

Cewka Rogowskiego w środowisku przebiegów odkształconych – dokładność przekształcania

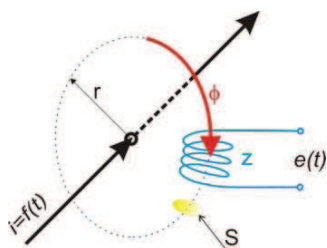
W artykule przedstawiono problematykę wierności transformacji prądów odkształconych monitorowanych cewką Rogowskiego. Omówiono zmienność wartości współczynnika przekształcania w zależności od stopnia odkształcenia prądu. Przedstawiono wyniki symulacji teoretycznie możliwego sposobu poprawienia jakości transformacji z wykorzystaniem wzmacniacza operacyjnego. Podano ograniczenia obszaru pracy proponowanego rozwiązania.

1. WSTĘP

Wzrastająca liczba i moc elementów nieliniowych jest przyczyną coraz większego odkształcania prądów pobieranych przez współczesne odbiorniki. Kompaktowe rozwiązania zarówno zabezpieczeń, jak i urządzeń elektrycznych wymagają małych gabarytowo i lekkich przetworników prądu o możliwie dokładnym przekształcaniu przebiegów prądu – także tych odkształconych od sinusoidy. Pierwsze doświadczenia z zastosowaniem cewki Rogowskiego jako przetwornika prądu dały pozytywne wyniki, ale tylko w odniesieniu do przebiegów nieodkształconych [2, 3, 4].

W artykule podjęto próbę oszacowania dokładności transformacji przebiegów odkształconych i przedstawiono jedną z metod poprawy tej funkcji.

W przedstawionej na rys. 1 cewce Rogowskiego, o liczbie zwojów z sprzężonych z obwodem pierwotnym (stanowiącym jeden zwój) – pod wpływem zmian strumienia ϕ wywołanego przepływającym prądem $i(t)$ indukuje się siła elektromotoryczna $e(t)$.



Rys. 1. Schemat ideowy przetwornika z cewką Rogowskiego

gdzie:

z – liczba zwojów cewki Rogowskiego,
 S – pole przekroju pojedynczego zwoju,
 r – promień cewki liczony do osi symetrii pola S .

$$e(t) = z \frac{d\phi}{dt} = \frac{\mu_0 \cdot z \cdot S}{2\pi \cdot r} \frac{di}{dt} = M \frac{di}{dt} \quad (1)$$

Odształcony przebieg monitorowanego prądu $i(t)$ można przedstawić jako sumę harmoniczných:

$$i(t) = \sum_{k=0}^{\infty} I_{km} \cdot \sin(k \cdot \omega t + \psi_k) \quad (2)$$

Harmoniczne prądu $i(t)$ indukują w efekcie siłę elektromotoryczną $e_{sum}(t)$

$$e_{sum}(t) = \sum_{k=1}^{\infty} E_{km} \cdot \sin(k \cdot \omega t + \psi_k + \frac{\pi}{2}) \quad (3)$$

gdzie:

$E_{km} = \omega \cdot M \cdot k \cdot I_{km} = n^2 \cdot k \cdot I_{km}$ – amplitudy harmoniczných [1].

Współczynnik n przekształcania prądów odkształconych określony jest jako stosunek wartości skutecznej E_{sk} odkształconej sem indukowanej w cewce Rogowskiego do wartości skutecznej I_{sk} odkształconego prądu i wynosi [1]:

$$n = \frac{E_{sk}}{I_{sk}} = \sqrt{\omega \cdot M} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{\infty} k^2 \cdot I_{km}^2}{\sum_{k=1}^{\infty} I_{km}^2}} \quad (4)$$

co można zapisać w postaci:

$$n = n_1 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{\infty} k^2 \cdot I_{km}^2}{\sum_{k=1}^{\infty} I_{km}^2}} \quad (5)$$

gdzie:

$n_1 = \sqrt{\omega \cdot M}$ – stała przekształcania dla przebiegu nieodkształconego (harmoniczna podstawowa).

Jak wynika z zależności (5), współczynnik n przekształcania prądów odkształconych jest większy od stałej przekształcania n_1 przebiegu nieodkształconego i silnie zależy od zawartości wyższych harmonicznych w monitorowanym cewką Rogowskiego prądzie $i(t)$.

Cewka Rogowskiego przekształca liniowo tylko poszczególne harmoniczne prądu, natomiast współczynnik przekształcania n (wartości skutecznej odkształconej sem indukowanej w cewce Rogowskiego do wartości skutecznej odkształconego prądu) zmienia się zależnie od stopnia odkształcenia prądu. Bezpośrednie wykorzystanie pomiaru wartości skutecznej sem uzyskanej z cewki Rogowskiego jako sygnału, np. w układach zabezpieczeń, może w efekcie spowodować sytuację, w której, pomimo ustalonej wartości progu rozruchowego zabezpieczenia, rozrzut jego zadziałania może dochodzić do kilkudziesięciu procent. Przykładowo, jeśli dla monitorowanego przebiegu sinusoidalnego prądu zadziałanie zabezpieczenia nastąpi przy wartości skutecznej prądu równej I , to w przypadku prądu odkształconego zadziałanie tego samego zabezpieczenia może wystąpić już wcześniej przy wartościach prądu z przedziału $(0,5 - 1)I$.

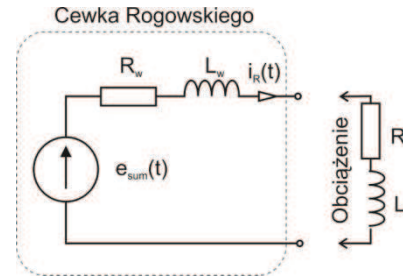
W celu przesłedzenia opisanego zjawiska przeprowadzono badania symulacyjne w oparciu o parametry rzeczywistej cewki Rogowskiego.

Poddana badaniom symulacyjnym cewka Rogowskiego posiada następujące parametry:

- stała przekształcania $n_1 - 4,5$ [mV/A],
- rezystancja wewnętrzna $R_w - 100$ [Ω],
- indukcyjność $L_w - 12,24$ [mH].

Celem badań było wyznaczenie zakresu zmian wartości współczynnika przekształcania n cewki w zależności od stopnia odkształcenia prądu, jak również wskazanie sposobu wyeliminowania tego zjawiska i uzyskania możliwie wiernie oddanego przebiegu sygnału wyjściowego z cewki w stosunku do przebiegu monitorowanego prądu.

Modelowano transformację prądu odkształconego w różnych warunkach obciążenia cewki, począwszy od obciążenia czysto rezystancyjnego, a skończywszy na obciążeniu silnie indukcyjnym.



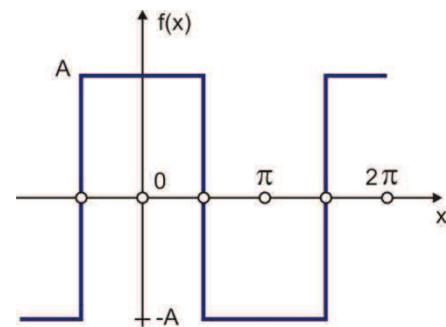
Rys. 2. Uproszczony schemat zastępczy obwodu obciążonej cewki Rogowskiego

gdzie:

R_w, L_w – odpowiednio rezystancja i indukcyjność cewki,

R, L – odpowiednio rezystancja i indukcyjność obciążenia.

Do symulacji procesu transformacji przebiegu odkształconego prądu wykorzystano cztery kolejne harmoniczne przebiegu prostokątnego prądu przedstawionego na rysunku 3.



Rys. 3. Krzywa prostokątna symetryczna względem osi rzędnych i antysymetryczna względem osi odciętych

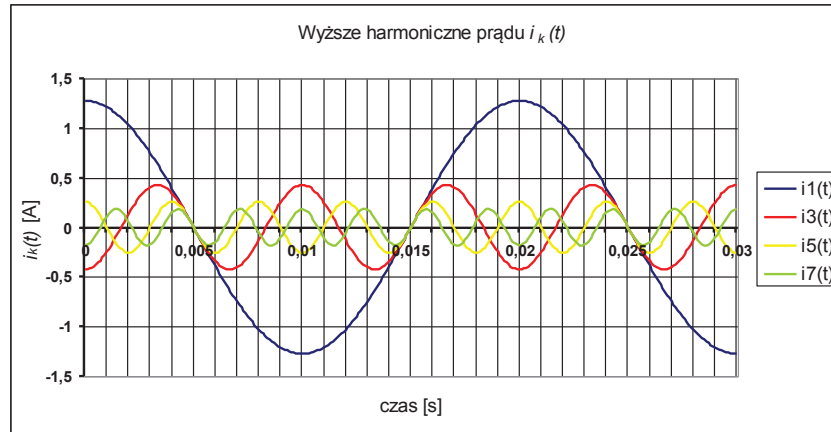
Stosując rozwinięcie przyjętego przebiegu z rysunku 3 w szereg Fouriera, uzyskuje się następujące wyrażenie:

$$f(x) = \frac{4A}{\pi} \left[\cos x - \frac{1}{3} \cos 3x + \frac{1}{5} \cos 5x - \frac{1}{7} \cos 7x + \dots \right] \quad (6)$$

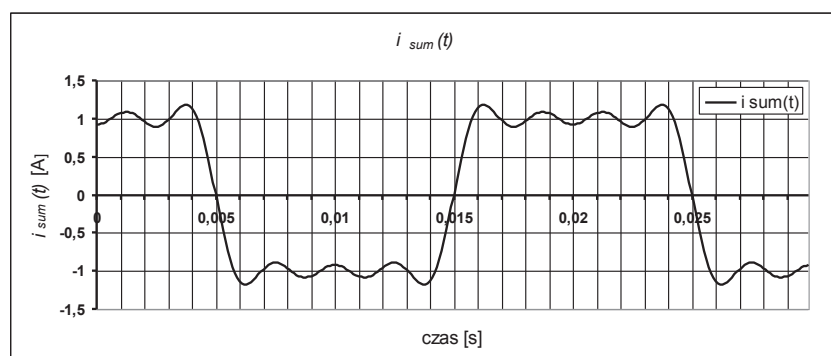
Zakładając przebieg prądu o kształcie jak na rys. 3, amplitudzie $A=1$ [A] i przechodząc na funkcję czasu otrzymamy:

$$i(t) = \frac{4 \cdot 1}{\pi} \left[\cos \omega t - \frac{1}{3} \cos 3\omega t + \frac{1}{5} \cos 5\omega t - \frac{1}{7} \cos 7\omega t + \dots \right] \quad (7)$$

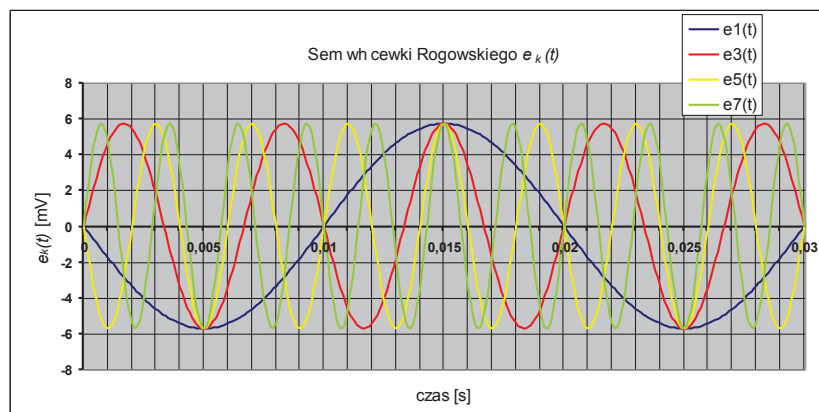
Do analizy wykorzystano cztery kolejne harmoniczne – mianowicie 1. 3. 5. i 7. Za częstotliwość podstawowej harmonicznej przyjęto 50 Hz.



Rys. 4. Cztery kolejne harmoniczne $i_k(t)$ odkształconego prądu $i(t)$ opisanego zależnością 7



Rys. 5. Przebieg odkształconego prądu $i_{sum}(t)$ będącego sumą harmonicznych $i_k(t)$ przedstawionych na rys. 4. Wartość skuteczna prądu $I_{sk} = 0,9744 [A]$



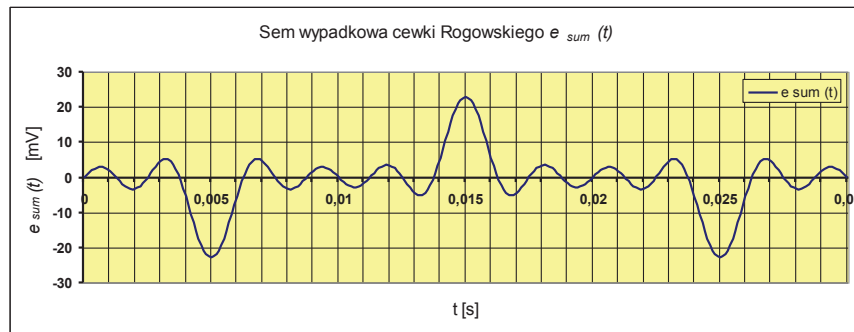
Rys. 6. Przebieg harmonicznych sił elektromotorycznych $e_k(t)$ indukowanych w cewce od poszczególnych harmonicznych prądu $i_k(t)$ przedstawionych na rys. 4

Na rysunku 4 przedstawiono przebiegi poszczególnych harmonicznych odkształconego prądu $i(t)$, natomiast na rysunku 5 przebieg odkształconego prądu $i_{sum}(t)$ będącego sumą tych czterech harmonicznych.

Na rysunku 6 przedstawiono przebiegi harmonicznych sem $e_k(t)$ indukowanych od harmonicznych monitorowanego prądu przedstawionych na rysunku 4.

O ile amplitudy k -tych harmonicznych prądu opisanego wyrażeniem (7) maleją k -krotnie w stosun-

ku do amplitudy podstawowej harmonicznej, o tyle zostają ponownie k -krotnie wzmacnione podczas indukowania poszczególnych sem E_{km} w cewce Rogowskiego. Nałożenie się obu zjawisk daje w rezultacie wynik przedstawiony na rysunku 6, w którym amplitudy E_{km} wszystkich harmonicznych mają jednakową wartość równą amplitudzie podstawowej harmonicznej E_{1m} .



Rys. 7. Przebieg wypadkowej siły elektromotorycznej $e_{sum}(t)$ indukowanej w cewce od prądu $i_{sum}(t)$ przedstawionego na rys. 5. Wartość skuteczna sem $E_{sum} = 8,103 \text{ mV}$

Współczynnik przekształcenia n , obliczony na podstawie uzyskanych wartości skutecznych I_{sk} monitorowanego prądu i uzyskanej z cewki wartości skutecznej siły elektromotorycznej E_{sk} cewki, wynosi:

$$n = \frac{E_{sk}}{I_{sk}} = \frac{E_{sum}}{I_{sk}} = \frac{8,103[\text{mV}]}{0,977[\text{A}]} = 8,315 \frac{\text{mV}}{\text{A}} \quad (8)$$

Należy w tym miejscu przypomnieć, iż wartość współczynnika przekształcania n_1 przyjęta do symulacji procesu transformacji dla harmonicznej podstawowej wynosi 4,5 [mV/A], podczas gdy jego wartość n dla analizowanego przebiegu zawierającego cztery kolejne harmoniczne wynosi 8,315 [mV/A], co stanowi prawie dwukrotny wzrost jego wartości.

Tak więc, współczynnik przekształcania n zależy bardzo silnie od zawartości wyższych harmonicznych w monitorowanym prądzie i nie może być traktowany tak jak np. przekładnia przekładnika o stałej wartości.

W przypadku wykorzystywania cewki Rogowskiego jako elementu monitorującego prąd w układach zabezpieczeń zwarciovych, z wystarczającą dokładnością można przyjąć wartość współczynnika przekształcania n jak dla podstawowej harmonicznej (n_1) z uwagi na bliski sinusoidalnemu kształt prądu zwarciovego.

Natomiast wykorzystanie sygnału z cewki Rogowskiego do pomiarów odkształconych prądów roboczych i przeciążeniowych wiąże się z koniecznością przetwarzania uzyskanego przebiegu sem wypadkowej. Przedstawiony na rysunku 7 przebieg $e_{sum}(t)$ różni się całkowicie od indukującego go przebiegu prądu $i_{sum}(t)$ (rys. 5).

Rezystancyjny charakter obwodu ($R=10 \text{ k}\Omega$) obciążenia cewki Rogowskiego sprawił, że wyznaczony przebieg prądu $i_R(t)$ cewki Rogowskiego znacząco odbiegał od kształtu monitorowanego prądu $i_{sum}(t)$ i był podobny do przebiegu siły elektromotorycznej $e_{sum}(t)$ przedstawionego na rys. 7.

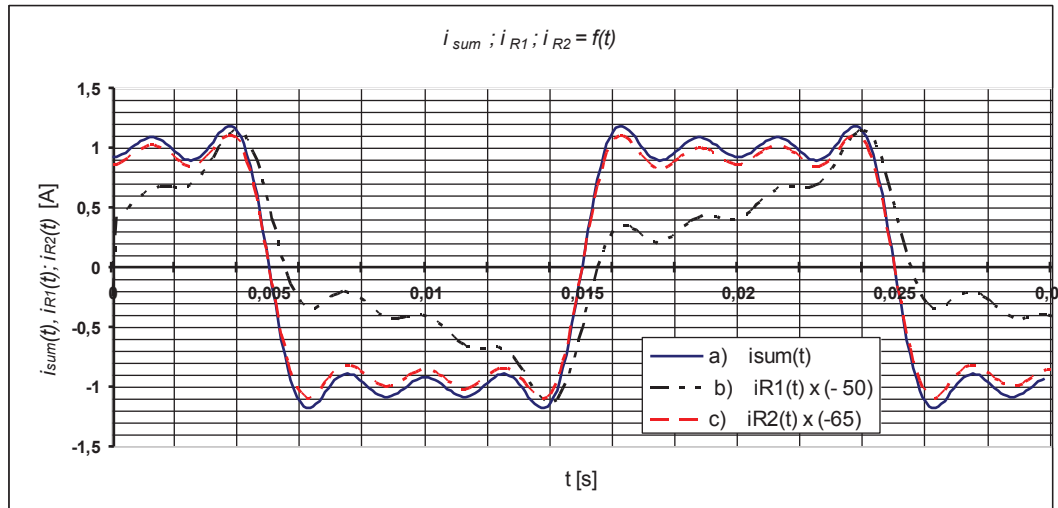
Kolejnym etapem symulacji było zwiększenie indukcyjności obwodu obciążenia cewki i zmniejszenie wartości rezystancji obciążenia.

Cewkę Rogowskiego (monitorującą w dalszym ciągu prąd o przebiegu jak na rys. 5) obciążono szeregowo ze sobą połączonymi – rezystorem R i indukcyjnością L (rys. 2). Celem tych badań było rozpoznanie wpływu indukcyjności obwodu obciążenia cewki Rogowskiego na kształt prądu obciążenia cewki $i_R(t)$. W tym celu cewkę obciążono rezystorem $R=100 \text{ }\Omega$, równym wartości rezystancji cewki R_w , a jako wypadkową indukcyjność ($L_w + L$) obciążenia przyjęto wartość 1 [H]. Wyniki symulacji przedstawiono na rysunku 8 w postaci przebiegu prądu obciążenia cewki $i_{R1}(t)$. Uzyskany przebieg prądu $i_{R1}(t)$ cewki – przedstawiony na rysunku 8 – przypomina kształtem monitorowany prąd i jest przesunięty w fazie względem indukującego go prądu $i_{sum}(t)$.

W następnym kroku symulacji – przyjmując założenie, że obwód obciążenia ma charakter silnie indukcyjny ($R=11 \text{ }\Omega$, $L=1 \text{ [H]}$) – wyznaczono przebieg prądu $i_{R2}(t)$ cewki. Uzyskane w tych warunkach obciążenia cewki prąd $i_{R2}(t)$ przedstawiono również na rysunku 8. Krzywa dokładnie odzwierciedla przebieg prądu monitorowanego, przy czym jest przesunięta w fazie o kąt 180° – na rysunku odwrócona i określona znakiem minus.

Uzyskane w wyniku symulacji przebiegi prądu $i_R(t)$ obciążenia cewki Rogowskiego przy zmieniających się parametrach obwodu obciążenia pozwalają na stwierdzenie, że silnie indukcyjny charakter obwodu obciążenia cewki Rogowskiego, jak również jej dobroć zasadniczo wpływają na dokładność transformacji. Sygnałem wyjściowym jest wówczas prąd jej obciążenia lub pośrednio spadek napięcia U na rezystancyjnej części obciążenia R (rys. 9).

Istnieją zasadniczo dwa sposoby uzyskania sygnału z cewki Rogowskiego o przebiegu zbliżonym swym kształtem do przebiegu monitorowanego prądu odkształconego.



Rys. 8. Przebiegi uzyskane w wyniku symulacji:

- a) monitorowanego prądu $i_{sum}(t)$ – prąd pierwotny,
 b) prądu cewki Rogowskiego $i_{R1}(t)$ obciążonej rezystancją $R=100[\Omega]$ przy wartości $(L + L_w)=1 [H]$;
 Wartość skuteczna indukowanej sem – $E_{sum} = 8,103 mV$.
 c) prądu cewki Rogowskiego $i_{R2}(t)$ w warunkach obciążenia $(R+R_w)=11[\Omega]$ przy wartości $(L + L_w)=1 [H]$;
 Wartość skuteczna indukowanej sem – $E_{sum} = 8,103 mV$.

Pierwszy z nich polega na cyfrowym przetwarzaniu przebiegu $e_{sum}(t)$ indukowanego w cewce.

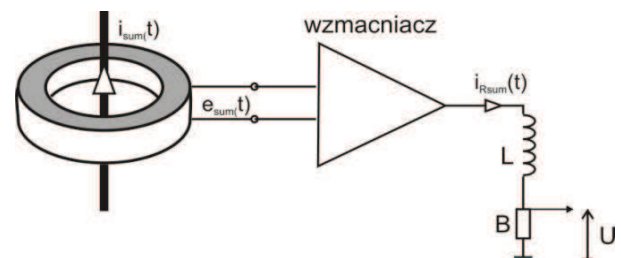
Drugi natomiast polega na takim doborze parametrów cewki i impedancji obciążenia, aby uzyskać przebieg prądu cewki $i_R(t)$ jak najwierniej odwzorowujący monitorowany prąd odkształcony. Idealna cewka Rogowskiego – oprócz znanych powszechnie zalet [1] – powinna charakteryzować się dużą dobrocią (duża wartość L/R). Niestety zbudowanie czułej cewki o dużej indukcyjności a małej wartości rezystancji jest praktycznie niemożliwe.

Obecnie prowadzone są badania weryfikacyjne na modelach fizycznych, przy czym cewka Rogowskiego jest obciążana dławikiem ferrytowym o odpowiednio dużej indukcyjności.

W tym miejscu należy zwrócić uwagę na bardzo małe wartości prądów cewki nieprzekraczające $15 [\mu A]$ (przy prądzie monitorowanym o wartości maksymalnej $1[A]$), co z uwagi na możliwe zakłócenia elektromagnetyczne ze strony obwodów silnoprądowych czyni ten sygnał porównywalny z szumami. Dlatego też do dalszych badań planuje się użycie cewki ekranowanej, obciążonej dławikiem o dużej dobroci z zastosowaniem wzmacniacza operacyjnego usytuowanego bezpośrednio przy zaciskach cewki.

Wzmocnienie sygnału $e_{sum}(t)$ w pobliżu zacisków cewki Rogowskiego (rys. 9) i obciążenie wzmacniacza odpowiednio dobraną indukcyjnością L powinno pozwolić na uzyskanie wiernej transformacji prądu odkształconego $i_{sum}(t)$ bez znaczącego przesunięcia fazowego. Należy jednak podkreślić, iż zastosowanie wzmacniacza w proponowanym rozwiązaniu prze-

twornika ograniczy zakres liniowego przekształcania prądu, predisponując je tym samym do dokładnego monitorowania odkształconych przebiegów prądowych w zakresie prądów roboczych i przeciążeniowych.



Rys. 9. Uproszczony schemat układu monitorującego przebiegi odkształconych prądów

WNIOSKI, UWAGI KOŃCOWE

1. Sinusoidalne przebiegi monitorowanych prądów są transformowane liniowo przez cewkę Rogowskiego w praktycznie nieograniczonym zakresie ich wartości.
2. Wykorzystanie sygnału napięciowego indukowanego w cewce Rogowskiego do monitorowania **sinusoidalnego** przebiegu prądu związane jest z występowaniem przesunięcia fazowego o wartości $\leq 90^\circ$, które należy uwzględnić w algorytmach obliczeń wielkości określanych za pomocą tego sygnału.

3. W przypadku występowania **odkształconych prądów**, przebieg sygnału napięciowego cewki – w zależności od stopnia odkształcenia THD_i prądu – może całkowicie różnić się od przebiegu generującego go prądu. Problematiczne staje się wówczas wykorzystanie go do monitoringu, jak i kształtowania charakterystyk działania układów elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej.
4. Istnieją zasadniczo dwa sposoby uzyskania wiernego kształtu sygnału z cewki Rogowskiego o przebiegu dążącym swym kształtem do przebiegu monitorowanego prądu. Pierwszy z nich polega na cyfrowym przekształcaniu przebiegu napięcia indukowanego w cewce Rogowskiego, natomiast drugi wykorzystuje technikę analogową.
5. Współczynnik przekształcania n cewki Rogowskiego jest funkcją zawartości wyższych harmonicznych w monitorowanym prądzie i nie może być traktowany jako wartość stała tak jak np. przekładnia przekładnika.
6. Duża dobroć obwodu obciążenia cewki Rogowskiego znacząco poprawia wierność transformacji, przy czym sygnałem wyjściowym jest wówczas prąd obciążenia cewki.
7. Odpowiednie wzmocnienie sygnału napięciowego w pobliżu zacisków cewki Rogowskiego, ekranowanie wzmacniacza obciążonego dławikiem o dużej dobroci powinno dać w efekcie układ prostego przetwornika mogącego znaleźć zastosowanie w urządzeniach niewykorzystujących rozbudowanej techniki mikroprocesorowej. Należy jednak dodać, iż zastosowanie wzmacniacza sygnału ogranicza zakres linowego przetwarzania takiego przetwornika.

Literatura

1. Szółka S., Wiśniewski G.: Cewka Rogowskiego w środowisku przebiegów odkształconych – przykładowe zastosowania. Przegląd Elektrotechniczny, Nr 4 2009 r., str. 122-126.
2. Lj. A. Kojovic: „Rogowski Coil Performance Characteristics for Advanced Relay Protection”, Proceeding of the 9th International Conference on Developments in Power Systems Protection, 17-19 March 2008; Glasgow.
3. Szółka S., Wiśniewski G., Fjałkowski Z., Lisowiec A.: Filtr składowej zerowej prądu z cewką Rogowskiego w środowisku prądów odkształconych. Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa 2008, Nr 7-8 (450), s. 25-33.
4. Szółka S., Wiśniewski G.: Rogowski coil as a modern sensor for monitoring of current. Przegląd Elektrotechniczny, Nr 1 2009 r., str. 131-135.

Recenzent: dr inż. Grzegorz Wiśniewski

ROGOWSKI COIL IN THE DEFORMED RUNS ENVIRONMENT – TRANSFORMATION ACCURACY

The article features the issue of accurate transformation of deformed currents monitored by means of the Rogowski coil. The author described the values of the transformation coefficient with respect to the degree of the current deformation. The simulation tests results were presented for a theoretically possible method to improve the transformation quality with the use of an operational amplifier.

ПОЯС РОГОВСКОГО В СРЕДЕ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ ПРОТЕКАНИЙ – ТОЧНОСТЬ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

В статье представлена проблематика сходимости трансформации несинусоидальных токов, monitored при помощи пояса Rogowskiego. Рассмотрено непостоянство значения коэффициента преобразования в зависимости от степени деформации тока. Представлены результаты моделирования теоретически возможного способа повышения качества трансформации при использовании операционного усилителя. Указаны ограничения в области работы предлагаемого решения.