

dr inż. MARCIN HABRYCH  
Instytut Energoelektryki  
Politechnika Wroclawska  
mgr inż. JAN LUBRYKA  
mgr inż. DARIUSZ MACIERZYŃSKI  
Kopex Electric Systems S.A.  
dr inż. ARTUR KOZŁOWSKI  
Instytut Technik Innowacyjnych EMAG  
mgr inż. MAREK MORAWIEC  
JSW S.A. KWK Zofiówka

# Przetwornik prądowo-napięciowy ze zmodyfikowanym rdzeniem amorficznym do pomiarów prądowych przebiegów odkształconych

*W artykule zaprezentowano i omówiono wyniki badań właściwości metrologicznych przetwornika prądowo-napięciowego z zastosowanym zmodyfikowanym rdzeniem amorficznym przydatnym do pomiarów prądowych, zwłaszcza przebiegów odkształconych w układach napędowych. Wyznaczono wartości błędów prądowych i kątowych przetwornika w szerokim zakresie zmian wartości skutecznych i częstotliwości mierzonych prądów.*

## 1. WPROWADZENIE

---

W napędach kopalnianych maszyn urabiających i transportowych, w celu zapewnienia płynnej odstawy urobku, coraz częściej wykorzystuje się zasilanie z przemienników częstotliwości [6]. Jak powszechnie wiadomo, zastosowanie przemienników częstotliwości wiąże się z generowaniem zakłóceń wpływających na odkształcenia przebiegów prądowych i napięciowych. Zakłócenia te mają, między innymi, wpływ na jakość dokonywanych pomiarów wartości wielkości elektrycznych w sieciach elektroenergetycznych [3, 5]. Szczególnie dotyczy to pomiaru zarówno mocy i energii, jak i prądów oraz napięć stanowiących np. kryterium działania układów elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej. Błędy przekładników prądowych zależą od wartości prądu magnesującego w sposób nieliniowy z uwagi na nieliniowy charakter impedancji  $Z_{\mu}$  obwodu magnetycznego. Z chwilą bowiem przekroczenia przez prąd  $I_{\mu}$  określonej wartości następuje nasycenie rdzenia przekładnika, czego następstwem jest zmniejszenie się wartości impedancji  $Z_{\mu}$ ,

a tym samym wzrost błędów przekładników. Dla małych wartości prądu pierwotnego wzrastają również błędy przekładnika z uwagi na małą wartość przenikalności magnetycznej rdzenia. Wartości błędów, tak prądowych, jak i kątowych, zależą także od impedancji obciążenia  $Z_{obc}$ , przyłączonej do zacisków wtórnych przekładnika prądowego. Ze wzrostem bowiem tej impedancji błędy początkowo wzrastają liniowo, a następnie znacznie szybciej, gdyż dochodzi do nasycenia się rdzenia przekładnika. Jak wykazały wstępne badania laboratoryjne, błędy przekładników prądowych mogą być dość znaczne w przypadku transformacji przebiegów odkształconych. Z tego więc powodu poszukuje się innych rozwiązań lub konstrukcji przetworników prądowych (lub prądowo-napięciowych) do zastosowania w obiektach, w których występuje wiele urządzeń energoelektronicznych, mogących zniekształcać przebiegi prądowe poprzez generowanie wyższych harmonicznych. Wszystkie przetworniki powinny być również mało podatne na zakłócenia wpływ zewnętrznego pola elektromagnetycznego, generowanego przez sąsiednie tory prądowe.

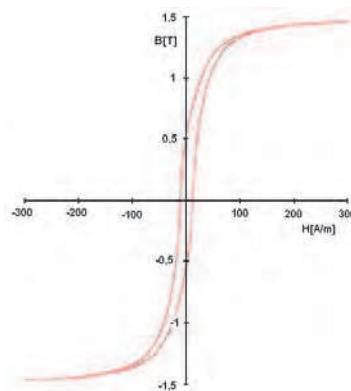
Do podstawowych cech tego typu przekładników zalicza się: szeroki zakres zmienności przetwarzanych wartości prądów (do ok. 1000 A), znaczny zakres zmian częstotliwości tych prądów (od kilku Hz do 50 Hz) z uwzględnieniem obecności ich składowych o wysokiej częstotliwości (rzędu kilkuset do kilku tysięcy Hz). Duża zawartość wyższych harmonicznych w przebiegach prądu jest związana z częstotliwością kluczkowania przemienników (należy zaznaczyć, że amplituda wyższych harmonicznych prądów na zaciskach uzwojeń stojanów silników zasilanych z przemienników częstotliwości może osiągać wartości dochodzące do ok. 20% amplitudy składowej podstawowej).

## 2. OBIEKT I WYNIKI BADAŃ

Wstępne badania, przeprowadzone w Instytucie Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej, dowiodły, że alternatywą dla tradycyjnych przekładników prądowych (szczególnie do zastosowania w obwodach, w których przebiegi prądowe są odkształcone) mogą być nowo opracowane przetworniki prądowo-napięciowe ze zmodyfikowanym rdzeniem amorficznym [3]. Obiektem badań były więc tego typu przekładniki o przekładni 1 mV/A. Przebieg charakterystyki magnesowania materiału taśmy, z której w Instytucie Metali Nieżelaznych w Gliwicach wykonano rdzenie przetworników, pokazano na rys. 1 [4].

Schemat układu pomiarowego do badań właściwości metrologicznych przetwornika prądowo-napięciowego w warunkach zasilania silników z przetworników częstotliwościowych pokazano na rys. 2. Badania przeprowadzono na specjalnie do tego celu wykonanym stanowisku w Instytucie Technik Innowacyjnych EMAG w Katowicach.

Elementem zasilanym z przemiennika częstotliwości był silnik asynchroniczny, klatkowy typu dl53/2-4 (M1) o napięciu 500 V, mocy 63 kW i znamionowej prędkości obrotowej 1475 obr/min, napędzający wentylator. Zasilanie układu realizowano z sieci SN 6 kV poprzez transformator T1 (o danych znamionowych:

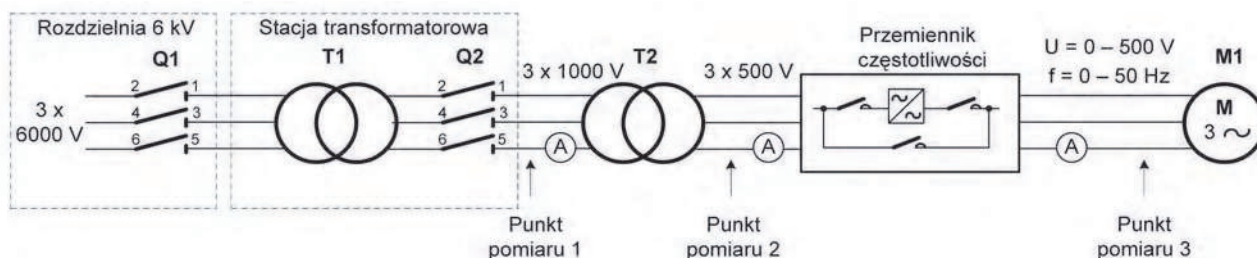


Rys. 1. Charakterystyka magnesowania rdzenia badanego przetwornika prądowo-napięciowego [4]

napięcie pierwotne –  $U_1 = 6000$  V, napięcie wtórne –  $U_2 = 1050$  V, moc znamionowa –  $S = 400$  kVA, grupa połączeń –  $Yy0$ ). Z uwagi na fakt, iż przemiennik częstotliwości został wykonany na napięcie znamionowe 500 V, w układzie zastosowano dodatkowy transformator T2 (o danych znamionowych: napięcie pierwotne –  $U_1 = 1000$  V, napięcie wtórne –  $U_2 = 500$  V, moc znamionowa –  $S = 63$  kVA, grupa połączeń –  $Yy0$ ).

Badania przeprowadzono, rejestrując jednocześnie przebiegi prądowe w 3 punktach pomiarowych: na zasilaniu transformatora T2 (na napięciu 1000 V – punkt pomiarowy 1), na zasilaniu przemiennika częstotliwości (na napięciu 500 V – punkt pomiarowy 2) i na zasilaniu silnika (za przemiennikiem częstotliwości – punkt pomiarowy 3). Wybór punktów pomiarowych był podyktowany koniecznością określenia stopnia odkształcenia przebiegów prądowych w danym punkcie sieci zasilającej.

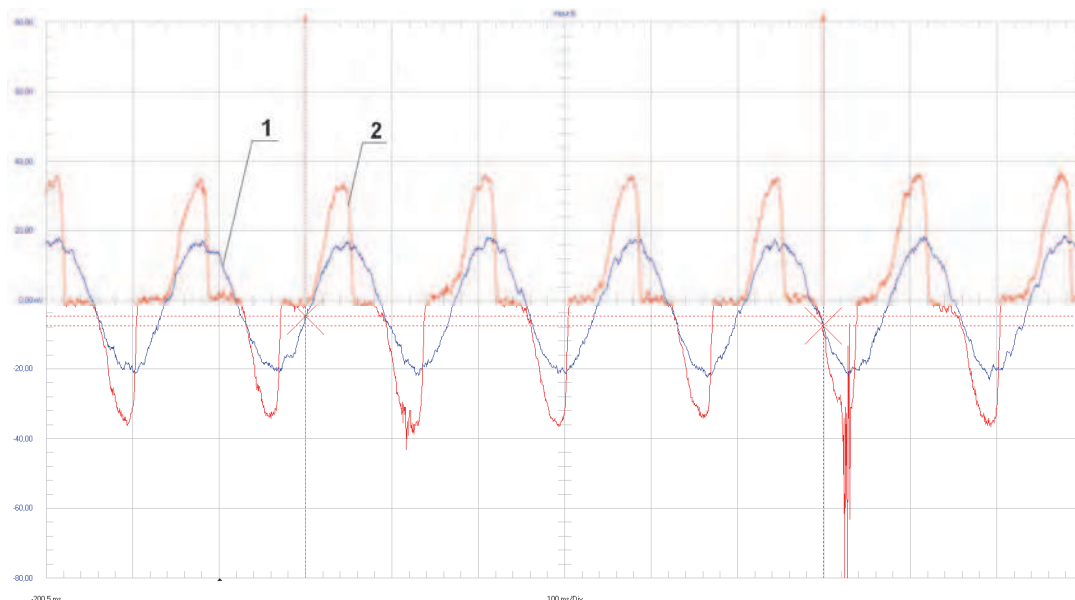
W celu określenia właściwości metrologicznych nowo opracowanych przekładników prądowo-napięciowych z rdzeniem amorficznym w każdym z punktów pomiarowych dokonywano porównania przebiegów chwilowych i wartości skutecznych uzyskanych na wyjściu z wielkościami wyjściowymi na zaciskach standardowego przekładnika prądowego. Porównania przebiegów dokonywano korzystając m.in. z rejestratora typu FLUKE. Badaniom poddano zatem takie przekładniki, jak:



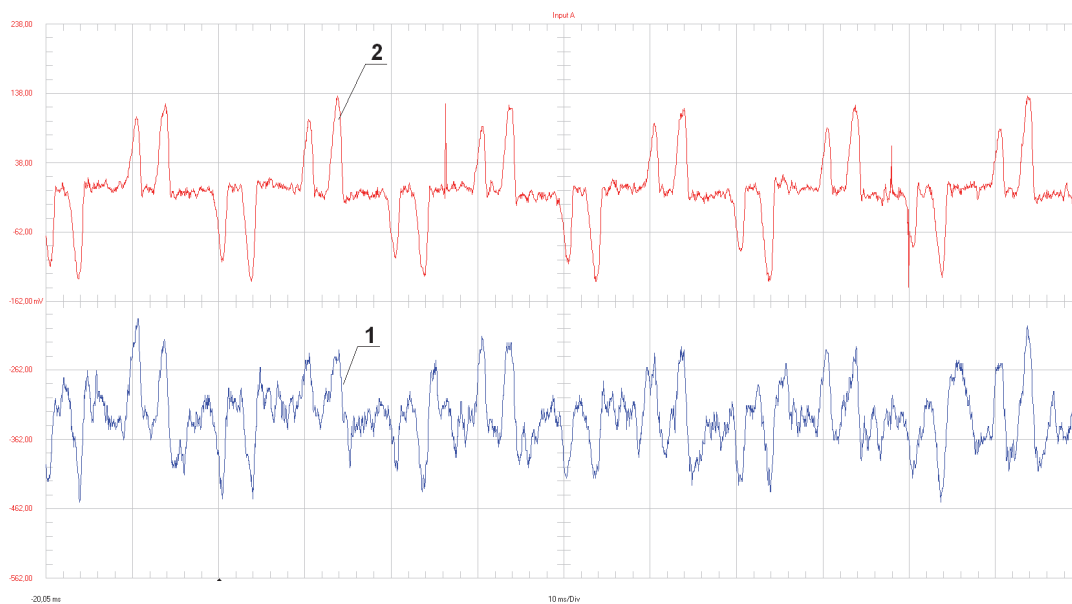
Rys. 2. Układ pomiarowy do badania przekładników w warunkach zasilania silnika z przemiennika częstotliwości [2]

- TJ1 – standardowy przekładnik prądowy o przekładni 200 A / 5 A i mocy 10 VA, kl. 1;
- TJ2 – nowo opracowany specjalny przetwornik prądowo-napięciowy, z rdzeniem z blachy amorficznej, typu 69/11/R, o przekładni 1 mV / 1 A.  
Pomiary zostały wykonane dla różnych częstotliwości przebiegów prądowych (od 5 do 50 Hz), co

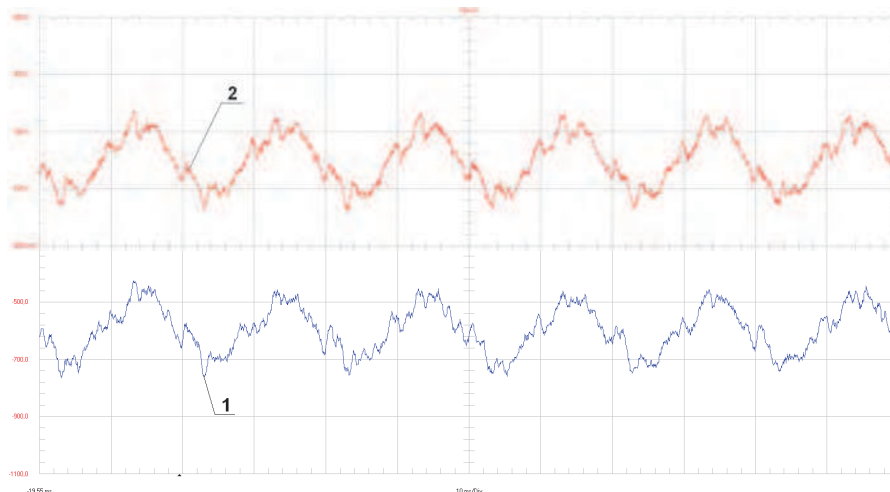
ilustrują wyniki pomiarów przedstawione, dla przykładu, na rys. 3-5. Należy zaznaczyć, że w celu określenia rzeczywistej wartości skutecznej mierzonego prądu pierwotnego zastosowano dodatkowy elektroniczny (prądowy) miernik cęgowy, włączany w obwód pierwotny w danym punkcie pomiarowym.



Rys. 3. Przebiegi wartości wtórnych prądu zarejestrowane w punkcie pomiarowym nr 3 (1 – przekładnik TJ1, 2 – przekładnik TJ2) dla częstotliwości 5 Hz wymuszanego prądu pierwotnego o wartości skutecznej 14,5 A [2]



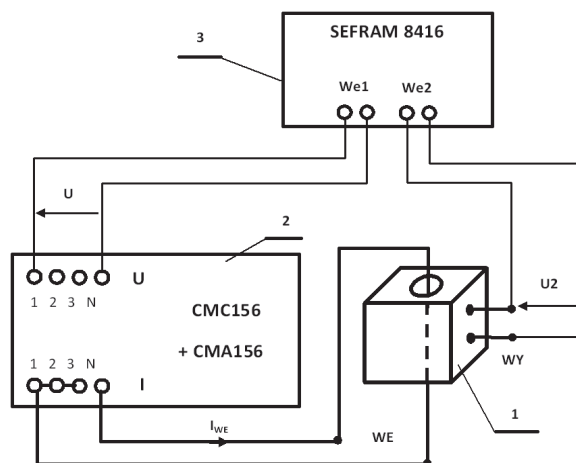
Rys. 4. Przebiegi wartości wtórnych prądu zarejestrowane w punkcie pomiarowym nr 2 (1 – przekładnik TJ1, 2 – przekładnik TJ2) dla częstotliwości 5 Hz wymuszanego prądu pierwotnego o wartości skutecznej 0,6 A [2]



Rys. 5. Przebiegi wartości wtórnych prądu zarejestrowane w punkcie pomiarowym nr 1 (1 – przekładnik TJ1, 2 – przekładnik TJ2) dla częstotliwości 5 Hz wymuszanego prądu pierwotnego o wartości skutecznej 1,6 A [2]

Z rezultatów przeprowadzonych badań wynika, że czasowe przebiegi prądów wtórnych, dla obu zastosowanych przekładników, mogą się znacznie różnić, zwłaszcza w przypadku małych częstotliwości, nie przekraczających 20 Hz. W efekcie błąd pomiaru wartości skutecznych przebiegów odkształconych (przede wszystkim w punktach pomiarowych 2 i 3, tj. na zasilaniu przetwornika i silnika) może być bardzo znaczny. Przebiegi uzyskane przy pomocy przekładnika TJ2 (z rdzeniem amorficznym) charakteryzują się (w każdym praktycznie przypadku wartości częstotliwości) znacznym odkształceniem, potwierdzonym analizą zawartości wyższych harmonicznych. Sformułowanie (w tym momencie) definitywnych wniosków odnośnie do przewagi metrologicznej danego przekładnika jest niemożliwe z uwagi na brak znajomości przebiegu rzeczywistego prądu pierwotnego w czasie. Z tego więc względu po zakończeniu badań (na stanowisku pomiarowym w laboratorium Instytutu EMAG) poddano przedmiotowe przekładniki dodatkowym badaniom porównawczym dla znanych i wymuszanych przebiegów oraz wartości prądu pierwotnego (w Instytucie Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej). Przeprowadzono je zarówno dla tych samych przekładników, jak i dla dodatkowo zastosowanego przetwornika opartego o wykorzystanie cewki Rogowskiego. Dla zredukowania wartości szumu w sygnale wyjściowym cewki Rogowskiego wszystkie badania porównawcze wykonano, obciążając zaciski cewki rezystancją  $R_b=10\text{ k}\Omega$ .

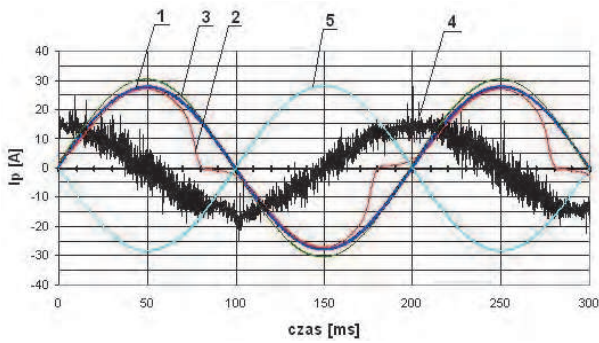
Pomiary porównawcze wykonywano w układzie pomiarowym tak, jak zostało to przedstawione na rys. 6., łącząc szeregowo obwody pierwotne wszystkich badanych przetworników w celu wymuszenia takiej samej wartości i kształtu wzorcowego przebiegu prądu-



Rys. 6. Schemat układu pomiarowego do porównawczych badań przetworników prądowych; 1 – badany przetwornik, 2 – mikroprocesorowy symulator sygnałów, 3 – rejestrator cyfrowy [1]

wego. Korzystając z rejestratora typu SEFRAM 8416, analizie poddano sygnały wyjściowe (napięciowe) wszystkich przekładników oraz napięcie  $U$  generowane przez symulator sygnałów (o wartości fazy początkowej równej fazie generowanego prądu  $I_{we}$ ). Napięcie to stanowiło sygnał bazowy, na podstawie którego możliwa była ocena wartości błędów kątowych poszczególnych badanych przekładników.

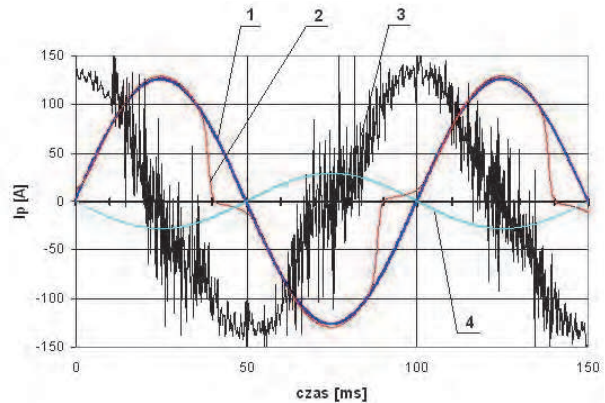
Przykładowe wyniki badań przedstawiono na rys. 7-8. w formie przebiegów czasowych sygnałów wyjściowych badanych przekładników i napięcia bazowego ( $U$ ). W celu porównania amplitud wszystkie sygnały wyjściowe przetworników przeliczono (z uwzględnieniem ich przekładni) na stronę pierwotną ( $I_p$ ).



Rys. 7. Przebiegi sygnałów wyjściowych przetworników:  
1 – prądowo-napięciowego z rdzeniem amorficznym, 2 – przekładnika prądowego obciążonego impedancją  $0.1 \Omega$ , 3 – przekładnika prądowego obciążonego impedancją  $0.4 \Omega$ , 4 – cewki Rogowskiego, 5 – napięcia bazowego; dla wymuszonego nieodkształconego przebiegu prądu pierwotnego o wartości skutecznej  $I_{we}=20 \text{ A}$  ( $f=5 \text{ Hz}$ ) [1]

Przeprowadzono także odpowiednie badania uzupełniające dla pierwotnych prądów odkształconych o następujących parametrach: podstawowa harmoniczna o częstotliwości  $10 \text{ Hz}$ ,  $I=20 \text{ A}$ , 3. harmoniczna –  $26\%$ , 5. harm. –  $11\%$ , 7. harm. –  $5\%$ , 9. harm. –  $3\%$ , 11. harm. –  $2\%$ , 13. harm. –  $1\%$  (wyniki badań pokazano, dla przykładu na rys. 9.).

Na podstawie analizy uzyskanych wyników badań przebiegów sygnałów wyjściowych analizowanych przetworników można stwierdzić, że najwęższe przetwarzanie sygnałów, zwłaszcza dla małych częstotliwości, równych  $5$  i  $10 \text{ Hz}$  odpowiednio, cechuje przetwornik prądowo-napięciowy z rdzeniem amorficznym. Dotyczy to w zasadzie całego zakresu zmiany wartości skutecznych prądów pierwotnych, dla jakiego wykonano badania (od  $5 \text{ A}$  do  $90 \text{ A}$ ). Należy

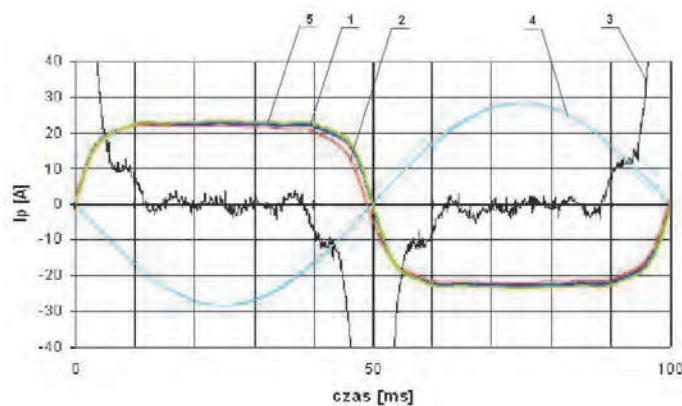


Rys. 8. Przebiegi sygnałów wyjściowych przetworników:  
1 – prądowo-napięciowego z rdzeniem amorficznym, 2 – przekładnika prądowego obciążonego impedancją  $0.1 \Omega$ , 3 – cewki Rogowskiego, 4 – napięcia bazowego; dla wymuszonego nieodkształconego przebiegu prądu pierwotnego o wartości skutecznej  $I_{we}=90 \text{ A}$  ( $f=10 \text{ Hz}$ ) [1]

w tym przypadku zaznaczyć, że przebiegi na zaciskach cewki Rogowskiego charakteryzują się znacznym „zaszumieniem” sygnału wyjściowego. Ponadto nie jest możliwe wiernie odwzorowanie przebiegu sygnału pierwotnego w przypadku jego małej zmienności w czasie. Wynika to z zasady działania cewki Rogowskiego, co jest wyraźnie widoczne na rys. 9.

Zasadnicze zaś wady dostępnego na rynku tradycyjnego przekładnika prądowego w porównaniu z nowo opracowanym przetwornikiem prądowo-napięciowym z rdzeniem amorficznym to:

- większe wartości błędów prądowych i kątowych,
- znaczna zależność jakości przetwarzania sygnałów od wartości impedancji obciążenia przekładnika,
- niedostateczne odwzorowanie przebiegów czasowych prądowych sygnałów odkształconych.



Rys. 9. Przebiegi sygnałów wyjściowych przetworników:  
1 – prądowo-napięciowego z rdzeniem amorficznym, 2 – przekładnika prądowego obciążonego impedancją  $0.4 \Omega$ , 3 – cewki Rogowskiego, 4 – prądu po stronie pierwotnej, 5 – napięcia bazowego; dla wymuszonego odkształconego przebiegu prądu pierwotnego o wartości skutecznej  $I_{we}=20 \text{ A}$  ( $f=10 \text{ Hz}$ ) [1]

Przeprowadzone dodatkowe badania wykazały, że nowo opracowane przetworniki prądowo-napięciowe z rdzeniem amorficznym charakteryzują się bardzo dobrymi właściwościami metrologicznymi zwłaszcza dla technicznej częstotliwości prądu wejściowego równej 50 Hz. Charakterystyki przetwarzania  $I_{wy} = f(I_{we})$  wykazują bowiem bardzo dobrą liniowość w całym zakresie zmiany wartości analizowanych prądów (od 1 A do 960 A); błędy prądowe są niewielkie i w zakresie skutecznej wartości prądów od 1 A do 10 A nie przekraczają 1%, a błędy kątowe nie przekraczają 0,5 stopnia. Natomiast w zakresie wyższych wartości prądów (od 10 A do 960 A) błędy prądowe nie przekraczają wartości 1,8%, zaś błędy kątowe – 0,6 stopnia odpowiednio.

Pomiary wykonane dla wyższych częstotliwości prądu do 1000 Hz wykazały praktycznie brak wpływu zmiany częstotliwości na wartości błędów prądowych i kątowych w analizowanym przedziale wartości skutecznych prądów od 1 A do 960 A.

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeprowadzone badania przebiegów prądowych w przypadku pracy silnika zasilanego z przemienników częstotliwości wykazały konieczność stosowania przekładników o odpowiednio dobrych właściwościach metrologicznych z uwagi na znaczne odkształcenie przebiegów prądowych (zwłaszcza w obwodzie zasilania przemiennika częstotliwości). Należy zaznaczyć, że zniekształcenie to przenosi się na stronę pierwotną transformatora, co może skutkować negatywnym oddziaływaniem na sieć zasilającą. W przebiegach prądowych widoczne są harmoniczne nieparzyste do 19. włącznie.

Wyniki porównawczych badań laboratoryjnych przetworników prądowo-napięciowych, cewki Rogowskiego i przekładnika prądowego dla częstotliwości składowej podstawowej prądu o wartości 5 i 10 Hz wykazały, że najwierniejsze przetwarzanie sygnałów cechuje przetwornik prądowo-napięciowy z rdzeniem amorficznym. Wykazuje on stosunkowo najmniejsze wartości błędów prądowych i kątowych.

Przeprowadzone dodatkowe badania dowiodły, że nowo opracowane przekładniki z rdzeniem amorficznym charakteryzują się bardzo dobrymi właściwościami metrologicznymi dla technicznej częstotliwości prądu wejściowego równej 50 Hz (dla prądów o wartości skutecznej do 960 A błędy prądowe przetwornika nie przekraczają wartości 1,8%, zaś błędy kątowe – 0,6 stopnia odpowiednio). Pomiary wykonane dla wyższych częstotliwości prądu (do

1000 Hz) wykazały praktycznie brak wpływu zmiany częstotliwości na wartości błędów prądowych i kątowych w analizowanym przedziale wartości skutecznych prądów od 1 A do 960 A.

#### Literatura

1. Dokumentacja badań w Instytucie Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2011 (niepublikowana).
2. Dokumentacja badań w Laboratorium Elektrotechnicznym Instytutu Techniki Innowacyjnych EMAG, Katowice 2011 (niepublikowana).
3. Habrych M., Wiśniewski G., Morawiec M., Prokop J., Macierzynski D.: *Pomiary odkształconych przebiegów prądów i napięć w układzie przenośnika taśmowego zasilanego przemiennikiem częstotliwości*. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa 2011, nr 8(486), s. 27-34.
4. Kowalski J., Mularczyk W.: *Sprawozdanie z badań i pomiarów modeli przekładników prądowych specjalnych*, opracowanie wykonane dla firmy Elgór + Hansen Sp. z o.o., Chorzów 2009 (niepublikowana).
5. Pawłowski M.: *Podstawy analizy harmonicznej odkształconych prądów i napięć w sieciach zasilających*. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, 2010 nr 7(473), s. 17-23.
6. Szymański Z.: *Badania diagnostyczne i niezawodnościowe górniczych maszyn transportowych zasilanych z zasilaczy przekształtnikowych*. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa 2012, nr 2(492), s. 5-12.

Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów.