

Józef KWICZALA¹⁾, Franciszek RODOŃ²⁾, Stanisław CHOLEWA²⁾

¹⁾ POLITECHNIKA ŚLĄSKA, INSTYTUT METROLOGII I AUTOMATYKI ELEKTROTECHNICZNEJ

²⁾ ENERGOTEST – ENERGOPOMIAR SP. Z O.O., GLIWICE

Wykorzystanie nowoczesnych materiałów magnetycznych w konstrukcji magnetowodów

Dr inż. Józef KWICZALA

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Pracuje jako nauczyciel akademicki w Instytucie Metrologii i Automatyki Elektrotechnicznej. Zajmuje się problematyką komputerowych systemów pomiarowych. Jest rzeczoznawcą i weryfikatorem Stowarzyszenia Elektryków Polskich w dziedzinie Cybernetyka Techniczna i Technika Pomiarowa oraz członkiem Komisji Metrologii Polskiej Akademii Nauk - oddziału w Katowicach.

e-mail: jozef.kwiczala@polsl.pl



Inż. Franciszek RODOŃ

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Od początku swej pracy zawodowej związany z ZPBE Energopomiar. Aktualnie kierownik Działu Produkcji PUE Energotest-Energopomiar w Gliwicach. Wspólnie z firmą Magnon z Gliwic opracował i wdrożył do produkcji rodzimą przekładnik Ferrantiego. Współautor opracowanych w P.U.E. Energotest-Energopomiar zabezpieczeń ziemnozwarciowych typu RPPI oraz Zlo.

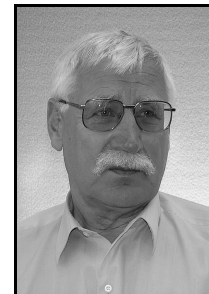
e-mail: frodon@energotest.gliwice.pl



Mgr inż. Stanisław CHOLEWA

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej z 1962 r. Po ukończeniu studiów podjął pracę w Zakładzie Elektrycznym ZPBE Energopomiar w Gliwicach. Uczestniczył w pracach związanych z badaniami i uruchamianiem urządzeń i układów elektrycznych w wielu obiektach energetycznych w kraju i za granicą. Od 1989 r. pełnił funkcję kierownika Działu Automatyki Zabezpieczeniowej Elektrowni. Od 1995 r. jest dyrektorem technicznym P.U.E. Energotest – Energopomiar w Gliwicach.

e-mail: scholewa@energotest.gliwice.pl



Streszczenie

W artykule przedstawiono możliwości wykorzystania materiałów amorficznych w konstrukcji magnetowodów. Materiały te charakteryzują się bardzo dużą przenikalnością początkową oraz bardzo małą stratnością. Opisano możliwości zastosowania, np. w konstrukcji przekładników Ferrantiego, rdzeni kompozytowych – rdzeni złożonych z materiału tradycyjnego (żelazokrzem) o małej przenikalności i dużej indukcji nasycenia oraz materiału o dużej przenikalności magnetycznej i małej indukcji nasycenia (metglas).

Słowa kluczowe: materiały amorficzne, rdzeń magnetyczny, przekładnik prądowy

Application of modern magnetic materials to magnetic cores

Abstract

The paper presents application of amorphous materials to construction of magnetic cores. These materials are characterized by very high initial relative permeability and very low losses. Application of composite cores to construction i.e. of the Ferranti earth-fault current transformer was presented. The composite core consisting of two toroidal cores made of silicon-iron steel (low permeability and high magnetic flux density saturation) and metglas tape (high permeability and low magnetic flux density saturation).

Keywords: amorphous materials, magnetic core, current transformer

1. Wprowadzenie

Postęp w technologii materiałów magnetycznie miękkich zawoocował pojawieniem się na rynku materiałów o bardzo małych stratnościach (rzędu mW/kg) oraz bardzo dużych wartościach względnej przenikalności magnetycznej (rzędu setek tysięcy), np. materiały amorficzne (metglas) lub nanokrystaliczne (finemet) [6, 8]. Dzięki swoim właściwościom materiały amorficzne znalazły zastosowanie głównie w konstrukcji współczesnych transformatorów energetycznych.

W konstrukcji magnetycznych przekładników pomiarowych oraz zabezpieczeniowych ich wykorzystanie nie jest jak dotąd powszechne. Ograniczeniem w ich zastosowaniu jest dużo mniejsza niż w stalach krzemowych (prawie dwukrotnie) indukcja nasycenia. Są również zdecydowanie droższe.

Jednak z punktu widzenia właściwości metrologicznych przekładników, dotychczas stosowane materiały magnetyczne rdzeni przestały spełniać wymagania konstruktorów. Prace badawcze nad zwiększaniem dokładności przekładników powinny zatem pójść w kierunku wykorzystania najnowszych technologii materiałów magnetycznych jak również zastosowania w konstrukcji magnetowodów rdzeni złożonych.

Możliwości technologiczne Instytutu Metali Nieżelaznych w Gliwicach, głównego producenta magnetycznych stopów amorficznych oraz parametry magnetyczne tych materiałów [8], skłoniły autorów do podjęcia prac w celu zbadania przydatności materiałów amorficznych do konstrukcji magnetowodów przekładników energetycznych.

Zastosowanie materiałów amorficznych do konstrukcji magnetowodów transformatorów pomiarowych przedstawione zostało szczegółowo w pracach [4, 5, 7]. W konstrukcji przekładników do zabezpieczeń ziemnozwarciowych (przekładniki Ferrantiego) ich wykorzystanie jest jak dotąd nieznane.

Przekładniki Ferrantiego służą do zasilania obwodów prądowych zabezpieczeń ziemnozwarciowych w sieciach energetycznych średniego napięcia. Pełnią funkcję ochronną sieci i urządzeń elektroenergetycznych od skutków zwarć doziemnych [9, 10].

W chwili wystąpienia składowej zerowej prądu (zwarcia doziemnego w sieci), w uzwojeniu wtórnym przekładnika pojawia się prąd, proporcjonalny do wartości prądu zwarciego w obwodzie pierwotnym, będący sygnałem dla dowolnego zabezpieczenia ziemnozwarciowego.

Zakres wartości prądu znamionowego strony pierwotnej zawiera się w przedziale (0,1 ÷ 100) A. Coraz większe staje się jednak zapotrzebowanie na przekładniki Ferrantiego o szerszym zakresie transformowanych prądów [9]. Dla poprawnej pracy przekładników należy zatem zapewnić zarówno większą czułość (mniejszą wartość w dolnym zakresie prądu znamionowego) jak i poprawną pracę w warunkach zwarciovych (większą wartość w jego górnym zakresie). Istotnym wymaganiem stawianym przekładnikom jest również niski koszt ich produkcji.

2. Budowa przekładników zabezpieczeń ziemnozwarciowych

2.1. Właściwości materiałów magnetycznych rdzeni

Wymagania stawiane materiałom magnetycznym przeznaczonym do budowy rdzeni przekładników Ferrantiego dotyczą przede wszystkim :

- jak najmniejszej stratności, co prowadzi do wysokiej sprawności przetwarzania energii,
- jak największej względnej początkowej przenikalności magnetycznej,
- dużej indukcji magnetycznej w zakresie zmian natężenia pola magnetycznego, określanych warunkami pracy urządzenia energetycznego, co pozwala na uzyskanie wymaganych parametrów użytkowych tego urządzenia.

Ogólnie można wyróżnić dwa kierunki rozwojowe w inżynierii materiałów magnetycznych wykorzystywanych do produkcji rdzeni. Pierwszy z nich polega na poprawie parametrów magnetycznych materiałów konwencjonalnych (blachy elektrotechniczne, stopy Ni-Fe) [1, 2, 3]. Drugi kierunek rozwoju technologii materiałów jest związany z produkcją materiałów o strukturze amorficznej o podstawowym składzie $(\text{CoFeMnMo})_{77,5}(\text{SiB})_{22,5}$, który posłużył firmie Vacuumschmelze do pełnego opanowania technologii produkcji taśmy METGLAS.

Prace naukowe w zakresie zastosowania współczesnych materiałów magnetycznych wskazują na możliwości poprawienia parametrów metrologicznych przekładników Ferrantiego poprzez modyfikację zarówno właściwości magnetycznych rdzeni jak i ich konstrukcji.

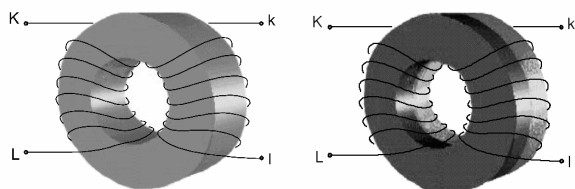
2.2. Konstrukcja rdzeni przekładników

Przekładnik Ferrantiego zbudowany jest z toroidalnego rdzenia magnetycznego, na którym nawinięte są dwa uzwojenia. Jedno z nich przeznaczone jest do zasilania przełącznika zabezpieczenia ziemnozwarciowego, natomiast drugie jest uzwojeniem dodatkowym, przewidzianym do sprawdzania zabezpieczenia. Tak uzwojony rdzeń jest następnie zalany kompozycją epoksydową, która stanowi izolację główną przekładnika. Przekładnik nie ma uzwojenia pierwotnego, a w warunkach eksploatacyjnych jest nim trójżyłowy kabel elektroenergetyczny sieci trójfazowej, przewleczony przez otwór w przekładniku, położony współśrodkowo względem uzwojonego rdzenia [10].

W pracy zbadano zależność pomiędzy parametrami współczesnych materiałów magnetycznych, a czułością i wiernością transformacji prądowych przekładników Ferrantiego, zwłaszcza w dolnym zakresie prądu pierwotnego. Określono również strukturę magnetowodu złożonego z rdzeni o różnych właściwościach magnetycznych – magnetowodu kompozytowego, pozwalającą na uzyskanie optymalnych parametrów metrologicznych tych przekładników. Struktury rdzeni przedstawiono schematycznie na rysunku 1.

Do konstrukcji magnetowodów wykorzystano rdzenie wykonane z różnych rodzajów materiałów:

- rdzeń ze stali krzemowej (089-27-N5) – o małej przenikalności magnetycznej, dużej stratności i dużej koercji lecz wysokiej indukcji nasycenia ($B_{\text{max}} = 1.8 \text{ T}$, $H_c = 28 \text{ A/m}$, $\mu_{\text{max}} = 30000$),
- rdzeń z materiału amorficznego (metglas) – o dużej przenikalności magnetycznej, małej stratności i małej koercji lecz niezbyt dużej indukcji nasycenia ($B_{\text{max}} = 1.4 \text{ T}$, $H_c = 5 \text{ A/m}$, $\mu_{\text{max}} = 150000$),
- rdzeń kompozytowy składający się z materiału ze stali krzemowej oraz materiału amorficznego.

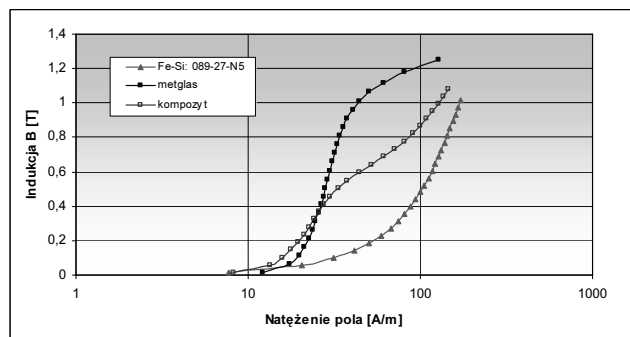


Rys. 1. Struktura rdzenia standardowego (monolitycznego) oraz kompozytowego
Fig. 1. The structure of standard (monolith) and composite magnetic cores

Przypadek (a) oraz (b) stanowi standardową (monolityczną) konstrukcję rdzenia przekładnika prądowego lecz wykonaną z różnych materiałów magnetycznych. Konstrukcja (c) jest przykładem magnetowodu kompozytowego, gdzie pewną część materiału standardowego (stali krzemowej) zastąpiono materiałem o lepszych właściwościach magnetycznych [8].

3. Pomiary, charakterystyki oraz wyniki badań

Charakterystyki magnesowania materiałów: tradycyjnego materiału używanego do budowy rdzeni przekładników – stali krzemowej o symbolu 089-27-N5 produkcji zakładu STALPRODUKT S.A. w Bochni oraz materiału amorficznego (metglas - IMN) przedstawiono na rysunku 2 [odpowiednio krzywe (1) oraz (2)]. Krzywa (3) przedstawia wypadkową charakterystykę magnesowania rdzenia kompozytowego złożonego ze stali krzemowej oraz materiału amorficznego. Natomiast na rysunku 3 przedstawiono charakterystyki względnej przenikalności magnetycznej rozpatrywanych materiałów w funkcji indukcji magnetycznej. Przenikalność magnetyczna materiału magnetycznego magnetowodu jest istotnym parametrem decydującym o wartości impedancji gałęzi poprzecznej schematu zastępczego przekładnika, a zatem o wartości błędu transformacji.

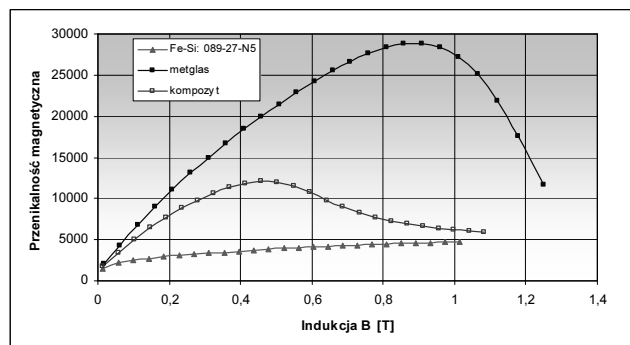


Rys. 2. Charakterystyki magnesowania różnych typów materiałów

- 1 – stal krzemowa (089-27-N5),
- 2 – materiał amorficzny (metglas),
- 3 – wypadkowa charakterystyka magnesowania rdzenia kompozytowego

Fig. 2. Magnetization curves of various magnetic materials

- 1 – silicon steel 089-27-N5,
- 2 – amorphous (metglas),
- 3 – resultant magnetization curve of composite core



Rys. 3. Charakterystyki względnych przenikalności magnetycznych rozpatrywanych materiałów

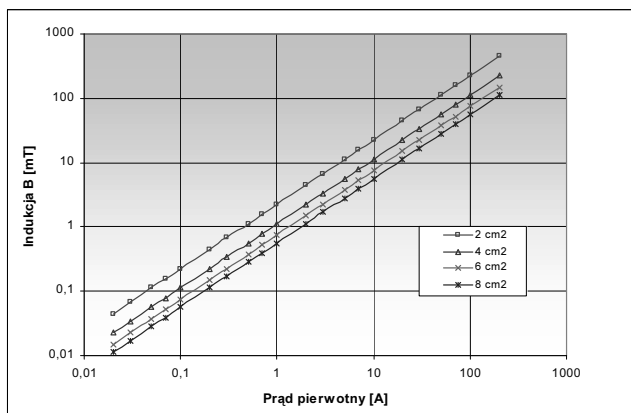
- 1 – stal krzemowa (089-27-N5),
- 2 – materiał amorficzny (metglas),
- 3 – „wypadkowa” przenikalność magnetyczna rdzenia kompozytowego

Fig. 3. Relative permeability of various magnetic materials

- 1 – silicon steel 089-27-N5,
- 2 – amorphous (metglas),
- 3 – “resultant” permeability of composite core

Rdzeń kompozytowy, jako wypadkowy „materiał magnetyczny”, charakteryzuje się dużą przenikalnością początkową, małym stosunkiem przenikalności maksymalnej do początkowej i małą stratnością. Natomiast indukcja nasycenia takiego wypadkowego „materiału magnetycznego” jest równa indukcji nasycenia stali krzemowej. W początkach charakterystyki magnesowania magnetowodu kompozytowego (dla małych natężeń pól i małych indukcji) wartości indukcji i przenikalności są zbliżone do wartości parametrów rdzenia z metglasu, natomiast w dalszej części charakterystyki wartości parametrów magnetowodu kompozytowego zbliżają się do wartości parametrów rdzenia ze stali krzemowej.

Wartość indukcji w rdzeniu przekładnika Ferrantiego – przy stałej wartości częstotliwości ($f = 50$ Hz), ustalonej przekładni znamionowej ($n_1/n_2 = 1/100$) oraz zadany obciążeniu strony wtórnej przekładnika ($Z_{obc} = 1 \Omega$) – jest funkcją pola przekroju poprzecznego rdzenia (s) oraz wartości prądu pierwotnego I_1 . Zakres zmian indukcji magnetycznej w magnetowodzie przekładnika Ferrantiego przedstawiono na rysunku 4.



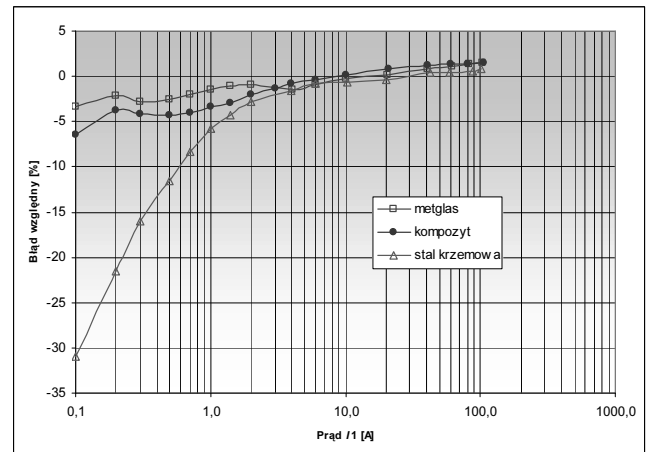
Rys. 4. Zależność indukcji w rdzeniu od wartości prądu strony pierwotnej
Fig. 4. Magnetic flux density vs. primary current

Maksymalna wartość indukcji w rdzeniu, przy jego polu przekroju rzędu kilku cm^2 , wynosi kilkaset mT i jak wynika z rys. 3, zawiera się w zakresie zmian indukcji, dla których wartości parametrów magnetowodu kompozytowego są zbliżone do parametrów rdzenia z metglasu. Wynika stąd, że można zatem zastąpić część magnetowodu rdzeniem ze stali krzemowej, nie zmniejszając wartości jego wypadkowej przenikalności. Błędy przekładnika Ferrantiego, przy wykorzystaniu magnetowodu kompozytowego powinny być zatem znacznie mniejsze od błędów przekładnika wykonanego na rdzeniu ze stali krzemowej i porównywalne z błędami przekładnika wykonanego na rdzeniu z metglasu.

Wnioski te zweryfikowano doświadczalnie, konstruując przekładniki na rdzeniach o takich samych polach przekroju oraz takich samych średnich drogach magnetycznych lecz wykonanych z różnych materiałów. Porównanie parametrów metrologicznych przekładników o takich samych wymiarach geometrycznych pozwoli bezpośrednio wyciągnąć wnioski co do możliwości zastosowania rdzeni kompozytowych. Magnetowód pierwszego przekładnika wykonano z rdzenia ze stali krzemowej, drugi z metglasu natomiast trzeci magnetowód wykonano z połączonych rdzeni z żelazokrzemu oraz metglasu. Parametry geometryczne rdzeni magnetowodów były równe: pola przekroju poprzecznego $s = (1,25 + 1,25) \text{ cm}^2$, natomiast średnie drogi magnetyczne $l_{sr} = 33,8$ cm. Przekładnię badanych przekładników przyjęto równą przekładni zwojowej stosowanej w przekładnikach przemysłowych: $n_1/n_2 = 1/98$. Wyniki pomiarów błędów przekładników przedstawiono na rysunku 5.

Błędy przekładników wykonanych na rdzeniach z metglasu oraz na rdzeniu kompozytowym są znacznie mniejsze od błędów przekładnika wykonanego na rdzeniu ze stali krzemowej. Wynika stąd konieczność wykorzystania w konstrukcji rdzeni przekładników zabezpieczeń ziemnozwarciowych współczesnych materia-

łów amorficznych. Natomiast błędy przekładnika z rdzeniem z metglasu oraz z rdzeniem kompozytowym różnią się niewiele. Potwierdza to zatem możliwość zastosowania w konstrukcji magnetowodów przekładników rdzeni kompozytowych, poprawiając w ten sposób ich parametry metrologiczne.



Rys. 5. Błędy względne badanych przekładników

- 1 – przekładnik z rdzeniem z metglasu,
- 2 – przekładnik z rdzeniem kompozytowym,
- 3 – przekładnik z rdzeniem ze stali krzemowej

Fig. 5. Relative transformers errors under test

- 1 – transformer with metglas core,
- 2 – transformer with composite core,
- 3 – transformer with standard core

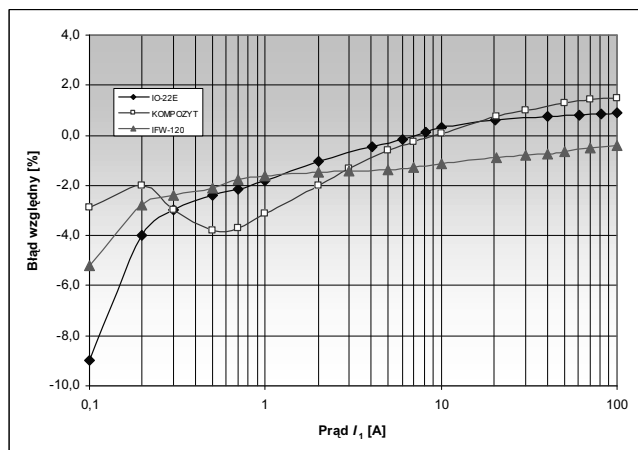
Porównano również wartości błędów wykonanego przekładnika Ferrantiego na rdzeniu kompozytowym ze standardowymi, przemysłowymi przekładnikami zabezpieczeń ziemnozwarciowych. Do badań wybrano dwa egzemplarze przekładników zbudowanych na magnetowodzie monolitycznym, wykonanym z materiału standardowego (stal krzemowa). Przekładnik o symbolu IO-22E był produkcji PUE Energotest – Energopomiar Sp. z o.o. w Gliwicach natomiast przekładnik oznaczony symbolem IFW-120, produkcji ABB Zwar S.A. w Przasnyszu.

Magnetowody tych przekładników miały następujące parametry geometryczne:

Kompozyt	$s = (2,5 + 2,5) \text{ cm}^2$	oraz	$l_{sr} = 33,8$ cm,
IO-22E	$s = 8,9 \text{ cm}^2$	oraz	$l_{sr} = 49,3$ cm,
IFW-120	$s = 15,75 \text{ cm}^2$	oraz	$l_{sr} = 51,4$ cm.

Pomimo znacznie mniejszego pola przekroju poprzecznego rdzeni magnetowodu przekładnika kompozytowego (prawie dwukrotnie w stosunku do rdzenia przekładnika IO-22E i ponad trzykrotnie w stosunku do przekładnika IFW-120), w początkowym zakresie wartości prądu pierwotnego błędy przekładnika na rdzeniu kompozytowym były znacznie mniejsze od błędów przekładników wykonanych na standardowych rdzeniach ze stali krzemowej. Ponieważ błąd przekładnika maleje proporcjonalnie do pola przekroju poprzecznego magnetowodu, więc przy zastosowaniu pola przekroju magnetowodu przekładnika kompozytowego zbliżonego do pola przekroju przekładnika przemysłowego IO-22E, należy spodziewać się jeszcze prawie dwukrotnego zmniejszenia jego błędu.

Porównanie błędów przekładników przedstawiono na rysunku 6. Zaprezentowane wyniki pomiarów przemawiają za celowością konstruowania kompozytowych rdzeni magnetycznych. W realiach gospodarki rynkowej, budując rdzeń kompozytowy z taniego materiału, o średnich właściwościach magnetycznych oraz drogiego, cechującego się bardzo dobrymi parametrami, można uzyskać rdzeń, którego właściwości metrologiczne spełniają założenia konstruktora co do wysokiej klasy dokładności przekładnika oraz ograniczą środki finansowe przeznaczone na realizację zadania celowego.



Rys. 6. Błędy przekładników Ferrantiego
1, 3 – przekładniki z rdzeniem standardowym,
2 – przekładnik z rdzeniem kompozytowym

Fig. 6. Ferranti transformers errors
1, 3 – transformers with standard core,
2 – transformer with composite core

4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono istotne cechy amorficznych materiałów magnetycznych, wykorzystanych do konstrukcji magnetowodów przekładników Ferrantiego. Wykazano przydatność ich zastosowania w konstrukcji rdzeni kompozytowych – rdzeni złożonych z materiałów o różnych właściwościach magnetycznych. Jednego o dużej przenikalności magnetycznej i małej indukcji nasycenia, drugiego – o małej przenikalności lecz dużej indukcji nasycenia. Zastosowanie tego typu rdzeni pozwoli podnieść parametry metrologiczne przekładników zabezpieczeń ziemnozwarciowych (dokładność przekładni, zakres transformowanych prądów), przy praktycznie niezmiennym koszcie wykonania przekładnika. Błąd przekładni przekładnika dla dolnego zakresu prądu pierwotnego (kilkudziesięciu mA) został zmniejszony ponad dwukrotnie do wartości kilku procent. Zachowany został przy tym niezniekształcony kształt transformowanego prądu w jego górnym zakresie (kilkaset A).

Praca naukowa finansowana ze środków Ministra Edukacji i Nauki w latach 2005 – 2008 jako projekt badawczy zamawiany nr PBZ-KBN-115/T08/2004.

5. Literatura

- [1] Koszmider A., Olak J., Piotrowski Z.: Przekładniki prądowe, WNT, Warszawa 1985.
- [2] Starczakow W.: Przekładniki, PWT, Warszawa, 1959.
- [3] Parasuram M., Instrument transformers, Kappa Electricals, Chennai (India), 2002.
- [4] Kwiczala J., Kolano R., Kolano-Burian A.: Composite core and its application to current transformer - Soft Magnetic Materials 16, Max-Planck-Institut für Eisenforschung GmbH, Duesseldorf, Germany, Vol.1, 2003.
- [5] Kwiczala J., Kasperczyk B., Kolano R., Kolano-Burian A.: Zastosowanie materiałów amorficznych do konstrukcji magnetowodów transformatorów pomiarowych - Materiały Konferencyjne – Międzynaczelniarna Konferencja Metrologów (MKM'2004), Prace Komisji Metrologii Oddziału PAN w Katowicach, Seria: Konferencje Nr 7, Ustroń 2004.
- [6] Kolano R., Kolano-Burian A.: Magnetycznie miękkie materiały szybko schładzane – nowa generacja materiałów dla elektrotechniki, Przegląd Elektrotechniczny 11' 2002.
- [7] Kwiczala J.: Transformatory pomiarowe o zmodyfikowanych strukturach i parametrach magnetowodów – Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej – Elektryka Z.190 – Gliwice 2004.
- [8] Wojcik N., Kolano R.: Construction and Magnetic Properties of the Amorphous Nanocrystalline Cores, SMM Conference Abstract, Hungary 1999.
- [9] Kochel Z., Rodoń F., Talaga M.: Skuteczne metody eliminacji zwarć i ograniczenia ich następstw, Automatyka Elektroenergetyczna, Nr 3/2004 (44).
- [10] Karty katalogowe: ABB Power Distribution (Przasnysz), Energotest – Energopomiar (Gliwice), VA TECH Ferranti-Packard Transformers Ltd. (Canada), Weston Instruments.

Artykuł recenzowany

System rejestracji i analiz Energotestu

Profesjonalne urządzenia oraz unikalne oprogramowanie

- dedykowany dla układów i urządzeń elektroenergetycznych
- rejestracja zdarzeń i zakłóceń
- dokładna synchronizacja czasu z odbiornika GPS
- bogate kryteria wyzwalania rejestracji
- precyzyjna analiza przyczyn awarii
- bieżąca diagnostyka
- oszczędność czasu i pieniędzy



PUE Energotest-Energopomiar Sp. z o.o.
ul. Chorzowska 44B
44-100 Gliwice
tel. +48 32 270 45 18
fax +48 32 270 45 17

www.energotest.com.pl

RZ30



Rejestrator uniwersalny wielokanałowy.
- do 18 wejść analogowych
- do 140 wejść dwustanowych
- max. częstotliwość próbkowania: 64kHz

Econtroller REC



Rejestrator dopasowany do sygnałów z jednego pola.
- wyświetlacz graficzny 320x240
- rejestracja wyliczanych parametrów sieci (moc, częstotliwość, itp.)
- maks. czas rejestracji: do 60 s.