

## Cewka Rogowskiego o zwiększonej odporności na wpływ zewnętrznych strumieni magnetycznych

*W artykule podjęto próbę analizy mechanizmu indukowania się pasożytniczych napięć w sygnale użytecznym cewki Rogowskiego. Omówiono rolę uzwojeń kompensacyjnych i zasady ich nawijania, a także podano wyniki badań modelowych ekranowanych cewek Rogowskiego.*

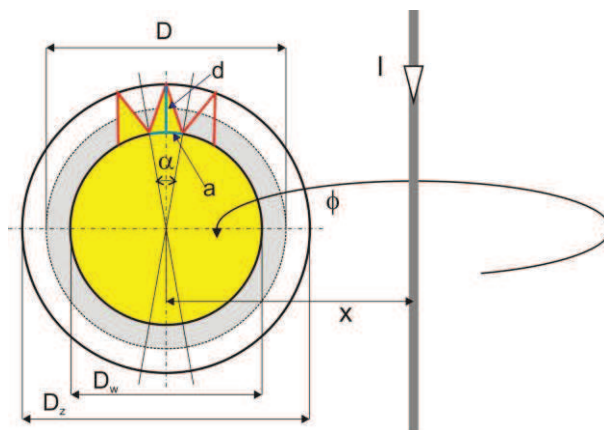
### 1. WPROWADZENIE

Wzrastające zainteresowanie cewkami Rogowskiego wynika z potrzeby miniaturyzacji nowoczesnych aparatów, urządzeń elektrycznych, elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej [3, 5]. Ich kompaktowa budowa sprawia, że małe rozmiary i ciężar cewek Rogowskiego, w połączeniu z dużą wiernością przekształcania i niską ceną, predysponują je do roli atrakcyjnego przetwornika prądu przemiennego [1, 2, 4, 6]. Praktyczne rozwiązania techniczne cewek wykonanych bez uwzględnienia wpływu pasożytniczych strumieni magnetycznych indukowanych przez sąsiednie tory prądowe obciążone bywają znaczną niedokładnością transformacji, co w przypadku zabezpieczeń może prowadzić do ich zbędnych lub nieprawidłowych pobudzeń. Ekranowane cewki Rogowskiego – przy spełnieniu pewnych warunków – dają możliwość znacznego zmniejszenia napięć pasożytniczych indukowanych przez sąsiednie tory prądowe.

### 2. ROLA ZWOI KOMPENSUJĄCYCH CEWKI ROGOWSKIEGO

Proces technologiczny cewek Rogowskiego wykorzystuje nawijarki do nawijania uzwojeń na karkasach toroidalnych. Dla osiągnięcia dużej czułości wymagana jest znaczna liczba zwoi, co w praktyce

sprawia, że podczas procesu nawijania uzwojenia karkas obraca się od kilku do kilkunastu razy w jednym kierunku. W ten sposób w płaszczyźnie karkasu powstaje kilkanaście zwoi, w których indukują się sem pasożytnicze od prądów płynących w sąsiedztwie cewki (rys. 1). W celu zminimalizowania tych napięć stosuje się uzwojenia kompensacyjne nawinięte w ten sposób, aby strumienie pasożytnicze tych prądów indukowały w tych obu utworzonych uzwojeniach jednakowe, lecz przeciwnie skierowane siły elektromotoryczne. Spełnienie tego warunku wymaga określenia optymalnej średnicy  $D$  nawinięcia zwoi kompensujących.



Rys. 1. Uproszczony widok cewki Rogowskiego nawiniętej równomiernie na toroidzie, gdzie:

$D_w$  – średnica wewnętrzna toroidu,  
 $D_z$  – średnica zewnętrzna toroidu,  
 $D$  – średnica zwoi kompensujących

Wyznaczenie idealnej średnicy  $D$  jest możliwe z warunku równości pól – pola utworzonego przez jedną warstwę uzwojenia cewki Rogowskiego i pola jednego zwoju kompensacyjnego.

Obliczenie pola zastępczego  $S_i$  utworzonego przez jedną warstwę uzwojenia cewki Rogowskiego nawiniętego równomiernie na średnicy  $D$  na toroidzie o przekroju kołowym średnicach  $D_z$  (zewnętrzna) oraz  $D_w$  (wewnętrzna) przebiega w kilku etapach. Najpierw obliczane jest pole  $S_w$  wycinka pierścienia o średnicach  $D_z$  i  $D_w$  ograniczone kątem  $\alpha$  wynosi:

$$S_w = \left[ \left( \pi \cdot \frac{D_z^2}{4} \right) - \left( \pi \cdot \frac{D_w^2}{4} \right) \right] \cdot \frac{\alpha}{2\pi} \quad (1)$$

natomiast pole  $S$  wycinka pierścienia o średnicach  $D$  i  $D_w$  ograniczone kątem  $\alpha$  oblicza się jako:

$$S = \left[ \left( \pi \cdot \frac{D^2}{4} \right) - \left( \pi \cdot \frac{D_w^2}{4} \right) \right] \cdot \frac{\alpha}{2\pi} \quad (2)$$

W rzucie pionowym uzwojenie cewki można traktować jak wypełnioną gwiazdę wieloramienną (rys. 1). Pole  $S_T$  trójkąta o podstawie  $a$  i wysokości  $d$  wynosi:

$$S_T = \frac{1}{2} a \cdot d = \frac{1}{2} \cdot \left( \pi \cdot D_w \cdot \frac{\alpha}{2\pi} \right) \cdot \left( \frac{D_z}{2} - \frac{D_w}{2} \right) \quad (3)$$

Wychodząc z warunku równości pól  $S$  i  $S_T$ , można wyznaczyć średnicę  $D$  idealnych zwoi kompensujących zapewniających całkowitą kompensację sem indukującej się w cewce Rogowskiego od zakłócającego strumienia  $\Phi$  (rys. 1) pod warunkiem zapewnienia identycznego sprzężenia wszystkich warstw zwoi cewki Rogowskiego i jej zwoi kompensujących:

$$\left[ \left( \pi \cdot \frac{D^2}{4} \right) - \left( \pi \cdot \frac{D_w^2}{4} \right) \right] \cdot \frac{\alpha}{2\pi} = \frac{1}{2} \cdot \left( \pi \cdot D_w \cdot \frac{\alpha}{2\pi} \right) \cdot \left( \frac{D_z}{2} - \frac{D_w}{2} \right) \quad (4)$$

Stąd idealna średnica  $D$  zwoi kompensujących wynosi:

$$D = \sqrt{D_z \cdot D_w} \quad (5)$$

a idealne pole  $S_i$  objęte przez ten zwoj:

$$S_i = \pi \frac{D^2}{4} = \pi \frac{D_z \cdot D_w}{4} \quad (6)$$

W przypadku, gdy zwoje kompensujące zostaną dowinięte na zewnętrznej średnicy  $D_z$  cewki Rogow-

skiego, pole utworzone przez pojedynczy zwoj kompensujący wynosi:

$$S_z = \pi \frac{D_z^2}{4} \quad (7)$$

a przyrost pola w stosunku do pola  $S_i$  utworzonego przez idealny zwoj o średnicy  $D$ , gdzie  $D_w < D < D_z$ , wynosi:

$$\frac{S_z}{S_i} = \frac{\pi \cdot D_z^2}{4} \cdot \frac{4}{\pi \cdot D_z \cdot D_w} = \frac{D_z}{D_w} \quad (8)$$

W przypadku, gdy zwoje kompensujące zostaną nawinięte na wewnętrznej średnicy  $D_w$  cewki Rogowskiego, pole utworzone przez pojedynczy taki zwoj wynosi:

$$S_w = \pi \frac{D_w^2}{4} \quad (9)$$

a ubytek pola w stosunku do pola  $S_i$  utworzonego przez idealny zwoj o średnicy  $D$  wynosi:

$$\frac{S_w}{S_i} = \frac{\pi \cdot D_w^2}{4} \cdot \frac{4}{\pi \cdot D_z \cdot D_w} = \frac{D_w}{D_z} \quad (10)$$

Przybliżoną wartość sem  $e(t)$  indukowanej w  $n$  zwojach kompensujących od prądu  $i(t)$  (rys. 1) można wyznaczyć z zależności:

$$e(t) = \frac{\mu_0 \cdot n \cdot S_k}{2\pi \cdot x} \cdot \frac{di}{dt} \quad (11)$$

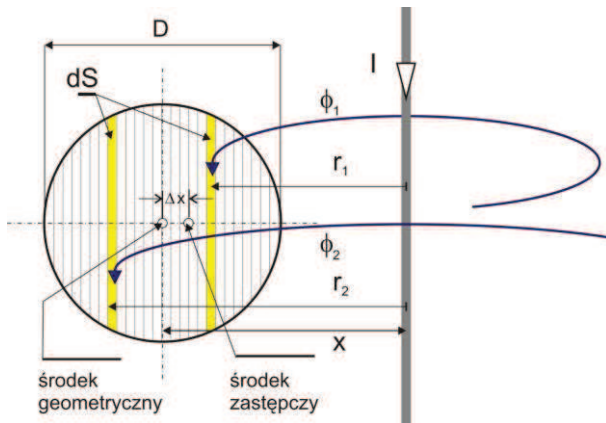
gdzie:

$S_k$  – pole przekroju pojedynczego zwoju kompensującego,

$x$  – odległość prostoliniowego przewodu z prądem  $i(t)$  od środka cewki Rogowskiego (pojedynczy zwoj kompensujący i prostoliniowy przewód z prądem leżą w jednej płaszczyźnie jak na rys. 1),

$n$  – liczba zwoi kompensujących.

Zależność (11) określa dokładniej wartość sem  $e(t)$ , gdy  $S_k \rightarrow 0$  i  $x \rightarrow \infty$ , z uwagi na to, iż geometryczny środek pojedynczego zwoju pokrywa się wówczas z zastępczym środkiem zwoju przesuniętym względem geometrycznego o pewną wartość  $\Delta x$  w kierunku przewodu z prądem pasożytniczym (rys. 2). Pojęcie zastępczego środka zwoju wynika z faktu podziału powierzchni  $S_k$  zwoju kompensującego na nieskończenie wiele małych powierzchni  $dS_k$ , w rezultacie czego każda z nich oddalona jest od przewodu z prądem  $i(t)$  o inną odległość niż wartość  $x$  ( $r_1, r_2$ )



Rys. 2. Poglądowy widok zwoju kompensującego obrazujący różne sprzężenia położonych symetrycznie względem środka geometrycznego powierzchni  $dS$  ze strumieniami  $\Phi_1$  i  $\Phi_2$

we wzorze (11) i każda objęta jest inną wartością strumienia magnetycznego ( $\Phi_1$  i  $\Phi_2$ ). Uwzględnienie tego faktu sprawia, że w rzeczywistości w zwoju kompensacyjnym o takim samym polu wyidukuje się sem o wartości określonej zależnością (11) nie w odległości  $x$  od przewodu, lecz w odległości pomniejszonej o wartość  $\Delta x$ .

Pozorne przesuwanie się środka zwoju kompensującego o wartość  $\Delta x$  w kierunku środka zastępczego jest nieporęczne przy zapisie funkcji  $e(t)$ . Dlatego też zwój ten o powierzchni  $S_k$  usytuowany w odległości  $(x-\Delta x)$  przesuwa się z powrotem na odległość  $x$ , zmniejszając jednocześnie jego powierzchnię, tak aby wartość sem indukowanej w nim w obu tych położeniach była taka sama.

Chcąc uwzględnić ten fakt, w zależności (11) należy wprowadzić współczynnik  $\zeta$ , który określa stopień niezbędnego zmniejszenia rzeczywistej powierzchni zwoju kompensującego  $S_k$ . Współczynnik ten jest funkcją odległości  $x$ , kształtu i wymiarów zwoju kompensujących.

W prawidłowo wykonanym uzwojeniu kompensującym nawiniętym na średnicy idealnej  $D$  (5) powyższe zjawisko nie wpływa na dokładność kompensacji z uwagi na równość pól i na pokrywające się geometrycznie figury tych pól utworzonych przez zwoje kompensujące  $S_i$  (6) i utworzonych przez uzwojenie cewki Rogowskiego (pole żółte na rys. 1).

W dalszych rozważaniach zakłada się, że oba środki pokrywają się ( $\Delta x = 0$ ).

Sem  $e_i(t)$  indukowana od pasożytniczego prądu  $i(t)$  w idealnym uzwojeniu kompensacyjnym nawiniętym na średnicy  $D$  wynosi:

$$e_i(t) = \frac{\mu_0 \cdot n}{2\pi \cdot x} \cdot \frac{\pi \cdot D_z \cdot D_w}{4} \cdot \frac{di}{dt} = \frac{\mu_0 \cdot n \cdot D_z \cdot D_w}{8x} \cdot \frac{di}{dt} \quad (12)$$

Pasożytnicza sem  $e_z(t)$  indukowana w zwojach kompensacyjnych nawiniętych na zewnętrznej średnicy  $D_z$  cewki Rogowskiego wynosi:

$$e_z(t) = \frac{\mu_0 \cdot n}{2\pi \cdot x} \cdot \frac{\pi \cdot D_z^2}{4} \cdot \frac{di}{dt} = \frac{\mu_0 \cdot n \cdot D_z^2}{8x} \cdot \frac{di}{dt} \quad (13)$$

natomiast sem  $e_w(t)$  indukowana w zwojach kompensacyjnych nawiniętych na wewnętrznej średnicy  $D_w$  cewki Rogowskiego wynosi:

$$e_w(t) = \frac{\mu_0 \cdot n}{2\pi \cdot x} \cdot \frac{\pi \cdot D_w^2}{4} \cdot \frac{di}{dt} = \frac{\mu_0 \cdot n \cdot D_w^2}{8x} \cdot \frac{di}{dt} \quad (14)$$

W wyniku umieszczenia zwoi kompensujących na zewnętrznej średnicy  $D_z$  cewki nastąpi przekompensowanie, a współczynnik przekompensowania  $\sigma_p$  wynosi:

$$\sigma_p = \frac{D_z}{D_w} \quad (15)$$

natomiast przy umieszczeniu zwoi na wewnętrznej średnicy  $D_w$  cewki następuje niedokompensowanie, a współczynnik  $\sigma_n$  wynosi wówczas:

$$\sigma_n = \frac{D_w}{D_z} = \frac{1}{\sigma_p} \quad (16)$$

### 3. IDEA EKRYNOWANIA CEWEK ROGOWSKIEGO

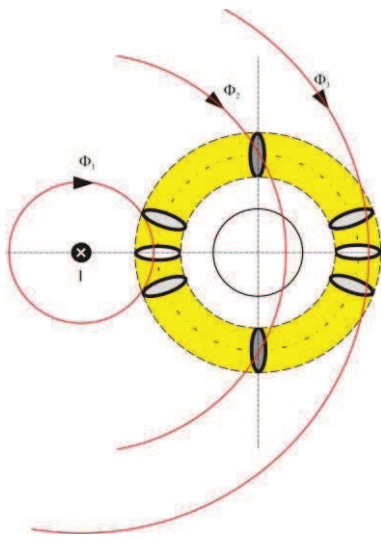
Na rys. 3. przedstawiono schematycznie różne stopnie sprzężenia magnetycznego poszczególnych zwoi cewki ze strumieniami  $\phi_1$ ,  $\phi_2$ ,  $\phi_3$  generowanymi przez przewód z prądem  $I$ . Symetryczne położenie zwoi objętych strumieniem  $\phi_2$  pozwala założyć, że napięcia  $e_R$  indukowane w nich przez strumień  $\phi_2$  są jednakowe i przeciwnie skierowane, w wyniku czego się znoszą. Z uwagi na różną odległość zwoi sprzęgniętych strumieniem  $\phi_1$  i  $\phi_3$  od przewodu z prądem pasożytniczym  $I$  większe napięcia pasożytnicze wyidukują się w zwojach cewki położonych bliżej przewodu od strumienia  $\phi_1$  niż w zwojach położonych dalej a objętych strumieniem  $\phi_3$ . Wpływa na to wartość sem  $e(t)$  w pojedynczym zwoju o powierzchni  $S$  odległym o wartość  $x$  od przewodu z prądem:

$$e(t) = \frac{\mu_0 \cdot z \cdot S}{2\pi \cdot x} \cdot \frac{di}{dt} \quad (17)$$

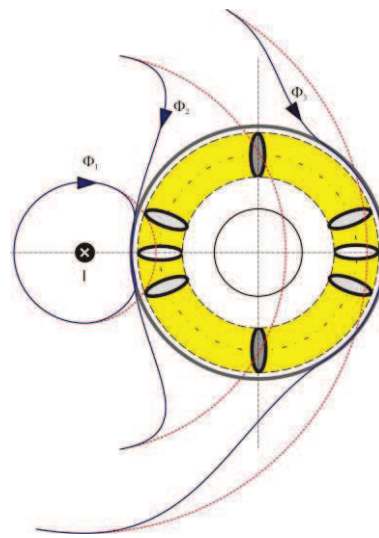
w wyniku tego napięcia pasożytnicze indukowane w zwojach najbliższych i najdalej odległych od przewodu

z prądem nie kompensują się, a w cewce pojawia się różnica ich wartości.

a)



b)



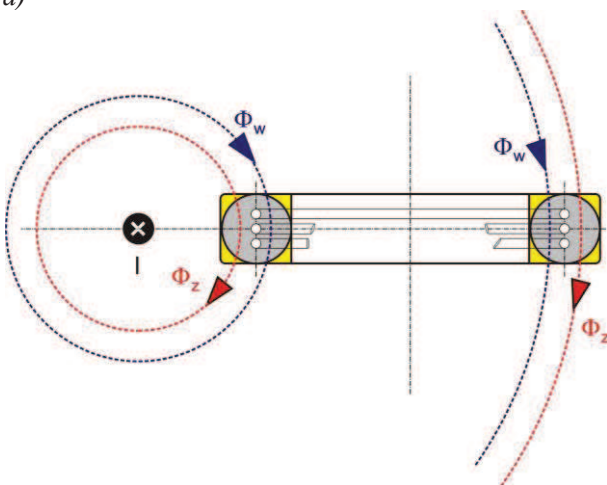
Rys. 3. Przebieg strumieni pasożytniczych  $\phi_1$ ,  $\phi_2$ ,  $\phi_3$  generowanych przez przewód z prądem  $I$  prostopadły do płaszczyzny cewki, a usytuowany poza oknem pomiarowym cewki Rogowskiego:  
a) cewka bez ekranu zewnętrznego; b) cewka z ekranem zewnętrznym

Wyposażenie cewki Rogowskiego w zewnętrzny ekran toroidalny, jak na rys. 3b, daje w efekcie zmianę rozplywu tych strumieni, a tym samym – pasożytniczych sprzężeń, minimalizując wartość  $sem$   $e(t)$  indukowanej w cewce przy takiej konfiguracji układu „cewka – przewód z prądem”.

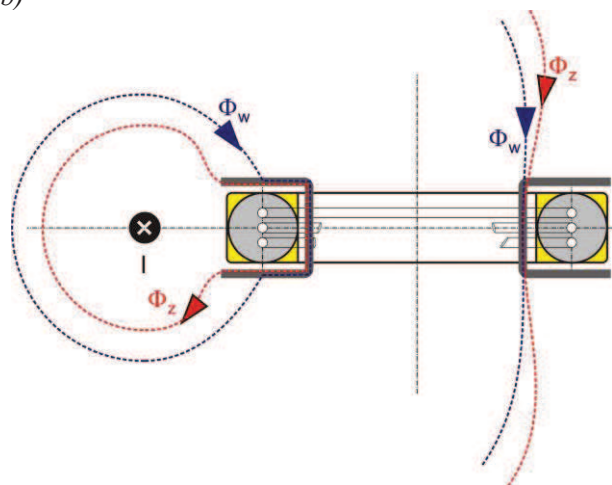
Na rysunku 4. przedstawiono poglądowo różne stopnie sprzężenia magnetycznego poszczególnych strumieni  $\phi_w$  i  $\phi_z$  generowanych przez przewód z prądem prostopadły do osi cewki. W cewce wyposażonej w uzwojenie kompensujące, ale bez ekranu

(rys. 4a), tylko strumień oznaczony jako  $\phi_w$  (wewnętrzny) sprzęga się w miarę jednakowo ze zwojami kompensującymi i uzwojeniem cewki Rogowskiego. Natomiast strumień oznaczony jako  $\phi_z$  (zewnętrzny) sprzęga się częściowo z uzwojeniem cewki, natomiast nie sprzęga się z uzwojeniem kompensującym. W wyniku tego działanie zwoi kompensujących staje się mało skuteczne z uwagi na różne wartości  $sem$  pasożytniczych indukowanych w zwojach kompensujących i uzwojeniach cewki Rogowskiego.

a)

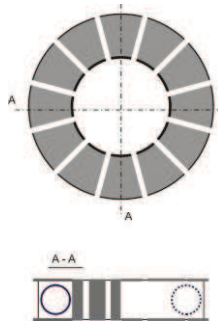


b)



Rys. 4. Przebieg strumieni pasożytniczych  $\phi_w$ ,  $\phi_z$  generowanych przez przewód z prądem  $I$  prostopadły do osi symetrii cewki a usytuowany poza cewką Rogowskiego:  
a) cewka bez ekranu typu „gwiazda”; b) cewka z ekranem typu „gwiazda”

Wyposażenie cewki Rogowskiego w wewnętrzny ekran „gwiazdowy”, jak na rys. 4b, daje w efekcie prawie jednakowe sprzężenie obu tych uzwojeń. Należy się więc spodziewać, iż tego rodzaju ekranowanie poprawi skuteczność działania zwoi kompensujących, a tym samym zmniejszy wartości *sem* pasożytniczych indukowanych w cewce od przewodu z prądem leżącym w płaszczyźnie cewki. Ten rodzaj ekranu określono mianem wewnętrznego. Na rysunku 5. przedstawiono jedną z opatentowanych opcji rozwiązania ekranu wewnętrznego cewki.



Rys. 5. Przykładowe rozwiązanie ekranu wewnętrznego (typu „gwiazda”) cewki Rogowskiego

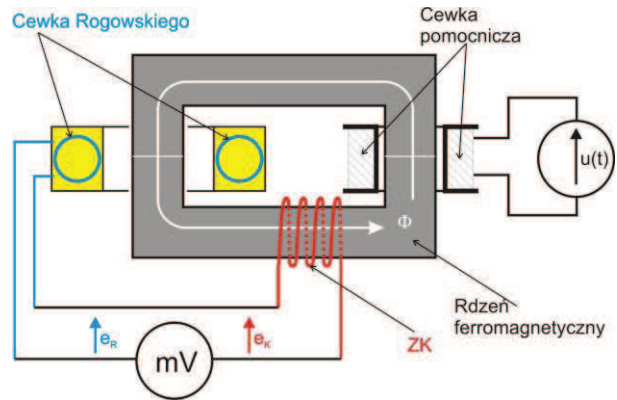
#### 4. POMIARY PASOŻYTNICZYCH NAPIĘĆ INDUKOWANYCH W CEWCE ROGOWSKIEGO

Badania wpływu przeprowadzono dla czterech opcji (A, B, C i D) ekranowania cewek Rogowskiego (rys. 5). Do badań wykorzystano cewkę o następujących parametrach katalogowych:

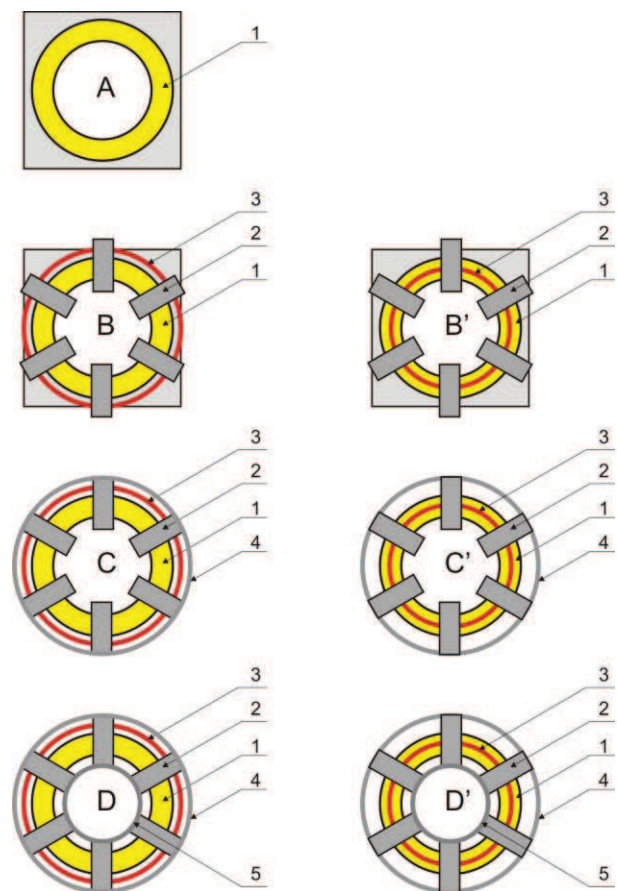
- czułość określona dla harmonicznej podstawowej 50 Hz – 1mV/A,
- całkowita liczba zwoi  $z = 1380$  zw.,
- liczba warstw uzwojenia  $n = 4 - 6$ ,
- rezystancja cewki  $R = 135 \Omega$ ,
- indukcijność cewki  $L = 5$  mH.

Ponieważ producent nie podaje dokładnej liczby  $n$  warstw uzwojenia, dobór uzwojenia kompensacyjnego ZK wymaga pomiarowego określenia tego parametru. Pomiary prowadzono w układzie, jak na rys. 6., gdzie badaną cewkę Rogowskiego sprzęgnięto magnetycznie z cewką pomocniczą (zasilającą) za pomocą składanego rdzenia magnetycznego. Cewkę pomocniczą zasilono napięciem przemiennym, a na rdzeniu nawijano ręcznie uzwojenie kompensujące ZK o takiej liczbie zwoi  $n$ , aby suma obu napięć ( $e_R$  i  $e_K$ ) osiągała wartość minimalną.

Wyznaczoną za pomocą układu z rys. 6. optymalną liczbę zwoi kompensujących (dla badanej cewki  $n = 6$ ) dowinięto na zewnętrznej powierzchni cewek (wersje B, C, D – rys. 7).



Rys. 6. Układ do wyznaczania niezbędnej liczby zwoi kompensujących ZK cewki Rogowskiego



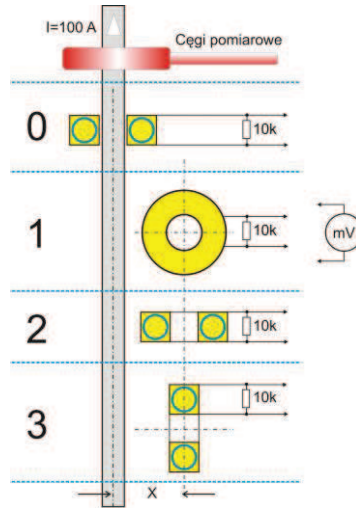
Rys. 7. Rozwiązania badanych cewek Rogowskiego (wersje A, B, C, D) (wersje B', C', D' z prawidłowo umieszczonym uzwojeniem kompensującym), gdzie:

- 1 – karkas z nawiniętą równomiernie „cewką Rogowskiego”,
- 2 – ekran ferromagnetyczny wewnętrzny typu „gwiazda” zapewniający maksymalne sprzężenie zwoi kompensujących i uzwojenia podstawowego od strumieni pasożytniczych,
- 3 – zwoje kompensujące,
- 4 – ekran toroidalny zewnętrzny,
- 5 – ekran toroidalny wewnętrzny

Poszczególne odmiany cewek (A, B, C i D) poddano badaniom wpływu zewnętrznych pól pasożytniczych generowanych przez przewód z prądem o wartości skutecznej  $I = 100$  [A]. Konfiguracje badanych układów „cewka Rogowskiego – przewód z prądem” przedstawiono na rys. 8., przy czym układ oznaczony

jako 0 dotyczył cewki Rogowskiego osadzonej na przewodzie z prądem, a pozostałe układy (1, 2, 3) zawierają wszystkie możliwe położenia cewki względem przewodu usytuowanego poza cewką w odległości  $x$ .

W tabelicy 1. zestawiono podstawowe dane użytych do badań modeli cewek i ekranów magnetycznych.



Rys. 8. Poddane badaniom konfiguracje układów „cewka Rogowskiego – przewód z prądem”

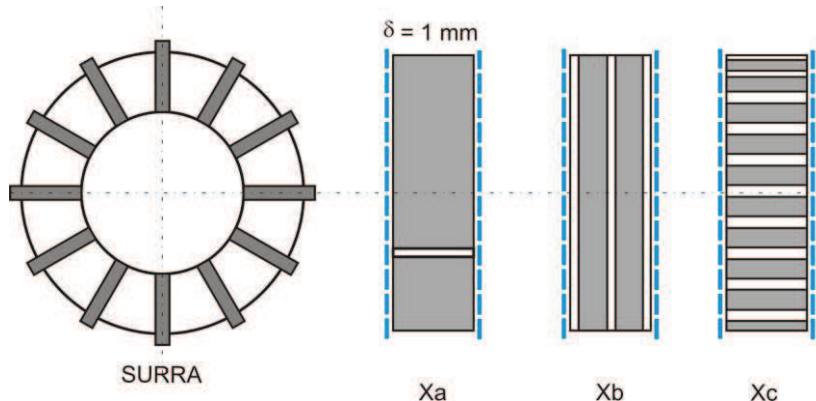
Tablica 1.

Modele cewek i elementy ich ekranów użyte do badań

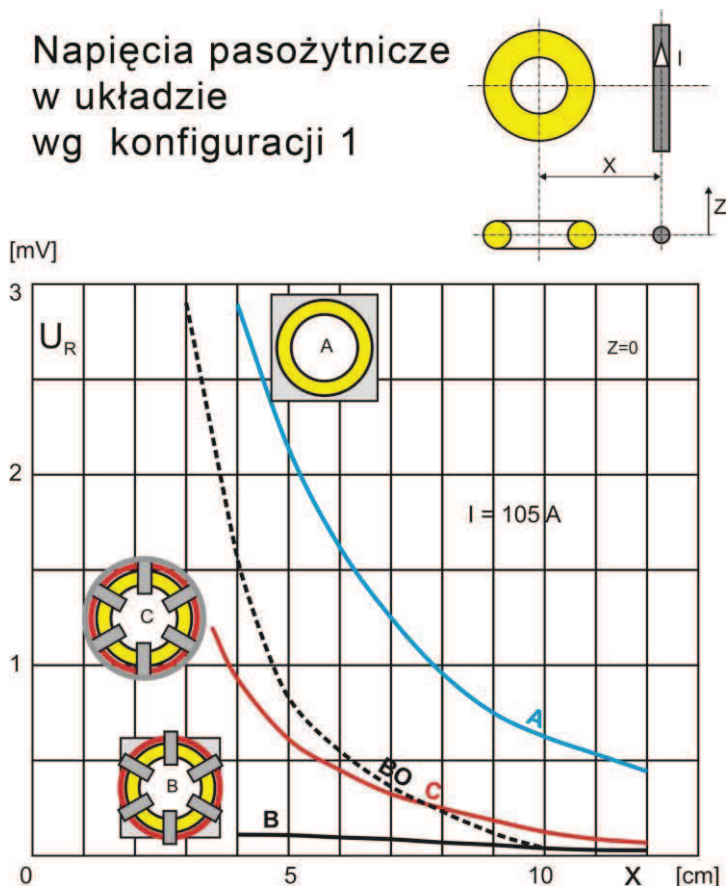
<p>Model cewki Rogowskiego – <b>TYP B</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>czułość 1 mV/A</li> <li>6 zwoi kompensujących nawiniętych na zewnętrznej powierzchni cewki</li> <li>ekran typu „gwiazda” – surra</li> <li>ekran zewnętrzny – brak</li> </ul>			
<p>Model cewki Rogowskiego – <b>TYP C-Xb</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>czułość 1 mV/A</li> <li>6 zwoi kompensujących nawiniętych na zewnętrznej powierzchni cewki</li> <li>ekran typu „gwiazda” – surra</li> <li>ekran zewnętrzny – dwa pierścienie z surry – typ Xb</li> </ul>			
<p>Model cewki Rogowskiego – <b>TYP C-Xc</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>czułość 1 mV/A</li> <li>6 zwoi kompensujących nawiniętych na zewnętrznej powierzchni cewki</li> <li>ekran typu „gwiazda” – surra</li> <li>ekran zewnętrzny – surra – typ Xc</li> </ul>			
Ekran lity BO	Ekran lity BO	Ekran zewnętrzny „sprężyna”	Ekran zewnętrzny surra Xa

Na rysunku 9. przedstawiono rodzaje ekranów zewnętrznych użytych do badań wpływu strumieni pasożytniczych na wartości *sem* indukowanych w cewce Rogowskiego. Z kolei na rysunkach 10-12

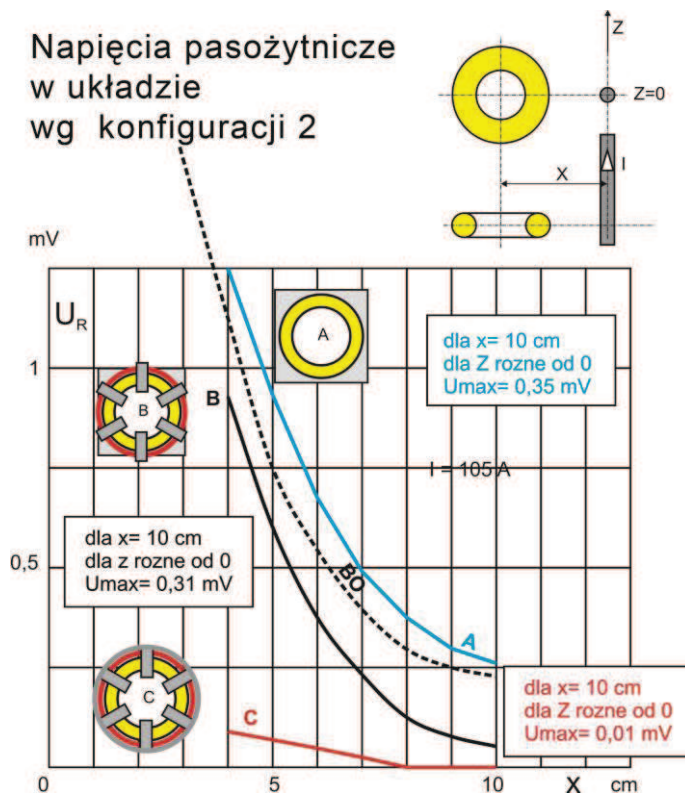
przedstawiono wyniki uzyskane w trakcie badań napięcia pasożytniczego w układzie konfiguracji 1, 2, 3 z cewką z ekranem z litej szpuli z blachy 0,5 mm (tab. 1).



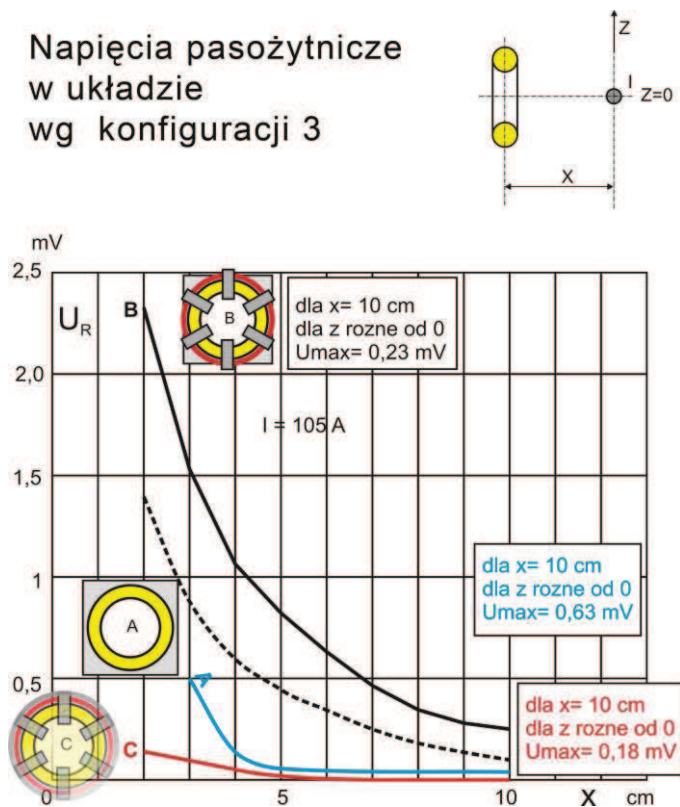
Rys. 9. Rodzaje ekranów zewnętrznych *Xa*, *Xb* i *Xc* użytych do badań wpływu strumieni pasożytniczych na wartości *sem* indukowanych w cewce Rogowskiego



Rys. 10. Wartości napięć pasożytniczych  $U_R$  generowanych przez przewód z prądem  $I=105\text{ A}$  w funkcji odległości  $X$  w cewce Rogowskiego w konfiguracji 1., gdzie: BO – cewka z ekranem w postaci litej szpuli z blachy 0,5 mm (tab. 1)



Rys. 11. Wartości napięć pasożytniczych  $U_R$  generowanych przez przewód z prądem  $I=105$  A w funkcji odległości  $X$  w cewce Rogowskiego w konfiguracji 2., gdzie: BO – cewka z ekranem w postaci litej szpuli z blachy 0,5 mm (tab. 1)

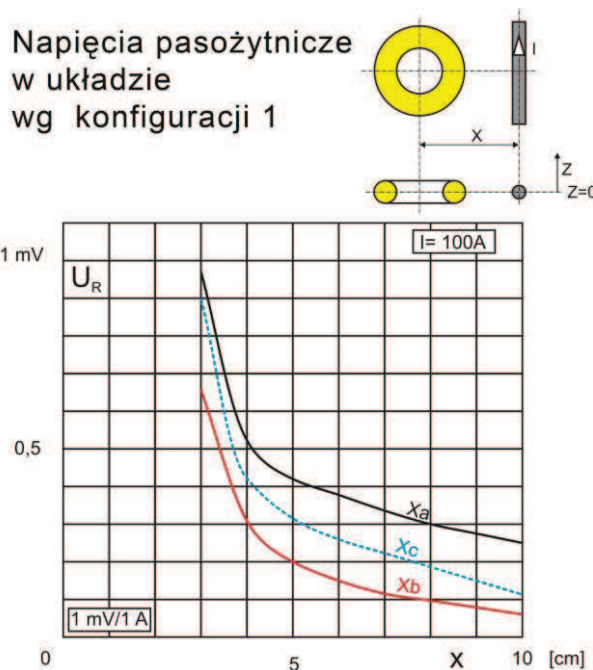


Rys. 12. Wartości napięć pasożytniczych  $U_R$  generowanych przez przewód z prądem  $I=105$  A w funkcji odległości  $X$  w cewce Rogowskiego w konfiguracji 3., gdzie: BO – cewka z ekranem w postaci litej szpuli z blachy 0,5 mm (tab. 1)

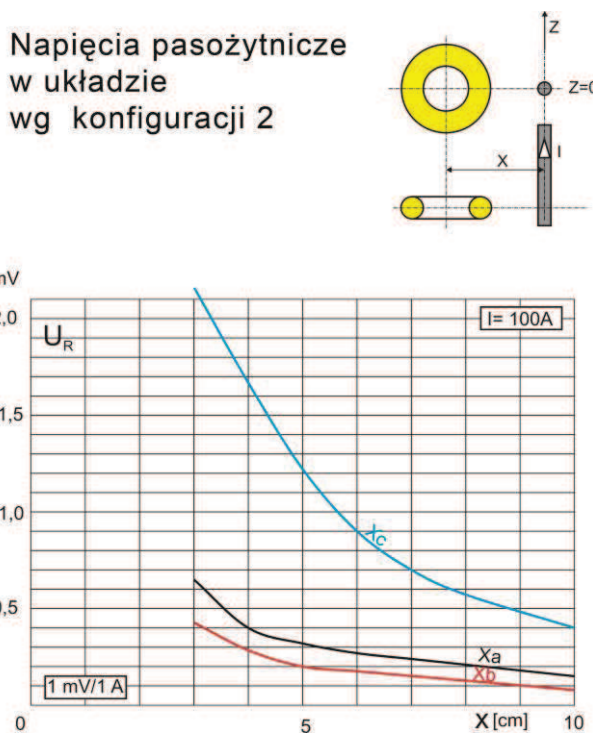


Na rysunkach 13-15 przedstawiono wyniki uzyskane w trakcie badań napięcia pasożytniczego w układzie konfiguracji 1, 2, 3 z cewką Rogowskiego

wyposażoną w ekran wewnętrzny typu „gwiazda” i ekrany zewnętrzne.

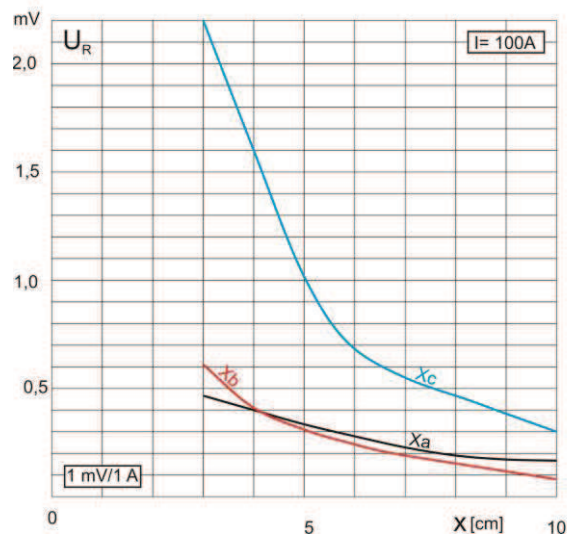
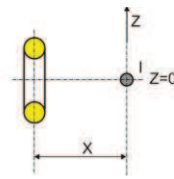


Rys. 13. Wartości napięć pasożytniczych  $U_R$  generowanych przez przewód z prądem  $I=100\text{ A}$  w funkcji odległości  $X$  w cewce Rogowskiego wyposażonej w ekran wewnętrzny typu „gwiazda” i ekrany zewnętrzne  $x_a$ ,  $x_b$  i  $x_c$  w konfiguracji 1



Rys. 14. Wartości napięć pasożytniczych  $U_R$  generowanych przez przewód z prądem  $I=100\text{ A}$  w funkcji odległości  $X$  w cewce Rogowskiego wyposażonej w ekran wewnętrzny typu „gwiazda” i ekrany zewnętrzne  $x_a$ ,  $x_b$  i  $x_c$  w konfiguracji 2.

Napięcia pasożytnicze  
w układzie  
wg konfiguracji 3



Rys. 15. Wartości napięć pasożytniczych  $U_R$  generowanych przez przewód z prądem  $I=100\text{ A}$  w funkcji odległości  $X$  w cewce Rogowskiego wyposażonej w ekran wewnętrzny typu „gwiazda” i ekrany zewnętrzne  $x_a$ ,  $x_b$  i  $x_c$  w konfiguracji 3.

Na rysunku 16. przedstawiono wartości napięć użytecznych  $U_R$  w porównaniu z teoretyczną charakterystyką cewki przy prądzie nieodkształconym,

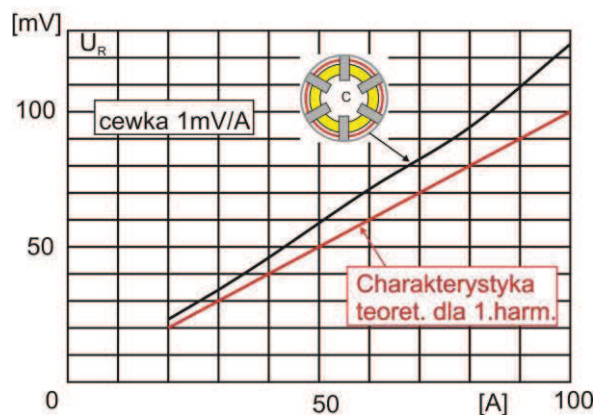
natomiast rysunek 17. obrazuje wynik porównania wartości napięć.

Przewód z odkształconym prądem  
umieszczony w oknie cewki ekranowanej

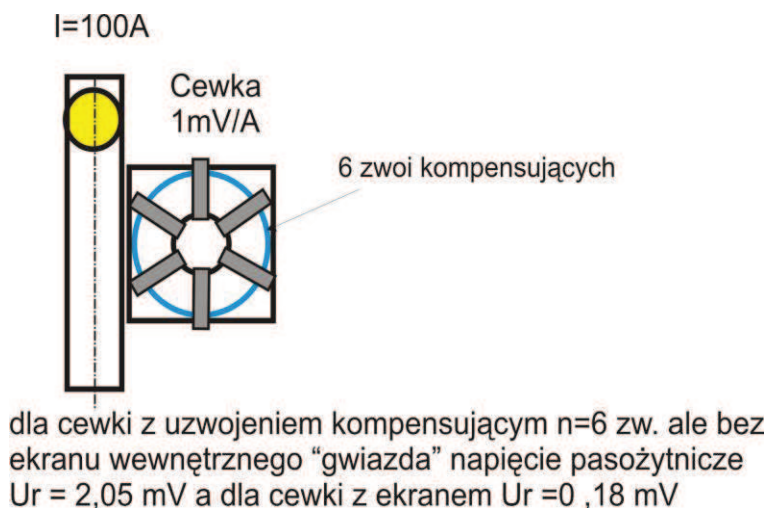
6 zwoi kompensacyjnych  
na zewnątrz cewki  
ekran „gwiazda” z surry  
zewn. ekran toroid  $X_b$  z surry



cewka 1mV/A



Rys. 16. Wartości napięć użytecznych  $U_R$  generowanych w modelu C- $x_b$  cewki Rogowskiego przez przewód z odkształconym prądem  $I$  umieszczonym w oknie cewki Rogowskiego w porównaniu z teoretyczną charakterystyką cewki wyznaczoną dla prądu nieodkształconego



Rys. 17. Porównanie wartości napięć pasożytniczych  $U_R$  generowanych w modelu B cewki Rogowskiego niewyposażonej i wyposażonej w ekran wewnętrzny „gwiazda” przy usytuowaniu jej bezpośrednio przy przewodzie z prądem  $I=100$  A

## 5. PODSUMOWANIE

Stosowanie cewek Rogowskiego w sąsiedztwie znacznej ilości torów prądowych powoduje indukowanie się znacznych wartości napięć pasożytniczych w ich sygnale użytecznym.

W celu zmniejszenia wpływu zewnętrznych pól elektromagnetycznych na cewkę Rogowskiego należy obligatoryjnie wyposażać je w uzwojenie kompensujące.

Maksymalny efekt kompensacji zapewnia uzwojenie kompensujące nawinięte na optymalnej średnicy wyznaczonej za pomocą wymiarów geometrycznych cewki.

Wyposażenie cewki Rogowskiego w ferromagnetyczne ekrany wewnętrzne i zewnętrzne w znaczący sposób zmniejsza wartości napięć pasożytniczych generowanych w sygnale użytecznym cewki przez sąsiednie tory prądowe, nie pogarszając jednocześnie ich właściwości pomiarowych w zakresie niższych częstotliwości.

W przypadku przewidywanego zastosowania cewek ekranowanych do monitorowania prądów silnie odkształconych należy przeprowadzić badania wpływu ekranów ferromagnetycznych na ich charakterystyki częstotliwościowe.

Dobór odpowiedniego ekranu cewki determinowany jest konfiguracją torów prądowych w jej bezpośrednim sąsiedztwie. I tak przy równoległym ułożeniu przewodów najkorzystniejszy efekt ekranowania (ok. 6-krotne zmniejszenie sygnału pasożytniczego) uzyskuje się, wyposażając cewki w zewnętrzny ekran oznaczony w artykule jako  $Xb$ .

Przy torach prądowych leżących w płaszczyźnie cewki największą skuteczność ekranowania (ok. 10-

krotne zmniejszenie sygnału pasożytniczego) zapewnia ekran wewnętrzny typu „gwiazda”.

### Literatura

1. Szkółka S., Wiśniewski G.: *Rogowski coil as a modern sensor for monitoring of current*. Przegląd Elektrotechniczny, 2009 nr 1, s. 131-135.
2. Szkółka S., Szymański A., Wiśniewski G.: *Układ pomiarowy wyższych harmonicznych prądu z wykorzystaniem cewki Rogowskiego*. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, 2006 nr 8 (427), s. 82-90.
3. Szkółka S., Wiśniewski G.: *Cewka Rogowskiego w środowisku przebiegów odkształconych – przykładowe zastosowania*. Przegląd Elektrotechniczny, 2009 nr 4, s. 122-126.
4. Miedziński B., Szkółka S., Borczyński J., Kowalski Z.: *Właściwości przetworników prądowych z cewką Rogowskiego w układach pomiarowych zabezpieczeń*. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, 2004 nr 7 (402), s. 77-84.
5. Szkółka S., Wiśniewski G., Fjałkowski Z., Lisowiec A.: *Filtr składowej zerowej prądu z cewką Rogowskiego w środowisku prądów odkształconych*. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, 2008 nr 7-8 (450), s. 25-33.
6. Szkółka S.: *Cewka Rogowskiego w układzie pomiarowym mocy czynnej w obwodach nieliniowych*. Przegląd Elektrotechniczny, 2011 nr 9a, s. 353-355.

Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów.