

Ferrorezonans w układach pomiarowych sieci zasilających

W artykule podano analizę zjawiska ferrorezonansu prądowego i napięciowego. Podano podstawy analizy harmonicznej wraz z przykładami. Przedstawiono wpływ przekładników na możliwość wystąpienia ferrorezonansu, a także przedstawiono sposoby eliminacji skutków ferrorezonansu.

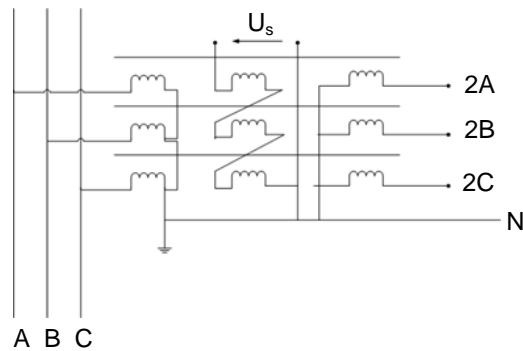
1. WSTĘP

Odbiorniki nieliniowe od wielu już lat stanowią podstawową grupę odbiorców elektrycznych. Dzieje się tak nie tylko w obrębie odbiorców przemysłowych, ale także komunalno-bytowych. Ten fakt niesie ze sobą wszystkie pozytywne, tj. użytkowe i negatywne, czyli eksploatacyjne skutki. Negatywne skutki to opisywane w literaturze: zwiększony pobór mocy biernej i odkształconej, a także pobór wyższych harmonicznych prądu i tym samym zniekształcenie sinusoidy napięcia [10], [11].

Stan taki wymaga podejmowania kroków zaradczych, które zazwyczaj poprzedzone są analizą teoretyczną zjawisk związanych z zasilaniem odbiorów niespokojnych i obejmuje przeprowadzenie bilansu mocy oraz wyznaczenie widma wyższych harmonicznych prądu i napięcia. Kwestie bilansu mocy do dzisiaj są przedmiotem wielu analiz i nie doczekały się jednoznacznego rozwiązania. Znane są powszechnie prace dotyczące teorii mocy elektrycznej m.in. Buchholza [6], Curtisa [7], Depenbrocka [8], Kusters'a i Moore'a [9], A. Nabae, H. Akagi, Y. Kanazaway [10] i Czarneckiego [11] oraz koncepcja prądów i napięć Illović [12]. Niestety poza – w pewnym zakresie – pracami L. Czarneckiego (oparta na składowych fizycznych prądu), teorie te nie podają interpretacji fizycznej mocy biernej, rozproszonej, rozrzutu itd. [1-5].

Analizy oparte na powyższych teoriach prowadzone są zwykle na etapie projektowania określonych instalacji elektrycznych i do pewnego stopnia są weryfikowalne w praktyce. Zazwyczaj wymagają dodatkowego wsparcia ze strony ośrodków naukowo-badawczych z uwagi na konieczność stosowania skomplikowanej aparatury. Bardzo często narzędziem wspierającym są też badania symulacyjne z użyciem różnorodnego oprogramowania [18], [20-21]. Jednak daje to jedynie pewną przybliżoną informację, że można spodziewać się stanów awaryjnych w określonej konfiguracji sieci zasilających. Jeśli jeszcze dodać, że zazwyczaj układy odbiorcze i zasilające są często modyfikowane i modernizowane, wydaje się, że najlepszym rozwiązaniem są pomiary bezpośrednie. Tu jednak napotymano na duże kłopoty [13], bowiem występują daleko idące ograniczenia w stosowaniu różnych analizatorów napięć harmonicznych, zastosowania okien pomiarowych i tym samym interpretacji wyników pomiarów (szeroko opisane przez autora) [14-17], [19].

Przedmiotem niniejszej pracy jest dodatkowy element układu pomiarowego rzadko analizowany, mianowicie przekładnik. W każdym układzie pomiarowym czy to trwałym, czy też łączonym doraźnie na potrzeby analizy okresowej, przyrządy pomiarowe (w tym przypadku analizator harmonicznych) włącza się w obwód wtórny przekładnika napięciowego lub prądowego. Podstawowy schemat przekładnika napięciowego przedstawiono na rysunku 1.

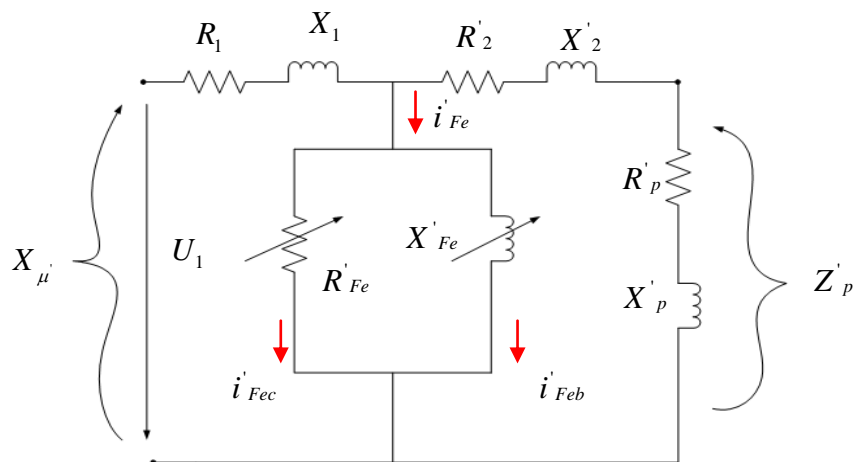


Rys. 1. Trójfazowy przekładnik napięciowy do pomiaru napięć fazowych i międzyfazowych oraz składowej zerowej

2. PODSTAWY TEORETYCZNE ANALIZY ZJAWISKA FERROREZONANSU

W sieciach zasilających odbiorniki nieliniowe, przede wszystkim napędy sterowane przekształtnikami statycznymi, stosowane są przekładniki napięciowe z rdzeniem ferromagnetycznym. Jest to zasadniczym powodem występowania zjawiska ferro-

rezonansu, co objawia się pojawieniem się przepięć oraz drgań napięcia lub prądu. Opis analityczny zjawiska jest bardzo podobny do zwykłego rezonansu, jednak jego natura, a co za tym idzie możliwości jego uniknięcia niestety są znacznie bardziej skomplikowane. Na rysunku 2 przedstawiono schemat zastępczy przekładnika napięciowego z rdzeniem ferromagnetycznym sprowadzony do uzwojenia pierwotnego.



Rys. 2. Schemat zastępczy przekładnika napięciowego z rdzeniem ferromagnetycznym sprowadzony do uzwojenia pierwotnego

Na rysunku 2 przyjęto następujące oznaczenia:

$$X_{\mu}' = X_1 + X_2' + X_p' + X_{Fe}' \quad (1)$$

← Reaktancja uzwojenia pierwotnego
 ← Reaktancja uzwojenia wtórnego przeliczona na stronę pierwotną
 ← Reaktancja obciążenia uzwojenia pomiarowego
 → Reaktancja magnesowania rdzenia

X_C – reaktancja pojemnościowa systemu elektroenergetycznego,

X_μ – reaktancja indukcyjna przekładnika sprowadzona do strony pierwotnej.

Warunkiem powstania ferorezonansu dla harmonicznej rzędu n jest, aby reaktancja pojemnościowa sieci zasilającej X_C była równa reaktancji indukcyjnej przekładnika:

$$X_C = X_\mu \quad (2)$$

$$n \cdot 2\pi \cdot f_n \cdot L_\mu = \frac{1}{2\pi \cdot n \cdot f_n \cdot C}$$

gdzie:

n – rząd harmonicznej,

f_n – częstotliwość rezonansowa,

L_μ – indukcyjność przekładnika,

C – pojemność systemu zasilania.

Sytuacja komplikuje się znacznie, bowiem wielkością dynamiczną jest reaktancja systemu elektroenergetycznego X_C zmienna zależnie od warunków pracy sieci. Jednak przede wszystkim zmienia się reaktancja magnesowania rdzenia X_{Fe} , której wartość zależy od zmieniającego się napięcia zasilającego i może spowodować jej dopasowanie do reaktancji sieci. Dzieje się tak, gdy wraz ze wzrostem napięcia, indukcja w rdzeniu magnetycznym wchodzi w obszar nasycenia i reaktancja gwałtownie maleje. Na rysunku 3 pokazano przykładowe charakterystyki magnesowania taśmy gorąco- i zimnowalcowanej stosowanej do wykonania rdzeni przekładników.

W obszarze nasycenia, powyżej „punktu kolanowego”, oznaczonego na rysunku 3 symbolem V_k , małym przyrostom napięcia po stronie pierwotnej odpowiada duża przyrosty prądu po stronie wtórnej przekładni-

ka. Jednocześnie są one znacznie odkształcone w obwodzie wtórnym, co powoduje powstanie widma prądów harmonicznych. To z kolei niesie groźbę dopasowania reaktancji pojemnościowych i indukcyjnych i powstania ferorezonansu. Z charakterystyki tej wynika, że ze względu na możliwość wystąpienia ferorezonansu, blachy gorącowalcowane są lepszym materiałem na rdzenie przekładników.

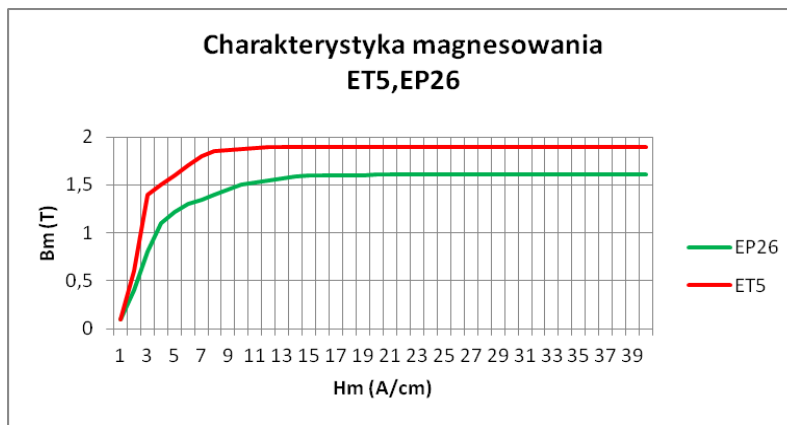
3. WPŁYW PRZEKŁADNIKÓW NA MOŻLIWOŚCI POWSTANIA FEROREZONANSU

W zależności od konfiguracji połączeń w układach zasilających powstawać mogą ferorezonanse prądowy lub napięciowy. Zasadniczym elementem mającym na to wpływ jest sposób połączenia punktu neutralnego z ziemią. Mogą tu wystąpić następujące przypadki:

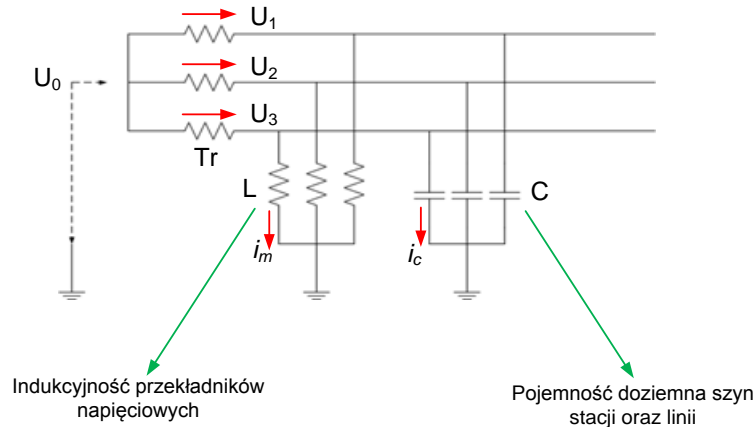
- ferorezonans w układach elektroenergetycznych wysokich napięć z bezpośrednio uziemionym punktem neutralnym,
- ferorezonans w układach elektroenergetycznych średnich napięć z izolowanym punktem neutralnym.

Czynnikami sprzyjającymi powstawaniu ferorezonansu są:

- wszelkie czynności łączeniowe (w tym również zapłon tyrystorów, włączenie tranzystorów mocy itd.), co skutkuje wystąpieniem napięcia U_0 (Rys. 4) powodującego indukowanie dodatkowego strumienia w przekładnikach,
- niesymetria obciążenia bez względu na jej źródło,
- krótkotrwałe doziemienia lub zadziałania SPZ.



Rys. 3. Charakterystyki magnesowania taśm zimnowalcowanej ET5 oraz gorąco walcowanej EP26 dla indukcji 1T i częstotliwości 50 Hz



Rys. 4. Sieć zasilająca z izolowanym punktem neutralnym uziemionym przez przekładniki napięciowe

Na rysunku 4 przedstawiono schemat sieci zasilającej z izolowanym punktem zerowym o dużym prawdopodobieństwie powstania ferorezonansu.

Wszelkie czynności łączeniowe w układzie powodują pojawienie się napięcia pomiędzy punktem gwiazdowym a ziemią, oznaczonego na rysunku 4 jako U_0 . Napięcie to powoduje powstanie dodatkowego strumienia magnetycznego oprócz strumieni pochodzących od napięć fazowych.

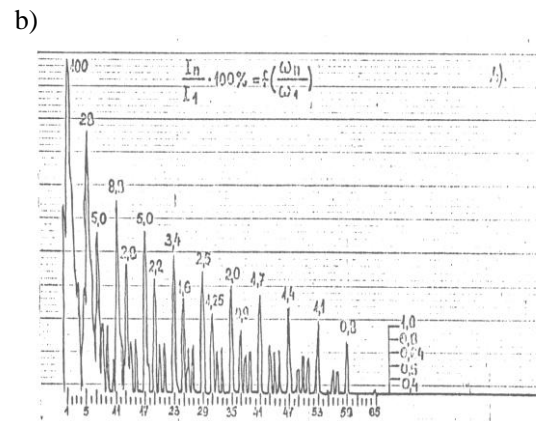
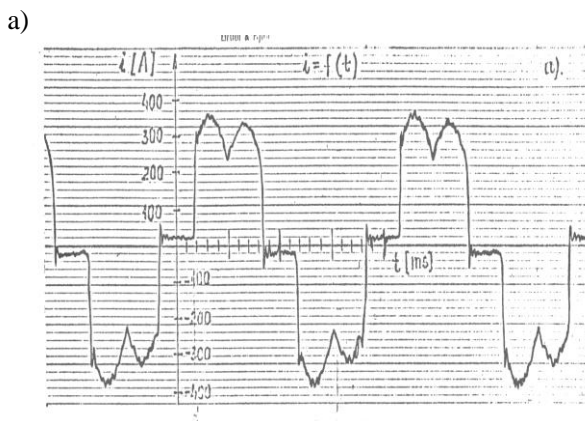
Należy zatem stwierdzić, że przekładniki mogą samoistnie być źródłem oscylacji i powstania ferorezonansu w układach pomiarowych. Jeśli wziąć pod uwagę, że stanowią one integralną część wszystkich układów do pomiaru i analizy przebiegów odkształconych oraz bilansu mocy, a same mogą być źródłem zaburzeń należy je traktować z bardzo dużą uwagą. Niestety zdarza się, że wiele pomiarów, w wyniku których stwierdzamy występowanie rezonansu w układzie, rejestruje jedynie ferorezonans z udziałem przekładników. Niewielu producentów aparatury pomiarowej zwraca uwagę na ten fakt.

4. PRZYKŁADY ANALIZY POMIAROWEJ

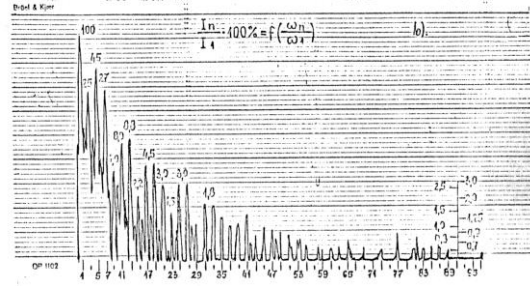
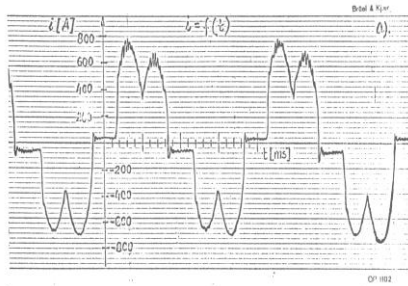
Na rysunku 5 przedstawiono przebieg prądu fazowego zasilającego napęd maszyny papierniczej MP 4 w Świeciu oraz jego widmo. Pierwotnie stwierdzono obecność rezonansu z uwagi na znacznie odkształcony przebieg prądu oraz wyraźnie powiększone amplitudy harmonicznych, szczególnie w zakresie niższych rzędów. Wskazywały na to również znane przed pomiarem wielkości reaktancji sieci (w tym baterii kondensatorów).

Jednak bliższa analiza wykazała, że zachodzi tu przypadek ferorezonansu, szczególnie w zakresie częstotliwości powyżej 41 rzędu. Dodatkowo zazwyczaj świadczą o tym „pióropusze” – drgania wysokich częstotliwości nałożone na przebieg podstawowy – widoczne na rysunku.

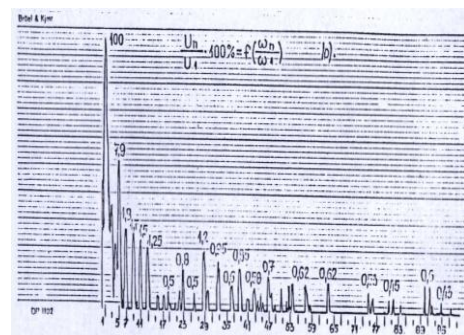
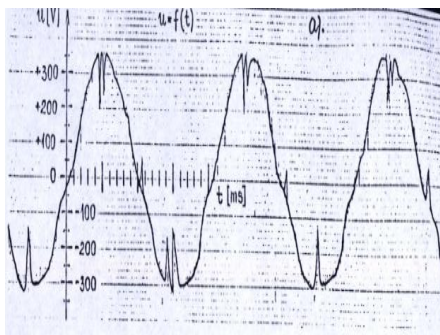
Jeszcze lepiej jest to widoczne na rysunku 6, gdzie amplitudy drgań nałożone na przebieg podstawowy mają większe wartości, ale przede wszystkim widmo harmonicznych prądu sięga 95 harmonicznej.



Rys. 5. Przebieg oraz widmo amplitudowo-częstotliwościowe prądu zasilającego napęd krajarki MP-44. Rozdzielnia STR15, transformator Tr2/3, pasmo 2 kHz, szafa ASEA



Rys. 6. Przebieg oraz widmo amplitudowo-częstotliwościowe prądu zasilającego napęd 1 i 2 prasy MP-4. Rozdzielnia STR15, transformator Tr1/2, pasmo 2 kHz, szafa nr 2



Rys. 7. Przebieg oraz widmo amplitudowo-częstotliwościowe napięcia zasilającego napęd 1 i 2 MP-4. Rozdzielnia STR15, transformator Tr1, pasmo 2 kHz, szafa nr 2

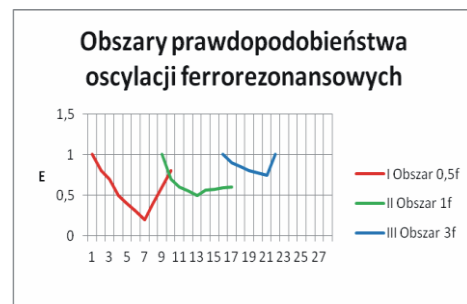
Przeprowadzono również pomiary napięcia w obwodach wtórnych przekładników napięciowych. Na rysunku 7 przedstawiono wyniki w postaci przebiegów napięć i widma napięcia.

Mimo niewielkiego odkształcenia sinusoidy napięcia zasilającego, zaobserwowano bardzo bogate widmo z udziałem harmonicznych do 95 włącznie. Potwierdza to przypuszczenia, że w układzie wystąpił ferorezonans z udziałem przekładników. Jako środek zaradczy zastosowano uziemienie przez opornik punktu gwiazdowego przekładników, co usunęło problemy z niekontrolowanymi włączeniami zabezpieczeń.

5. UWAGI PRAKTYCZNE

Analiza obliczeniowa, jak już wspomniano, obarczona może być dużym błędem. Z kolei analiza pomiarowa jest czasochłonna i wymaga dużego doświadczenia w interpretacji wyników pomiarów. Warto zatem podać kilka wskazówek praktycznych wyznaczających obszary potencjalnego zagrożenia powstaniem ferorezonansu. Badania prowadzone przez laboratoria ZWAR pozwoliły na wyłonienie kilku obszarów o różnym stopniu prawdopodobieństwa powstania ferorezonansu [22]. Jako podstawowe parametry przyjęto stosunek reaktancji pojemnościowej systemu elektroenergetycznego do reaktancji indukcyjnej przekładnika sprowadzonej do strony

pierwotnej $\frac{X_c}{X_\mu}$. Drugim parametrem jest fazowe napięcie źródłowe E wyrażone jako krotność pierwotnego napięcia kolanowego przekładników V_K . Tak pomyślane parametry pozwoliły na eksperymentalne wyznaczenie trzech obszarów zagrożenia powstaniem ferorezonansu. Na rysunku 8 przedstawiono zależność E od $\frac{X_c}{X_\mu}$ [22].



Rys. 8. Obszary prawdopodobieństwa powstania drgań ferorezonansowych

Obszar pierwszy wyznaczony jest dla stosunku $\frac{X_c}{X_\mu}$ spełniającego warunek $0,01 \leq \frac{X_c}{X_\mu} \leq 0,1$.

W obszarze tym spodziewać się można powstania subharmonicznych o znacznych amplitudach.

Obszar drugi spełniający warunek $0,1 \leq \frac{X_c}{X_\mu} \leq 0,6$, to

obszar sprzyjający powstaniu oscylacji o częstotliwości podstawowej, jednak o znacznych amplitudach mogących uszkodzić termicznie uzwojenie pierwotne przekładnika.

I wreszcie obszar trzeci, gdzie $0,6 \leq \frac{X_c}{X_\mu} \leq 6$,

w którym dominować mogą harmoniczne trzecia i jej wielokrotności.

Zakłócenia powodowane ferrezonansami mogą być bardzo uciążliwe w eksploatacji. Można jednak stosunkowo prostymi metodami ograniczyć ich możliwość powstawania. Do podstawowych należą:

- zastosowanie przekładników antyferrezonansowych,
- włączenie rezystora tłumiącego do obwodu otwartego trójkąta,
- zastosowanie bezpieczników w obwodach pierwotnych przekładników,
- skuteczne uziemienie punktu neutralnego sieci,
- uziemienie przez opornik punktu gwiazdowego przekładników,
- dołączenie dodatkowych pojemności w celu odstrojenia od częstotliwości rezonansowych.

6. WNIOSKI

- Ferrezonans może powodować zafałszowanie analizy widma prądów i napięć zasilających.
- Ferrezonans może powodować błędne zadziałanie zabezpieczeń ziemnozwarciowych i innych układów kontrolno-pomiarowych.
- Ferrezonans jest zjawiskiem nie do końca poddającym się analizie ze względu na nieliniowość indukcyjności magnesowania rdzenia przekładników.
- Zastosowanie blachy gorącowalcowanej wpływa tłumiąco na możliwość powstania ferrezonansu.

Literatura

1. *Steinmetz Ch. P.*: Is a phase-shift in the current of an electric arc?, *Elektrotechnische Zeitschrift*, Heft 42, 1892.
2. *Budeanu C.I.*: Puissances reactivas et fictives, Institut Romain de l'Energie, Bucharest 1927.
3. *Fryze S.*: Moc rzeczywista, urojona i pozorna w obwodach elektrycznych o przebiegach odkształconych prądu i napięcia. *Przegląd Elektrotechniczny*, z.7, z. 8, 1932.
4. *Shepherd W., Zakikhani P.*: Suggest definition of reactive power for nonsinusoidal systems, *Proc.IEE*, No9, 1972.
5. *Sharon D.*: Reactive power definitions and power factor improvement in nonlinear systems, *Proc. IEE*, No6, 1973.
6. *Buchholz F.*: Die Drehstrom-Scheileistung bei ungleichmabiger Belastung der drei Zweige, *Licht und Kraft*, No2, 1922.
7. *Curtis H., Silsbee F.*: Definitions of power and related quantities, *Trans. AIEE*, Vol. 54, 1935.
8. *Depenbrock M.*: Wirk und Blindleistung, *ETG-Fachtagung*, Aachen, 1979.
9. *Kusters N., Moore W.*: On the definition of reactive power under nonsinusoidal conditions, *IEEE Trans. Pow. Appl. Syst.*, Vol.99, 1980.
10. *Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A.*: Generalized theory of instantaneous reactive power in three-phase circuits, *Proc. JIEE*, Tokyo, 1983.
11. *Czarnecki L.S.*: Moce w obwodach elektrycznych z niesinusoidalnymi przebiegami prądów i napięć, *Oficyna Wyd. Pol. Warsz.*, 2005.
12. *Illović M.*: Definition et mesure de la puissance et de l'energie reactivas, *Bull. Soc. Franc. Electric.*, 1925.
13. *Understanding FFT Windows*, Application Note AN014, LDS-group, 2003.
14. *Pawłowski M.*: Harmoniczne parzyste prądu i napięcia w warunkach rezonansu w układach zasilania napędów przekształtnikowych. *Mechanizacja i Automatyza Górnictwa 2007*, nr 7.
15. *Pawłowski M.*: Interharmoniczne w warunkach rezonansu w układach zasilania napędów przekształtnikowych. *Mechanizacja i Automatyza Górnictwa 2006*, nr 8.
16. *Pawłowski M.*: Podstawy analizy harmonicznej odkształconych przebiegów prądów i napięć w sieciach zasilających. *Mechanizacja i Automatyza Górnictwa 2010*, nr 7.
17. *Pawłowski M.*: Wybrane problemy eksploatacji przemysłowych sieci zasilających z bateriami kondensatorów do kompensacji mocy biernej. *Mechanizacja i Automatyza Górnictwa 2004*, nr 7.
18. *Nowak W., Kerzel B., Paják P.*: Komputerowa analiza zjawiska ferrezonansu w układach elektroenergetycznych wysokiego napięcia. *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Pol. Gdańskiej 2008*, nr 25.
19. *Pawlak M.*: Zastosowanie funkcji okien czasowych w diagnostyce wimików silników indukcyjnych. *Prace Naukowe Inst. Maszyn Napędów i Pom. Elektr.*, No62, 2008.
20. *Moskwa Sz., Nowak W., Tarko R.*: Modelowanie i analiza układów średniego napięcia dla oceny warunków i skutków wystąpienia ferrezonansu oraz sposoby jego eliminacji. *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Pol. Gdańskiej 2009*, nr 26.
21. *Wilkosz K.*: Estymacja stanu rozdzielczych sieci elektroenergetycznych - przegląd metod. *Wiadomości Elektrotechniczne 2005*, nr 1.
22. *Cichoń H.*: Praktyczne sposoby eliminacji ferrezonansu w sieciach elektroenergetycznych. *COSiW SEP 2005*, ISBN 83-89008-57-2.

Recenzent: dr inż. Marcin Habrych

THE PHENOMENA OF FERRORESONANCE IN MEASURE CIRCUITS OF SUPPLY ELECTRICAL NETWORKS

In the paper is given analyse of phenomena of current and voltage ferrozonance. There are given the prinzip of spectrum analyse with exemples. There were describes influence of voltage transformers on the possibilities of occurrence of ferrozonance. There are presented the ways of its elimination. Finally given conclusions.

ФЕРРОРЕЗОНАНС В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СХЕМАХ СЕТЕЙ ПИТАНИЯ

В статье представлен анализ явления феррозонанса тока и напряжения. Кроме этого указаны основания гармонийного анализа вместе с примерами. Представлено влияние преобразователей на возможность появления феррозонанса, а также представлены способы устранения последствий феррозонанса.