

# Działanie przetwornika prądowo-napięciowego z rdzeniem amorficznym

*W artykule przedstawiono i omówiono wyniki badań charakterystyk metrologicznych nowej generacji przetworników prądowo-napięciowych wyprodukowanych przy użyciu innowacyjnej technologii miękkich części magnetycznych. Określono błędy prądowe i kątowe przetworników wraz z zakresami prądowymi i częstotliwościowymi ich pracy.*

Słowa kluczowe: *materiały amorficzne, pomiar prądu, przetwornik prądowo-napięciowy, zniekształcone przebiegi prądu*

## 1. WPROWADZENIE

---

Prądy mierzone w obwodach pierwotnych są podstawowym źródłem informacji na temat statusu systemów elektrycznych. Brak tych danych uniemożliwia właściwe sterowanie działaniem urządzenia energoelektrycznego i jego ochroną w przypadku awarii. Wartości prądów pierwotnych zazwyczaj przekraczają możliwości urządzeń pomiarowych, w związku z tym niezbędne jest zastosowanie odpowiedniego, dodatkowego urządzenia w celu dopasowania się do sygnałów o akceptowalnym poziomie. Najczęściej używa się do tego transformatorów lub przetworników z cewką Rogowskiego [7, 11, 12].

Urządzenia energoelektroniczne są coraz częściej wykorzystywane do sterowania różną aparaturą i sprzętem elektrycznym (np. aparaturą elektryczną zasilaną przez przetworniki częstotliwości). Oczywiście w takich przypadkach związane to jest z deformacją przebiegów prądu i napięcia. Zakłócenia te mają znaczny wpływ na jakość pomiarów w sieciach energoelektrycznych. Ma to szczególne znaczenie, kiedy zasilanie i/lub energia oraz prąd i/lub napięcie rozważane są jako kryteria operacyjne w zabezpieczeniach automatycznych elektrycznych systemów zasilania [1, 4, 5].

Doświadczenia pokazują, że błędy związane ze standardowymi przetwornikami prądu lub z zakłóceniami wynikającymi z zastosowania cewki Rogowskiego mogą być dość znaczne w przypadku

przebiegów odkształconych [6, 10]. Dlatego należy znaleźć właściwie zaprojektowane rozwiązanie techniczne albo użyć innych przetworników prądowych (lub prądowo-napięciowych) w przypadku, gdy liczba zastosowanych urządzeń energoelektronicznych jest duża, co może znacznie odkształcić przebiegi prądowe z powodu wygenerowanych wyższych harmonicznych. Wszystkie te przetworniki powinny być odporne na zaburzenia zewnętrzne z pól elektromagnetycznych wygenerowane przez sąsiednie ścieżki prądowe. Alternatywą dla tradycyjnych przetworników prądowych i/lub cewek Rogowskiego mogą być nowo opracowane przetworniki prądowo-napięciowe ze zmodyfikowanym technologicznie rdzeniem wykonanym z materiału amorficznego [3, 8].

## 2. MATERIAŁY AMORFICZNE

---

Wymagania wobec przetworników pomiarowych prądu dotyczą głównie cewki magnetycznej. Dokładne przetworzenie sygnałów wymaga użycia materiałów, które dają minimalne straty energii i maksymalną przenikalność magnetyczną. Zastosowane materiały magnetyczne nie spełniają już wymagań użytkowników i projektantów, zwłaszcza jeżeli chodzi o szerszy zakres częstotliwości i większą dokładność.

Obecnie można wyróżnić dwa kierunki w rozwoju materiałów magnetycznych. Pierwszy ma za zadanie poprawę właściwości powszechnie używanych ma-

teriałów, takich jak stopy niklu i żelaza lub blacha elektrotechniczna. Stopy niklu i żelaza mogą mieć też domieszki innych odpowiednich metali. Natomiast drugi kierunek to rozwój miękkich amorficznych materiałów magnetycznych w formie drobno granulowanych stopów zawierających w 80% metale, takie jak żelazo, nikiel i/lub kobalt. Pozostałe 20% to pierwiastki niemetaliczne, takie jak bor, węgiel, german, fosfor lub krzem. Należą one do grupy tak zwanych szkieł metalicznych o strukturze podobnej do metali ciekłych. Charakteryzują się one wiązaniem metalicznym i powstają w procesie szybkiego schłodzenia płynnego stopu, który tworzy strukturę amorficzną. Z powodu ich cienkiej i kruchej budowy nazywane są materiałami szklistymi. W ich strukturze nie ma atomów ułożonych. Dlatego położenie i typ pierwiastków stopowych w środowisku atomu, liczba wiązań chemicznych oraz odległości i kąty kształtu są różne dla różnych położzeń atomu [13]. Podstawowe cechy, które określają przydatność materiałów amorficznych (produkowanych w formie taśmy) w urządzeniach elektronicznych i energoelektrycznych, to:

- wąska pętla histerezy,
- wysoka oporność,
- mała grubość taśmy.

Wąska pętla histerezy powoduje małe straty histerezy, natomiast grubość taśmy 0,1 mm wpływa na

niskie straty prądu wirowego. Jednakże wadą tych materiałów jest ich wysoka twardość i kruchość.

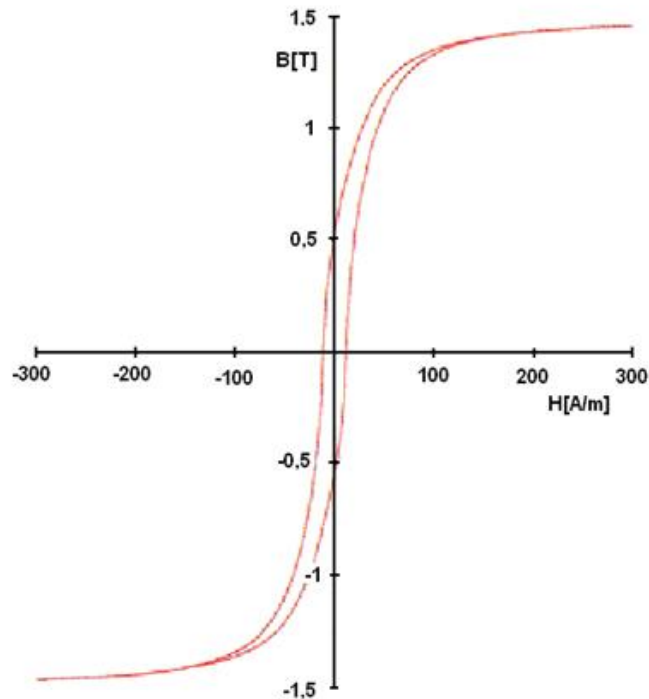
### 3. WYNIKI I ICH OMÓWIENIE

Przedmiotem badań były przetworniki prądowo-napięciowe z rdzeniami amorficznymi o współczynniku skrętu równym 1 mV/A (jak to pokazano na rys. 1). Uzwojenie pierwotne stanowi jeden zwoj przechodzący przez okno przetwornika, podczas gdy uzwojenie wtórne, o określonej liczbie zwojów, jest nawinięte na rdzeń. Zaciski uzwojenia wtórnego S1 i S2 są obciążone rezystorem, który decyduje o wymaganej wartości przekładni. Charakterystyki magnetyzacji materiału amorficznego zastosowanego w rdzeniu przedstawiono na rys. 2.

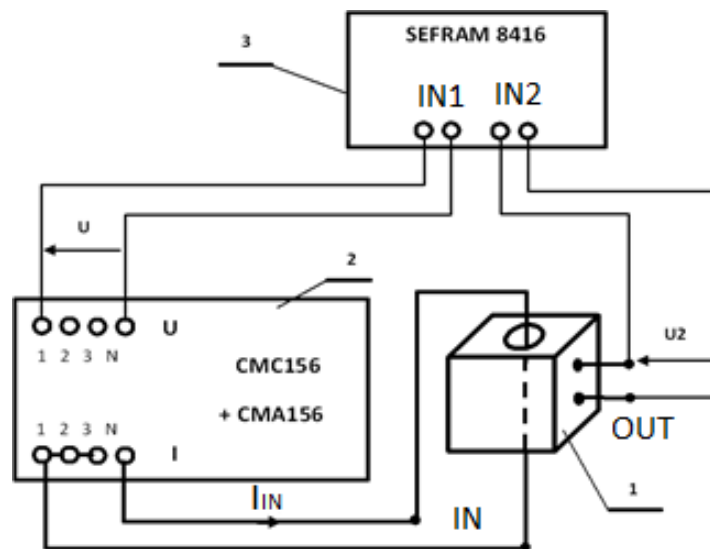
Podczas testu zmierzono i zapisano wartości RMS (wartości średniej kwadratowej) oraz przebiegi prądu pierwotnego i wtórnego. Zbadano też wpływ dokładności transformacji na błąd prądowy i kątowy. Dokonano symulacji przebiegów różnych odkształceń przy różnej zawartości wyższych harmonicznych. Uproszczony schemat systemu do testowania działania przetworników prądowo-napięciowych przedstawiono na rys. 3.



Rys. 1. Widok przetwornika prądowo-napięciowego z materiałem amorficznym



Rys. 2. Krzywa magnetyzacji rdzenia testowanego przetwornika prądowo-napięciowego



Rys. 3. Uproszczony schemat elektryczny systemu do testowania przetworników prądowych;  
1 – badany przetwornik prądowy, 2 – mikroprocesorowy symulator sygnału, 3 – rejestrator cyfrowy

Prąd pierwotny  $I_{IN}$  o wymaganej amplitudzie i częstotliwości został wygenerowany przez źródło prądu typu OMICRON. Następnie zarejestrowano przebiegi wtórne za pomocą rejestratora SEFRAM. Na podstawie wyników pomiarów określono zarówno błąd prądowy, jak i kątowy. Błędy prądowe DI obliczono przez porównanie amplitudy napięcia (przetworzonej na prąd  $I_{OUT}$ ) zarejestrowanej na wtórnej stronie amplitudy odniesienia wytworzonego prądu  $I_{IN}$ :

$$DI = \frac{I_{OUT} - I_{IN}}{I_{IN}} \cdot 100\% \quad (1)$$

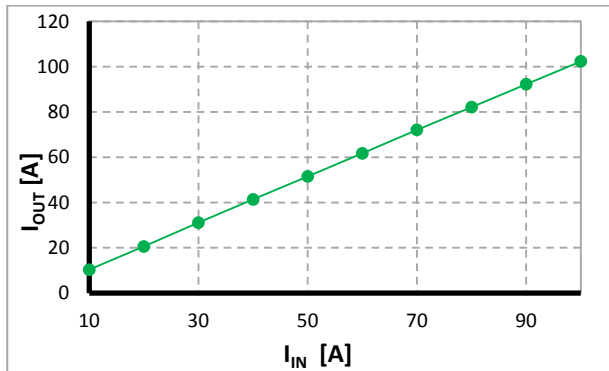
gdzie:

$I_{OUT}$  – wartość skuteczna prądu po stronie wtórnej, odniesiona do prądu pierwotnego [A];

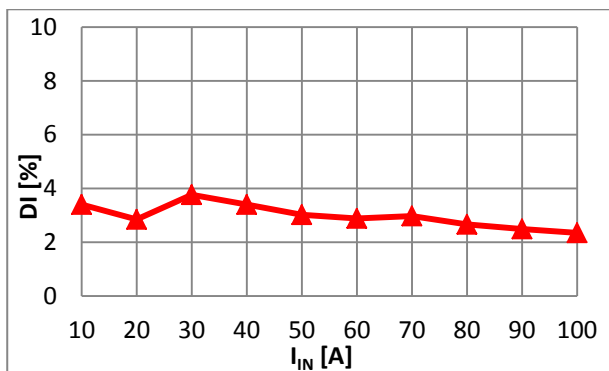
$I_{IN}$  – wartość RMS prądu pierwotnego ustalona w symulatorze [A].

Błędy kątowe zostały określone przez porównanie czasu prądu zerowego na obu stronach przetwornika.

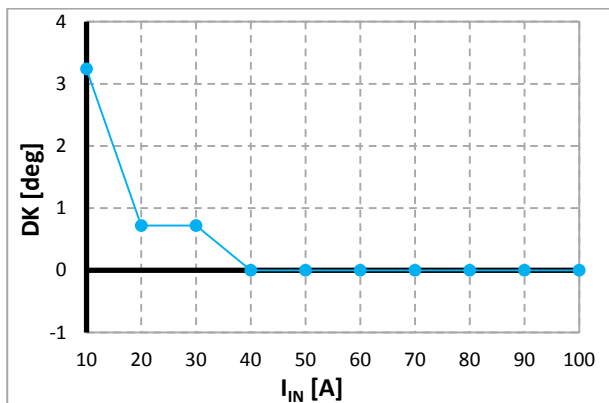
Podstawowe badania przeprowadzono dla częstotliwości podstawowej równej 50 Hz przez zmianę wartości RMS prądu pierwotnego w zakresie do 1000 A. Dodatkowo zbadano wpływ zmian częstotliwości na dokładność przebiegu przetworzonego prądu na stronie wtórnej. Wybrane wyniki badań przedstawiono na rys. 4-9.



Rys. 4. Wartość RMS prądu wyjściowego  $I_{OUT}$  (na stronie wtórnej) jako funkcja wartości pierwotnej RMS  $I_{IN}$  dla częstotliwości równej 40 Hz oraz  $I_{IN}$  w zakresie od 10 do 100 A

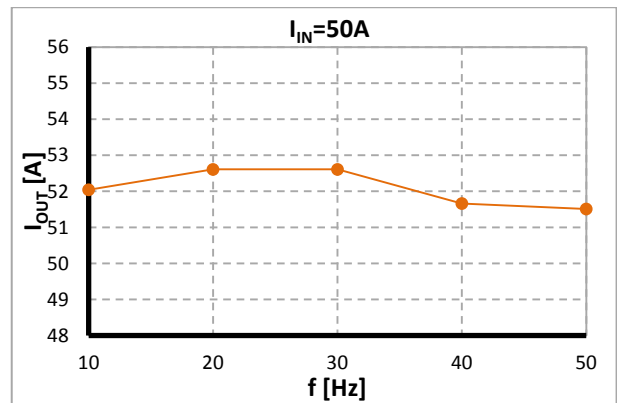


Rys. 5. Błąd prądowy  $DI$  w odniesieniu do  $I_{IN}$  (wartość RMS) w zakresie od 10 do 100 A dla częstotliwości 50 Hz

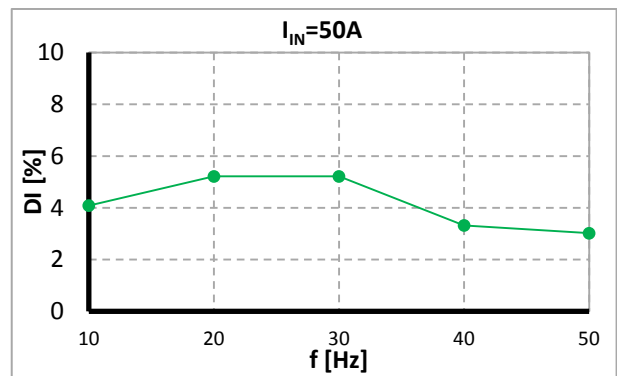


Rys. 6. Błąd kątowy  $DK$  w odniesieniu do  $I_{IN}$  (wartość RMS) w zakresie od 10 do 100 A dla częstotliwości 50 Hz

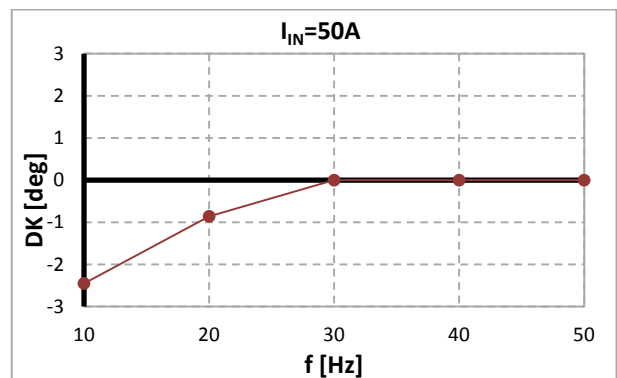
Dla częstotliwości równej 50 Hz i wartości RMS prądu pierwotnego zmienionej z 10 na 100 A wszystkie badane przetworniki zachowują transformację liniową (rys. 4). Zarejestrowane przebiegi prądowe są tylko nieznacznie zakłócone, co jest odzwierciedlone niskimi błędami prądowymi ( $\leq 3\%$ ) i kątowymi (do  $3^\circ$ ), jak to pokazano na rys. 5 i 6. Dla wyższych wartości prądu (do 1000 A RMS) wartości obydwu błędów są nieistotne ( $DI < 2\%$ ,  $DK < 0,2^\circ$ ). Badanie pokazuje, że przy niskiej częstotliwości sygnału wejściowego (od 10 do 50 Hz) błędy prądowe i kątowe są również nieduże (rys. 7-9).



Rys. 7. Zmienność prądu wyjściowego RMS  $I_{OUT}$  (na wtórnej stronie) w odniesieniu do częstotliwości prądu wejścia  $I_{IN}$  (prąd pierwotny) z RMS równym 50 A



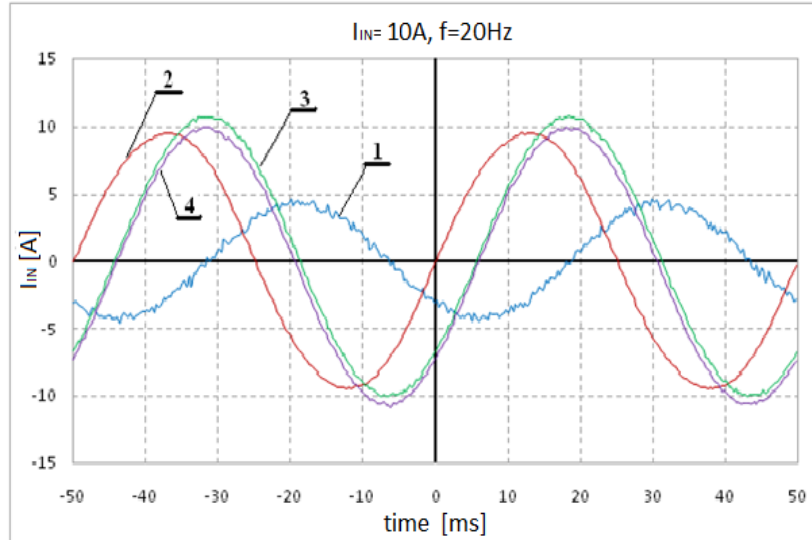
Rys. 8. Błąd prądowy  $DI$  jako funkcja częstotliwości w formie przebiegu sinusoidalnego  $I_{IN} = 50$  A



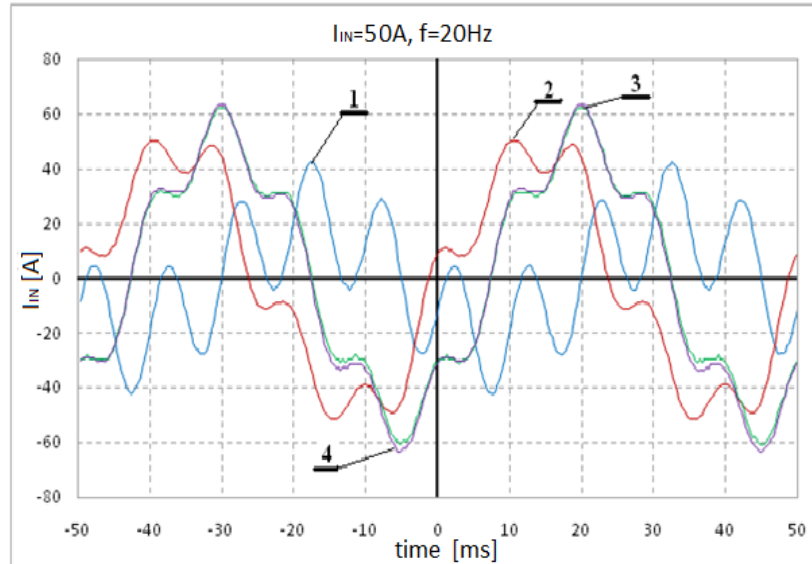
Rys. 9. Błąd kątowy  $DK$  w odniesieniu do częstotliwości prądu pierwotnego ( $I_{IN} = 50$  A RMS)

Po zwiększeniu częstotliwości do 650 Hz zaobserwowano, że wciąż zachowana jest liniowość transformacji przetwornika prądowo-napięciowego z rdzeniem amorficznym. Charakterystyki metrologiczne nowych przetworników prądowo-napięcio-

wych są o wiele lepsze niż najczęściej używanych przetworników CT i/lub cewek Rogowskiego [2, 9]. Jest to widoczne na przebiegach pokazanych na rys. 10.



Rys. 10. Przebiegi prądu wyjściowego przy sinusoidalnym prądzie wyjścia ( $I_{IN}$ ) o wartościach 10 A RMS i 20 Hz; 1 – cewka Rogowskiego, 2 – standardowy transformator prądu, 3 – przetwornik prądowo-napięciowy z rdzeniem amorficznym, 4 – prąd wejściowy



Rys. 11. Przebiegi prądu wyjściowego dla wartości prądu wyjścia równej 50 A i częstotliwości 20 Hz z narzuconą piątą harmoniczną o wielkości równej 2 A (20%); 1 – cewka Rogowskiego, 2 – standardowy transformator prądu, 3 – przetwornik prądowo-napięciowy z rdzeniem amorficznym, 4 – prąd wejściowy (pierwotny)

Analizując wynikowe przebiegi różnych nadajników, można sformułować wniosek, że tylko przetwornik z rdzeniem amorficznym dokładnie odtwarza sygnał wejściowy. Zarówno jego błąd prądowy, jak i kątowy są najmniejsze.

Rys. 11. przedstawia przebiegi prądu wyjściowego  $I_{OUT}$  dla badanych przetworników w przypadku, gdy

prąd pierwotny ( $I_{IN}$ ) jest odkształcony. Można zauważyć, że sygnał wyjściowy przetwornika z rdzeniem amorficznym jest praktycznie taki sam, jak przebieg prądu wejściowego, podczas gdy dla innych nadajników kształt ten jest znacznie odchylny.

#### 4. PODSUMOWANIE

Na podstawie uzyskanych wyników można sformułować następujące wnioski:

- przetwornik prądowo-napięciowy z rdzeniem amorficznym jest linearny w zakresie badanych wartości prądu pierwotnego (od 1 do 1000 A),
- nowy przetwornik prądowo-napięciowy charakteryzuje się bardzo dobrym działaniem (właściwości metrologiczne) w szerokim zakresie wartości RMS prądu pierwotnego (od 1 do 1000 A) oraz jego częstotliwości (od 10 do 650 Hz). Błędy prądowe utrzymują się na poziomie kilku procent, a błędy kątowe nie przekraczają 6°,
- zapotrzebowanie na tego typu przetworniki prądowo-napięciowe z rdzeniem amorficznym jest szczególnie wysokie w systemach pomiarowych i systemach bezpieczeństwa ze znacznie odkształconymi przebiegami prądu.

#### Literatura

1. Habrych M., Macierzyński D., Morawiec M.: *Optymalizacja konstrukcji przetwornika prądowo-napięciowego z rdzeniem amorficznym*, Materiały konferencyjne XIX Sympozjum Naukowo-Technicznego SEMAG, s. 114-124, Szklarska Poręba 2013.
2. Gacek A., Książek L., Wlazło P.: *Data transmission from electronic current transducers to a process bus in the IEC 61850 standard*, Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering, 2015, No. 4(524), pp. 11-15.
3. Luciano B.A., Inacio R.C., Silva P.D.E., Guerra F.D.F., Freire R.C.S.: *Performance of Single Wire Earth Return Transformers with Amorphous Alloy Core in a Rural Electric Energy Distribution System*, Materials Research, 2012, No. 15 (5), pp. 801-805.
4. Miedziński B., Dzierżanowski W., Habrych M., Nouri H.: *Wyniki badań zachowania się nowego czulego zabezpieczenia ziemnozwarciowego z czujnikiem Halla*, Przegląd Elektrotechniczny, 2010, nr 86(7), s. 181–183.
5. Miedziński B., Pyda D., Habrych M.: *Selection of Energizing Quantities for Sensitive Ground Fault Protection of MV Electric Power Networks*, Electronics and Electrical Engineering, 2012, No. 7(123), pp. 109-112.
6. Piwowarczyk J., Pacholski K.: *Utilization of Levenberg-Marquardt's Method for Identification of the Electronic Current Transducer with a Hall Effect Sensor in a Feedback Loop*, Metrology and Measurement Systems, 2008, No. 15(1), pp. 91-103.
7. Rafajdus P., Bracinek P., Hrabovcova V.: *The Current Transformer Parameters Investigation and Simulations*, Electronics and Electrical Engineering, 2010, No. 4(100), pp. 29-32.
8. Stupakov O., Svec P.: *Three-Parameter Feedback Control of Amorphous Ribbon Magnetization*, Journal of Electrical Engineering, 2013, No. 64(3), pp. 166-172.
9. Szkółka S.: *Coreless coil AC transducer*, Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering, 2015, No. 3(523), pp. 92-98.
10. Szkółka S.: *Mechanizm indukowania się napięć pasożytniczych w cewkach Rogowskiego*, Przegląd Elektrotechniczny, 2012, nr 88(10A), s. 59-63.
11. Szkółka S., Wiśniewski G.: *Cewka Rogowskiego jako nowoczesny element do monitorowania przebiegu prądu*, Przegląd Elektrotechniczny, 2009, nr 4(18), s. 131-135.
12. Liu Y., Lin F., Zhang Q., Zhong H.: *Design and Construction of a Rogowski Coil for Measuring Wide Pulsed Current*, IEEE Sensors Journal, 2011, No. 11(1), pp. 123-130.
13. Wang A., Zhao C., He A., Men H., Chang C., Wang X.: *Composition design of high B-s Fe-based amorphous alloys with good amorphous-forming ability*, Journal of Alloys and Compounds, 2016, No. 656, pp. 729-734.

dr inż. MARCIN HABRYCH

Katedra Ergoelektryki, Politechnika Wroclawska  
Wyb. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław  
marcin.habrych@pwr.edu.pl