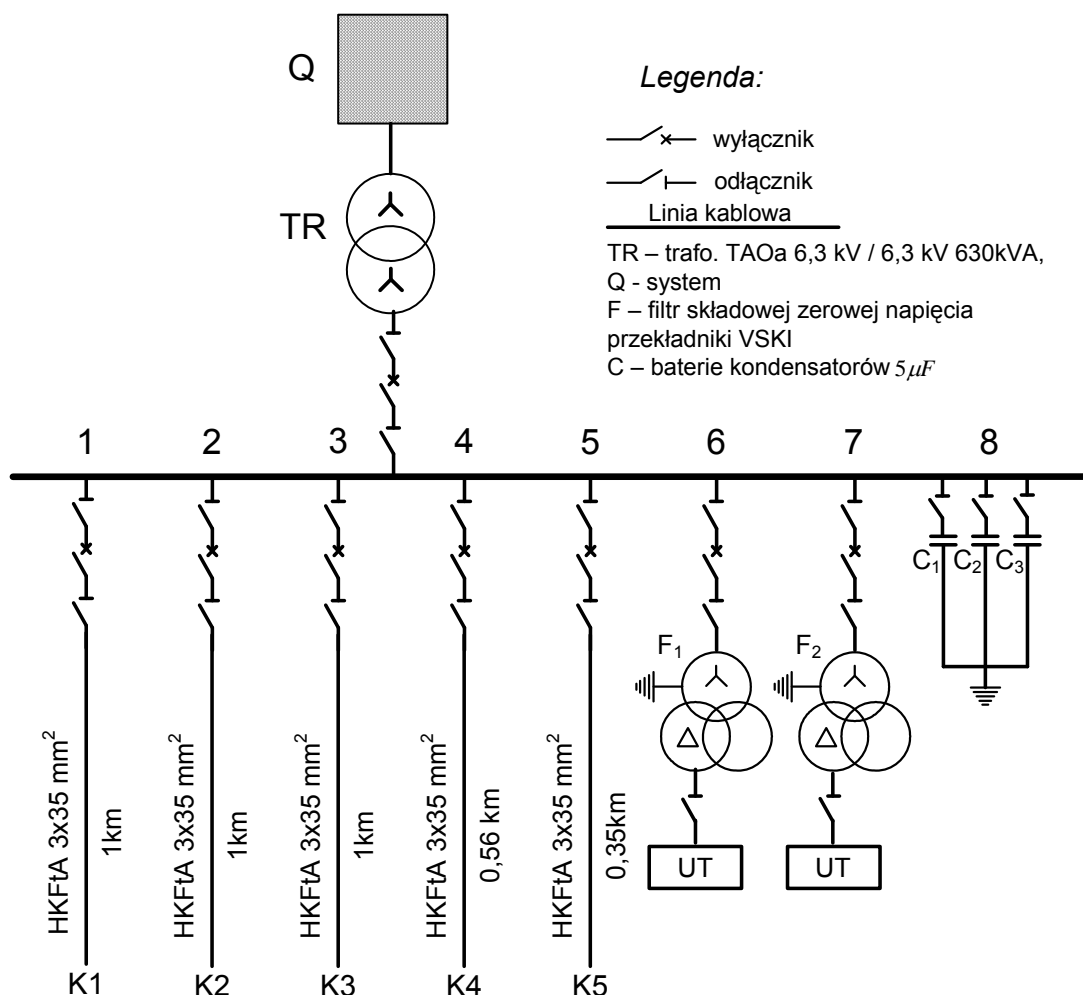
Cechą charakterystyczną zabezpieczeń zastosowanych w analizowanym układzie jest wyposażenie każdego przełącznika w indywidualny filtr składowych symetrycznych kolejności zerowej napięcia. Filtr ten jest utworzony z trzech jednofazowych przekładników napięciowych z dwoma uzwojeniami wtórnymi. Uzwojenia pierwotne przekładników połączone są w gwiazdę, której punkt zerowy jest uziemiony. Powoduje to wprowadzenie do sieci dodatkowych parametrów poprzecznych o charakterze indukcyjno – rezystancyjnym.

Obecność w sieci nieliniowych parametrów doziemnych w postaci reaktancji magnesowania przekładników, tworzących filtr składowych zerowych napięcia, może być przyczyną zniekształcenia sinusoidalnego przebiegu napięć faz sieci względem ziemi. Zjawisko to wystąpi, gdy w sieci pojawi się napięcie punktu zerowego przy symetrycznych parametrach doziemnych (np. przy przemijających samoczynnie doziemieniach lub przy wyłączeniu odcinka sieci z doziemieniem trwałym, a także przy załączaniu pod napięcie linii kablowych) i gdy jednocześnie spełniona będzie odpowiednia zależność między wartością reaktancji magnesowania przekładników w stanie nienasyconym a wartością pojemności reaktancji doziemnej.

Zjawisko ferrezonansu, chociaż objawia się tylko w przebiegach napięć doziemnych i odpowiednich prądów, jest groźnym zakłóceniem w pracy sieci. Na skutek towarzyszącym temu zjawisku przepięciom i przetężeniom, możliwe jest uszkodzenie elementów sieci tj. przekładników napięciowych, czy linii kablowych. Ponadto ferrezonans podnosi potencjał punktu neutralnego układu, co powoduje pojawienie się składowej zerowej napięcia, mogącej fałszować działania układów zabezpieczeń ziemnozwarciowych.

4. WYBRANE PRZYPADKI ANALIZY FERROREZONANSU W KOPALNIANEJ SIECI SN Z WYKORZYSTANIEM MODELU UTWORZONEGO W PROGRAMIE EMTP

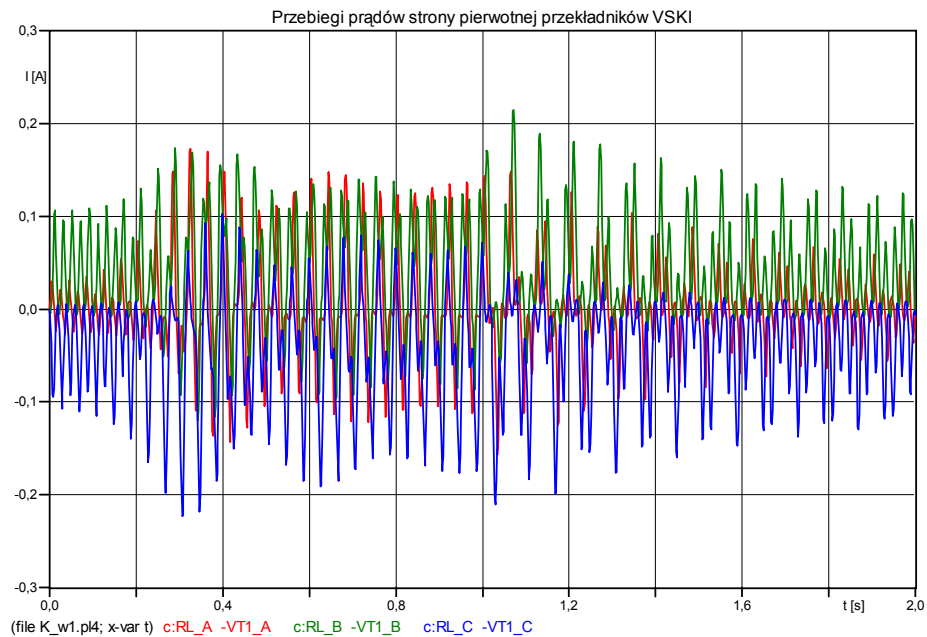
Do przeprowadzenia wielowariantowej analizy wpływu zmiany konfiguracji sieci na możliwość inicjacji drgań relaksacyjnych, wykorzystano przedstawiony na rysunku 1 schemat układu elektroenergetycznego.



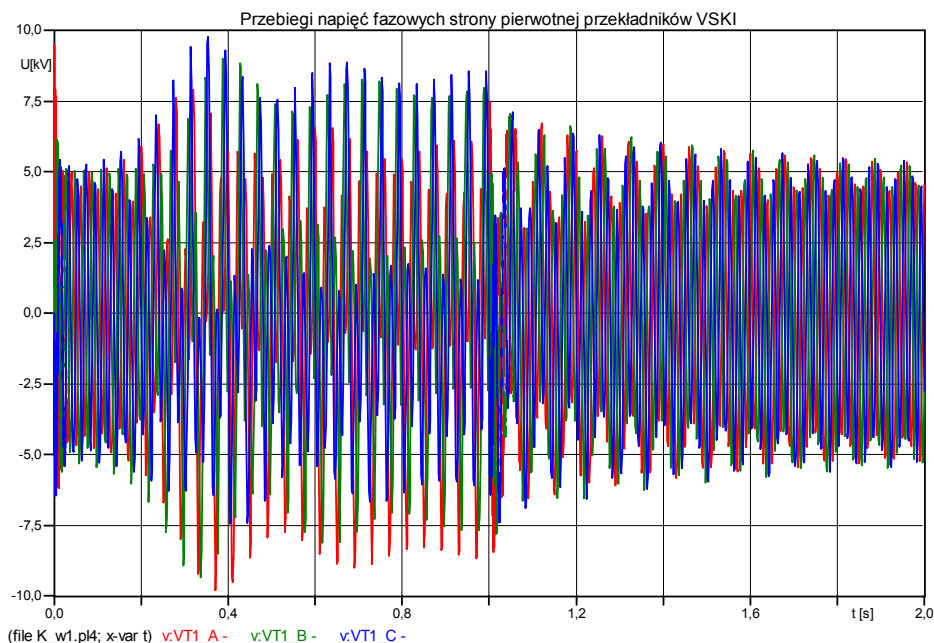
Rys. 1. Analizowany schemat wysokonapięciowego modelu sieci kopalnianej

W pierwszym przypadku zmiana konfiguracji sieci polegała na włączeniu linii kablowej K1 oraz filtrów F1 i F2 przed załączeniem źródła napięcia. Linie kablowe K2 i K3 pozostają otwarte. W czasie $t = 0$, dokonano włączenia źródła

napięcia, co spowodowało inicjację drgań relaksacyjnych w układzie. Po czasie $t = 1$ s włączone zostały pozostałe dwie linie kablowe K2 i K3. Rysunek 2 przedstawia przebiegi prądów płynących w uzwojeniu pierwotnym przekładników filtrów F1 i F2. Natomiast na rysunku 3 przedstawiono przebiegi napięć fazowych na szynach rozdzielni. Przedstawione na rysunkach 2 i 3 przebiegi napięć i prądów wyraźnie uwidaczniają niestabilny charakter drgań relaksacyjnych.

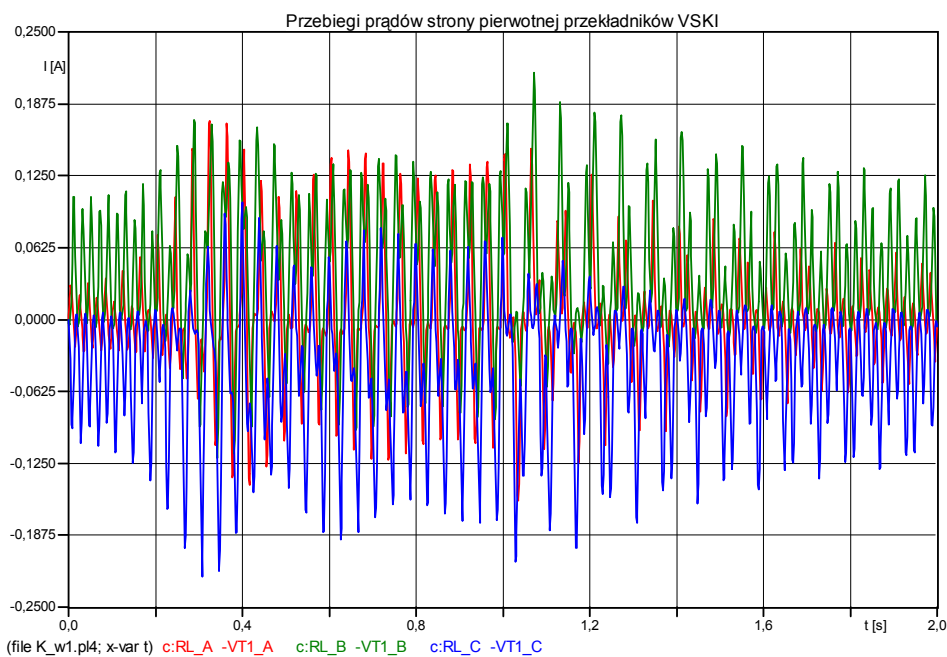


Rys. 2. Przebiegi prądów strony pierwotnej przekładników filtra F1

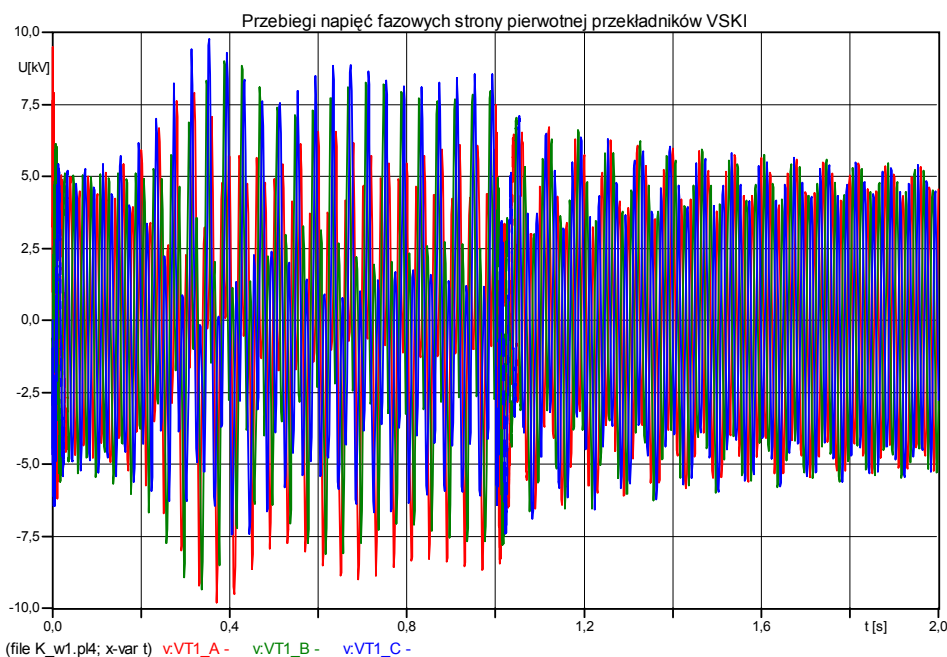


Rys. 3. Przebiegi napięć fazowych strony pierwotnej przekładników filtra F1

Zaobserwowane podczas symulacji wartości napięć i prądów w momencie wystąpienia ferrorezonansu stanowią poważne zagrożenie dla przekładników i mogą być przyczyną ich uszkodzenia termicznego i mechanicznego. Na skutek włączenia po czasie $t = 1$ s linii kablowych K2 i K3, ferrorezonans przyjmuje charakter przemijających drgań chaotycznych.



Rys. 4. Przebiegi prądów strony pierwotnej przekładników filtra F1



Rys. 5. Przebiegi napięć fazowych strony pierwotnej przekładników filtra F1

W drugim wybranym do analizy przypadku w czasie $t = 0$ s, linie kablowe K1, K2, K3 i filtry F1, F2 zostały włączone. Po czasie 1 s od momentu załączenia źródła zasilania następuje wyłączenie linii kablowych K2 i K3. Na podstawie wyników analizy przedstawionych na rysunkach 4 i 5, potwierdzono istotny wpływ zmiany topologii sieci na możliwość wystąpienia drgań relaksacyjnych w kopalnianych sieciach elektroenergetycznych.

4. PODUSMOWANIE

Analiza zjawiska ferorezonansu jest szczególnie istotna dla układów elektroenergetycznych średnich napięć ze względu na warunki eksploatacji.

Z przeprowadzonych badań symulacyjnych wynika, iż przebiegi oraz przetężenia będące skutkiem wystąpienia drgań relaksacyjnych w kopalnianej sieci elektroenergetycznej średnich napięć, mogą być przyczyną uszkodzenia przekładników napięciowych oraz kabli. Stany zakłóceniowe będące wynikiem drgań relaksacyjnych, mogą również spowodować błędne zadziałanie elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej.

Aplikacje takich programów komputerowych jak EMTP-ATP, umożliwiają rozpoznanie powyższych zjawisk i uwzględnienie ich w praktyce projektowej oraz eksploatacyjnej.

LITERATURA

1. Błaż J., Cholewa A., Krasucki F.: Powstawanie i tłumienie drgań relaksacyjnych w kopalnianych sieciach elektroenergetycznych, *Wiadomości Elektrotechniczne*, 1990, nr 4-5, pp. 91-93.
2. Wiśniewski J., Anderson E., Karolak J.: Ocena podatności sieci elektroenergetycznej na możliwość wystąpienia ferorezonansu. *Wiadomości Elektrotechniczne*, 2007, nr 11, pp. 8-11, ISSN 0043-5112.
3. Piasecki W., Florkowski M., Fulczyk M., Mahomen P., Luto M., Nowak W.: Ferroresonance involving voltage transformers In medium voltage networks. 14th International Symposium on High Voltage Engineering ISH2005, Beijing, China, 2005, paper F-19.
4. Nowak W., Kercel B.: Modelowanie zjawiska ferorezonansu w układach elektroenergetycznych wysokich napięć. *Elektrotechnika i Elektronika*, tom 26, 2007, zeszyt 1-2, pp. 54-59, ISSN 1640-7202.
5. Raczyński M., Solarewicz M., Kowal A., Kostka T.: Zaburzenia ferorezonansowe w sieciach elektrycznych Zakładów Górniczych Lublin. *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*, 2008, zeszyt 7-8, pp. 67-70
6. Nowak W., Kercel B., Pająk P.: Komputerowa analiza zjawiska ferorezonansu w układach elektroenergetycznych wysokiego napięcia. *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, 2008, nr 25, pp. 107- 110, ISSN 1425-5766.

7. Electromagnetic Transients Program. Theory Book. Bonneville Power Administration, Portland, Oregon, 1995.
8. Alternative Transients Program. Rule Book. Canadian/American EMTP User Group, 1987–92.
9. Moskwa Sz., Nowak W., Tarko R.: Modelowanie i analiza układu sieci średniego napięcia dla oceny warunków i skutków występowania ferorozonansu oraz sposobu jego eliminacji, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, 2009, nr 26, pp. 100- 104, ISSN 1425-5766.

Rękopis dostarczono dnia 19.10.2010 r.

FERRORESONANCE IN MEDIUM VOLTAGE NETWORKS

Bartłomiej KERCEL, Wiesław NOWAK

ABSTRACT *The paper presents computer modeling and analysis of ferroresonance in medium voltage networks. It has got essential importance to recognize that problems in project practice and operating of electrical power systems. Presented problem was analyzing by Electromagnetic Transients Program (EMTP)*

Mgr inż. Bartłomiej KERCEL – tytuł magistra inżyniera o specjalności „Elektroenergetyka” uzyskał w roku 2003 na Wydziale Elektrotechniki Automatyki Informatyki i Elektroniki Akademii Górniczo – Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie. W latach 2003-2004 pracownik firmy Elteco Poland. W roku 2004 pracował w Zakładach Remontowych Energetyki Kraków, a następnie w latach 2004 – 2005 w Enion S.A. Oddział w Krakowie ZEK. Od roku 2005 pracownik Katedry Elektrotechniki i Elektroenergetyki na WEAlIE AGH. Jest członkiem International Lightning Protection Club (ILPC) oraz Polskiego Towarzystwa Elektrotechniki Teoretycznej i Stosowanej (PTETiS).





Dr hab. inż. Wiesław NOWAK – profesor Akademii Górniczo – Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie. Tytuł zawodowy magistra inżyniera oraz stopnie naukowe doktora i doktora habilitowanego nauk technicznych w dyscyplinie elektrotechnika, uzyskał w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, odpowiednio w 1988, 1995 i 2006 roku. Od 1987 roku jest pracownikiem Katedry Elektrotechniki i Elektroenergetyki AGH. Główne zainteresowania badawcze dotyczą problemów modelowania i analizy elektromagnetycznych stanów przejściowych w układach elektroenergetycznych.