

## Wybrane aspekty ekranowania cewek Rogowskiego

*W artykule przedstawiono wyniki badań modelowych dotyczących indukowania się pasożytniczych napięć w sygnale użytecznym cewki Rogowskiego ekranowanej dodatkowo ekranem aluminiowym. Między innymi omówiono elementy składowe przetwornika z cewką Rogowskiego oraz pomiary napięć pasożytniczych. Ponadto zaprezentowano inne sposoby ekranowania cewek Rogowskiego – litym ekranem ferromagnetycznym lub mosiężnym.*

### 1. WSTĘP

Kompaktowa budowa cewek Rogowskiego sprawia, że małe rozmiary i ciężar w połączeniu z dużą wiernością przekształcania i niską ceną predysponują je do roli atrakcyjnego przetwornika prądu przemiennego [1, 2, 5, 6]. Zalety te związane są przede wszystkim z brakiem ferromagnetycznego obwodu magnetycznego, co z kolei sprawia, iż rozwiązania te są mało odporne na wpływ zewnętrznych strumieni magnetycznych.

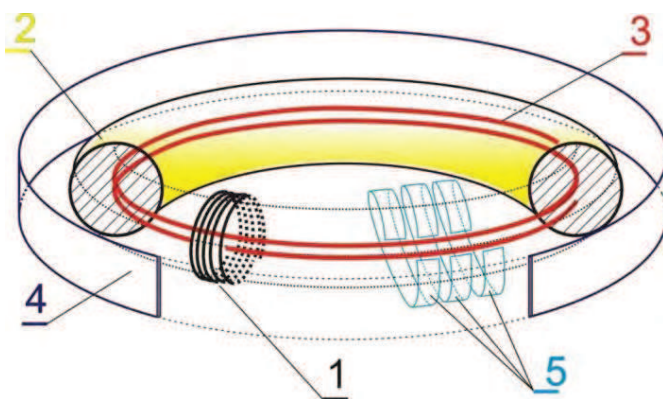
Praktyczne rozwiązania techniczne cewek wykonanych bez uwzględnienia wpływu pasożytniczych strumieni magnetycznych indukowanych przez sąsiednie tory prądowe obciążone bywają znaczną niedokładnością transformacji, co w przypadku zabezpieczeń może prowadzić albo do zbędnych, albo do nieprawidłowych ich pobudzeń. Ekranowane cewki Rogowskiego – przy spełnieniu pewnych warunków – dają możliwość

znacznego zmniejszenia napięć pasożytniczych indukowanych przez sąsiednie tory prądowe [3, 4].

### 2. ELEMENTY SKŁADOWE PRZETWORNIKA Z CEWKĄ ROGOWSKIEGO

Jak już wykazano w [5], z uwagi na pasożytnicze strumienie magnetyczne indukowane przez sąsiednie tory prądowe przetworniki prądowe wykorzystujące cewki Rogowskiego powinny być wyposażone w dodatkowe elementy, których podstawowym zadaniem jest zmniejszenie sygnałów pasożytniczych w sygnale użytecznym cewki. Do najważniejszych elementów takiego przetwornika (rys. 1) zalicza się:

- zwoje kompensujące (3),
- wewnętrzny ekran gwiazdowy (5),
- ekran toroidalny zewnętrzny (4).



Rys. 1. Widok ekranowanego przetwornika prądowego z cewką Rogowskiego;  
1 – uzwojenie główne cewki nawinięte równomiernie, kilkakrotnie na całym obwodzie toroidalnego niemagnetycznego karkasu; 2, 3 – zwoje kompensujące; 4 – ferromagnetyczny, toroidalny ekran zewnętrzny;  
5 – ferromagnetyczny wewnętrzny ekran gwiazdowy [3, 4]

Zwoje kompensujące kompensują pasożytnicze napięcia pochodzące od strumieni innych torów prądowych. Z uwagi na różny stopień sprzężenia magnetycznego zwoi kompensujących i uzwojenia głównego ze strumieniem pasożytniczym celowym jest wyposażenie przetwornika w ferromagnetyczny wewnętrzny ekran gwiazdowy (5). Optymalną kompensację zapewnia ściśle określona liczba zwoi kompensujących [3] nawiniętych na średnicy  $D$  określonej jako:

$$D = \sqrt{D_z \cdot D_w} \quad (1)$$

gdzie:

$D_z, D_w$  – średnice zewnętrzna i wewnętrzna karkasu (2) (rys. 1).

Przybliżoną wartość  $sem$   $e(t)$  indukowanej w  $n$ -zwojach kompensujących od prądu  $i(t)$  płynącego w przewodzie leżącym w jednej płaszczyźnie cewki, ale usytuowanym poza nią, można wyznaczyć z zależności:

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

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),  
 $n$  – liczba zwoi kompensujących.

Idealne skompensowanie sygnałów pasożytniczych w konfiguracji „cewka Rogowskiego – przewód z prądem” związane jest z koniecznością określenia średnicy  $D$  i liczby  $n$  zwoi kompensujących.

Techniczne rozwiązanie problemu nawinięcia z góry określonej liczby  $n$  zwoi kompensujących na średnicy  $D$  „usytuowanej wewnątrz” toroidalnego niemagnetycznego karkasu może sprawiać trudności technologiczne. Poza tym całkowitą liczbę zwojów głównego uzwojenia cewki należy wówczas nawinać równomiernie,  $n$ -krotnie na całym obwodzie toroidalnego karkasu.

Umieszczenie zwoi kompensujących na zewnętrznej średnicy  $D_z$  cewki (a nie na średnicy  $D$ ) wywoła przekompensowanie, a współczynnik przekompensowania  $\sigma_p$  wyniesie:

$$\sigma_p = \frac{D_z}{D_w} \quad (3)$$

Umieszczenie zaś zwoi na wewnętrznej średnicy  $D_w$  cewki spowoduje niedokompensowanie, a współczynnik  $\sigma_n$  wyniesie wówczas:

$$\sigma_n = \frac{D_w}{D_z} = \frac{1}{\sigma_p} \quad (4)$$

Jak przedstawiono w [4], wyposażenie cewki Rogowskiego tylko w odpowiednio dobrane zwoje kompensujące nie rozwiązuje całkowicie problemu eliminowania sygnałów pasożytniczych w sygnale użytecznym cewki. W zależności od jednej z trzech możliwych konfiguracji „cewka Rogowskiego – przewód z prądem zakłócającym” należy dodatkowo stosować ferromagnetyczne ekrany: wewnętrzny gwiazdowy (5) i zewnętrzny toroidalny (4).

### 3. POMIARY NAPIĘĆ PASOŻYTNICZYCH CEWKI ROGOWSKIEGO

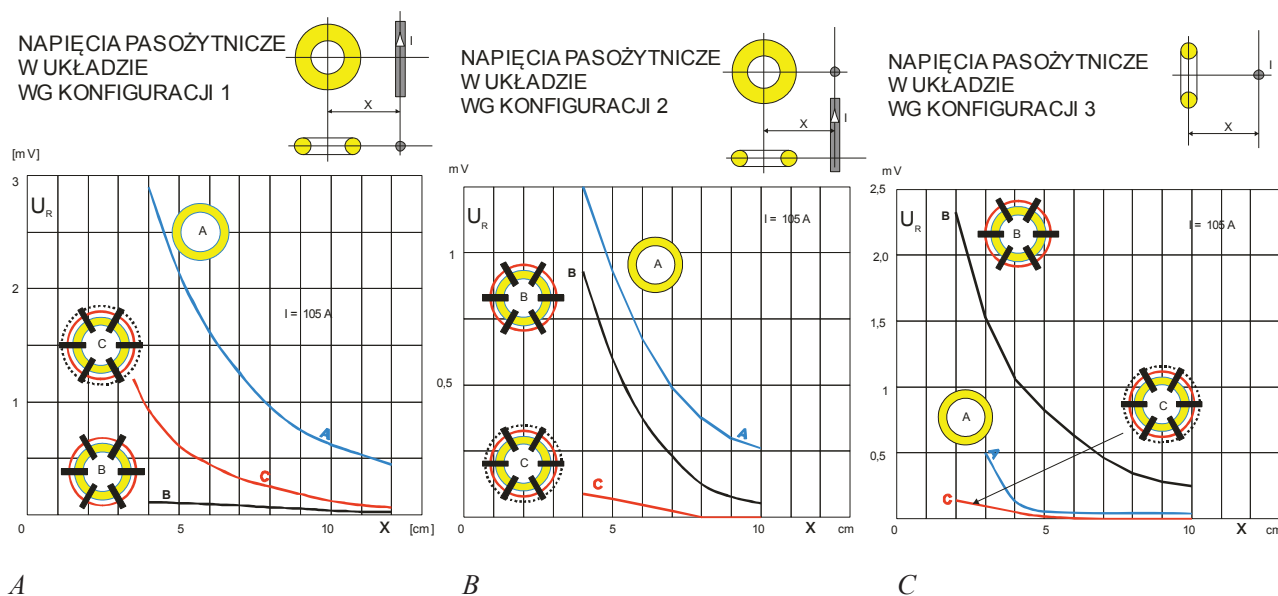
Na rys. 2. przedstawiono (wersja A, B, i C) wyniki pomiarów napięć pasożytniczych dla prądu zakłócającego o wartości 105 A i cewki Rogowskiego obciążonej rezystorem  $R = 11$  k $\Omega$  o parametrach:

- czułość  $s_{CR}$  [4] cewki dla harmonicznej podstawowej 50 Hz – 1 [mV/A],
- zwoje kompensujące nawinięte na zewnętrznej powierzchni cewki;  $z_k = 6$  [zw],
- ferromagnetyczny ekran wewnętrzny typu „gwiazda” (5) (rys. 1) – materiał blacha surra,
- ferromagnetyczny ekran zewnętrzny (4) (rys. 1) w postaci dwóch pasów – materiał blacha surra,
- rezystancja uzwojeń cewki  $R_R = 130$  [ $\Omega$ ].

Poszczególne wersje (rys. 2) różnią się w niektórych elementach rozwiązaniami konstrukcyjnymi:

- wersja A – cewka ze zwojami kompensującymi (3) (rys. 1) nawiniętymi na zewnętrznej jej powierzchni bez ekranów ferromagnetycznych,
- wersja B – jak cewka A z wewnętrznym ekranem ferromagnetycznym typu „gwiazda” (5) (rys. 1),
- wersja C – jak cewka B z zewnętrznym ekranem ferromagnetycznym w postaci dwóch równoległych pasów na tworzącej walca cewki (4) (rys. 1).

Podczas pierwszego etapu badań napięć pasożytniczych indukowanych w cewce Rogowskiego w warunkach różnej konfiguracji „cewka – przewód z prądem pasożytniczym” [3, 4] zauważono indukowanie się napięć na cewkach Rogowskiego nawet w przypadku, kiedy wartość monitorowanego prądu wynosiła zero. Wartości tych napięć wahały się w granicach od 0,24 do 0,8 mV.



Rys. 2. Napięcia pasożytnicze  $U_R$  w funkcji odległości  $x$  dla trzech różnych konfiguracji układu „cewka – przewód z prądem pasożytniczym” [4]

Z uwagi na to, iż w pobliżu cewki znajdował się wymuszalnik prądowy, zdecydowano się na dodatkowe ekranowanie cewki w postaci folii aluminiowej Al, przyłączonej do przewodu ochronnego PE. Okazało się to skuteczną metodą znacznej eliminacji wartości tych napięć pasożytniczych. W przypadku, gdy ekran aluminiowy przyłączono do przewodu neutralnego N, ekran ten stał się anteną generującą większe zakłócenia niż w przypadku cewki pozbawionej tego ekranu. Efekty działania tego ekranu przedstawiono w tabeli 1.

#### 4. CEWKA ROGOWSKIEGO Z DODATKOWYM EKRANEM ALUMINIOWYM AL

Badaniom wpływu zewnętrznych pól na napięcia indukowane w cewce Rogowskiego poddano wersję C cewki o danych jak w p. 2., przy czym przetwornik dodatkowo zaekranowano folią aluminiową Al. W tabeli 1. przedstawiono wyniki pomiarów napięć pasożytniczych  $U_R$  przetwornika umieszczonego na przewodzie z monitorowanym prądem  $I$  jako funkcję stanu załączenia wymuszalnika i połączenia dodatkowego ekranu aluminiowego z przewodem ochronnym PE.

Tabela 1.

Zestawienie zmierzonych wartości napięć pasożytniczych  $U_R$  cewki Rogowskiego z dodatkowym ekranem aluminiowym Al (opracowanie własne)

-	Wymuszalnik prądowy	Wartość prądu $I$	Ekran aluminiowy Al	$U_R$
	Stan	[A]	Stan połączenia z PE	[mV]
1.	WYŁĄCZONY	0	-	0,60
2.	ZAŁĄCZONY	0	-	2,30
3.	ZAŁĄCZONY	0	+	0,00
4.	ZAŁĄCZONY	100	+	106,0

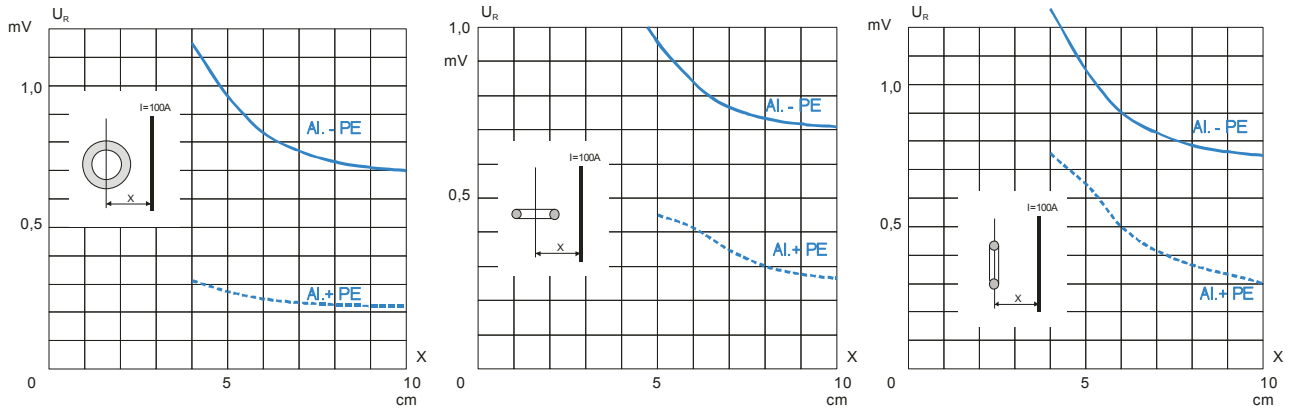
gdzie:

„-” – ekran nieprzyłączony do PE,  
 „+” – ekran przyłączony do PE.

Na rys. 3. przedstawiono zmierzone wartości napięć pasożytniczych wersji konstrukcyjnej C cewki Rogowskiego wyposażonej dodatkowo w aluminiowy ekran Al.

Jak wynika z danych przedstawionych na rys. 3., zastosowanie dodatkowego ekranu aluminiowego znakomicie zmniejsza wartości napięć pasożytniczych

wzrosty w granicach od 1,5 do 3 razy. Należy tutaj zaznaczyć, iż ekran aluminiowy znacznie zmniejsza wartości napięć pasożytniczych, ale zwiększa pojemności własne uzwojeń cewki, co z kolei zmienia jej charakterystyki częstotliwościowe, szczególnie w zakresie wyższych częstotliwości.



Rys. 3. Napięcia pasożytnicze  $U_R$  w funkcji odległości  $x$  dla trzech różnych konfiguracji układu „cewka–przewód z prądem pasożytniczym” i wersji konstrukcyjnej C cewki Rogowskiego o danych jak w p. 2 z ekranem aluminiowym Al przyłączonym lub nie do przewodu ochronnego PE sieci (opracowanie własne)

## 5. CEWKA ROGOWSKIEGO Z LITYM EKRANEM

W kolejnym etapie badań zmierzono skuteczność ekranowania cewki Rogowskiego litym ekranem wykonanym z żelaza lub miedzi. W tym celu cewkę o danych jak w p. 2. – wersja A – umieszczono wewnątrz przygotowanych kubków (rys. 4).

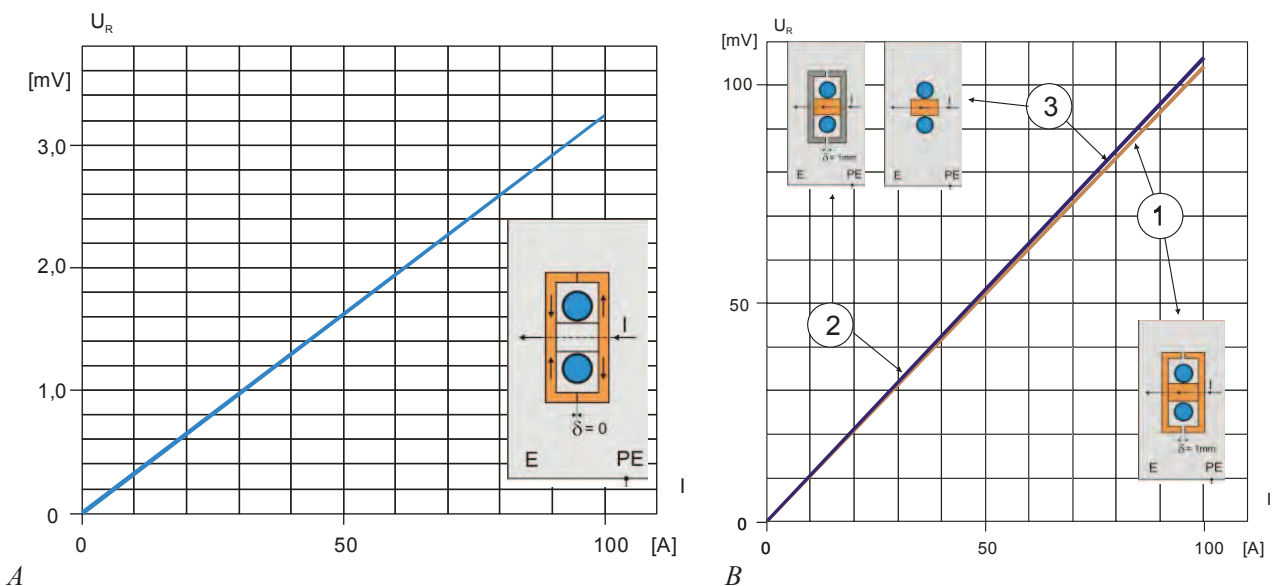
Na rys. 5 przedstawiono charakterystyki przetwornika (częstotliwość 50 Hz) w wersjach:

A) przetwornika umieszczonego w kubku miedzianym (szczelina  $\delta = 0$ ) – monitorowany prąd nie płynie wewnątrz okna cewki Rogowskiego,

B) 1 – przetwornika umieszczonego w kubku miedzianym (szczelina  $\delta = 1$  mm); 2 – umieszczonego w kubku żelaznym (szczelina  $\delta = 1$  mm); 3 – samej cewki Rogowskiego bez kubków ekranujących (opracowanie własne).



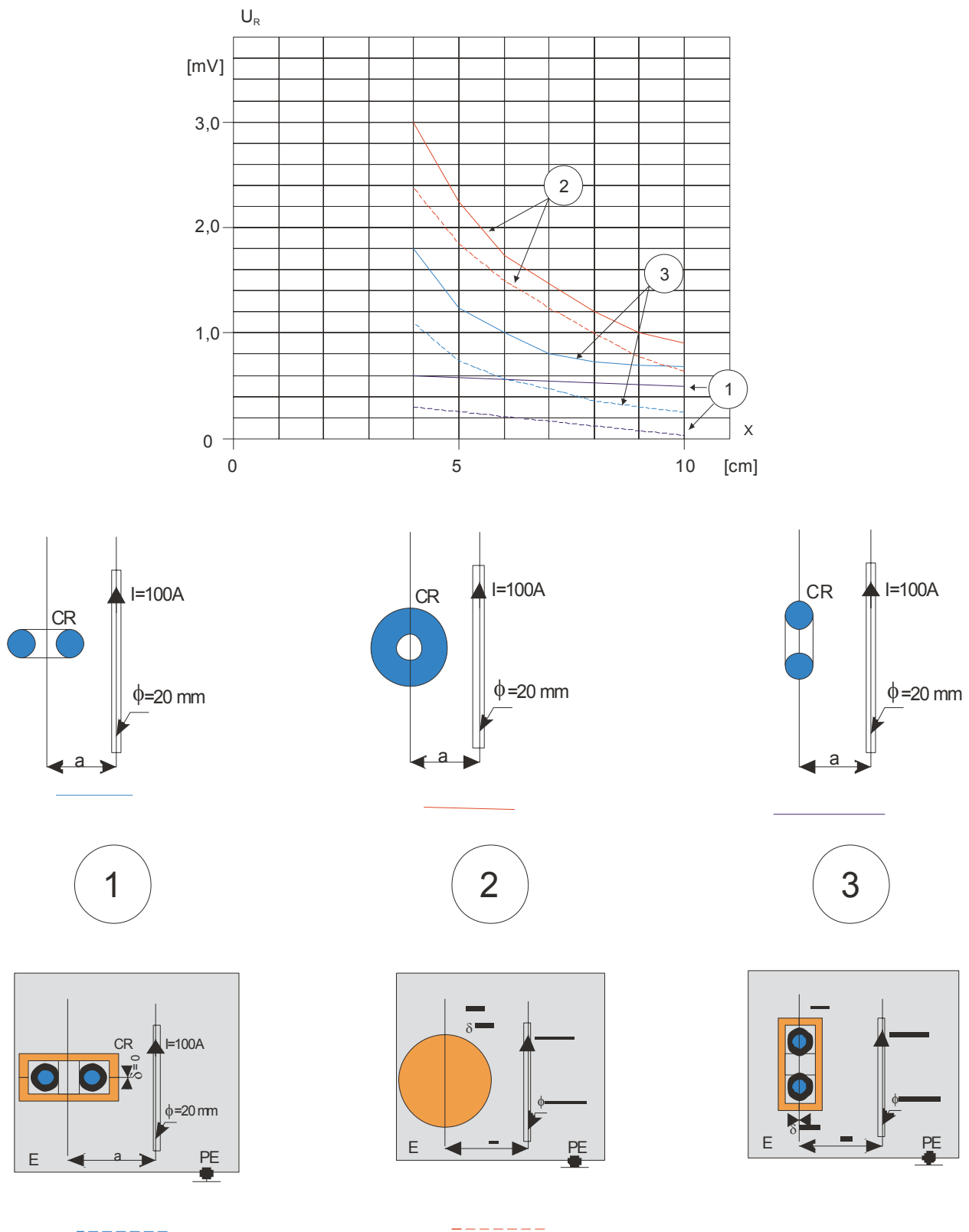
Rys. 4. Widok użytych ekranów cewki Rogowskiego (stalowy i miedziany) (opracowanie własne)



Rys. 5. Charakterystyka przetwornika dla częstotliwości 50 Hz (opracowanie własne)

Napięcia pasożytnicze indukowane w samej cewce (wersja A) i napięcia indukowane w cewce umiesz-

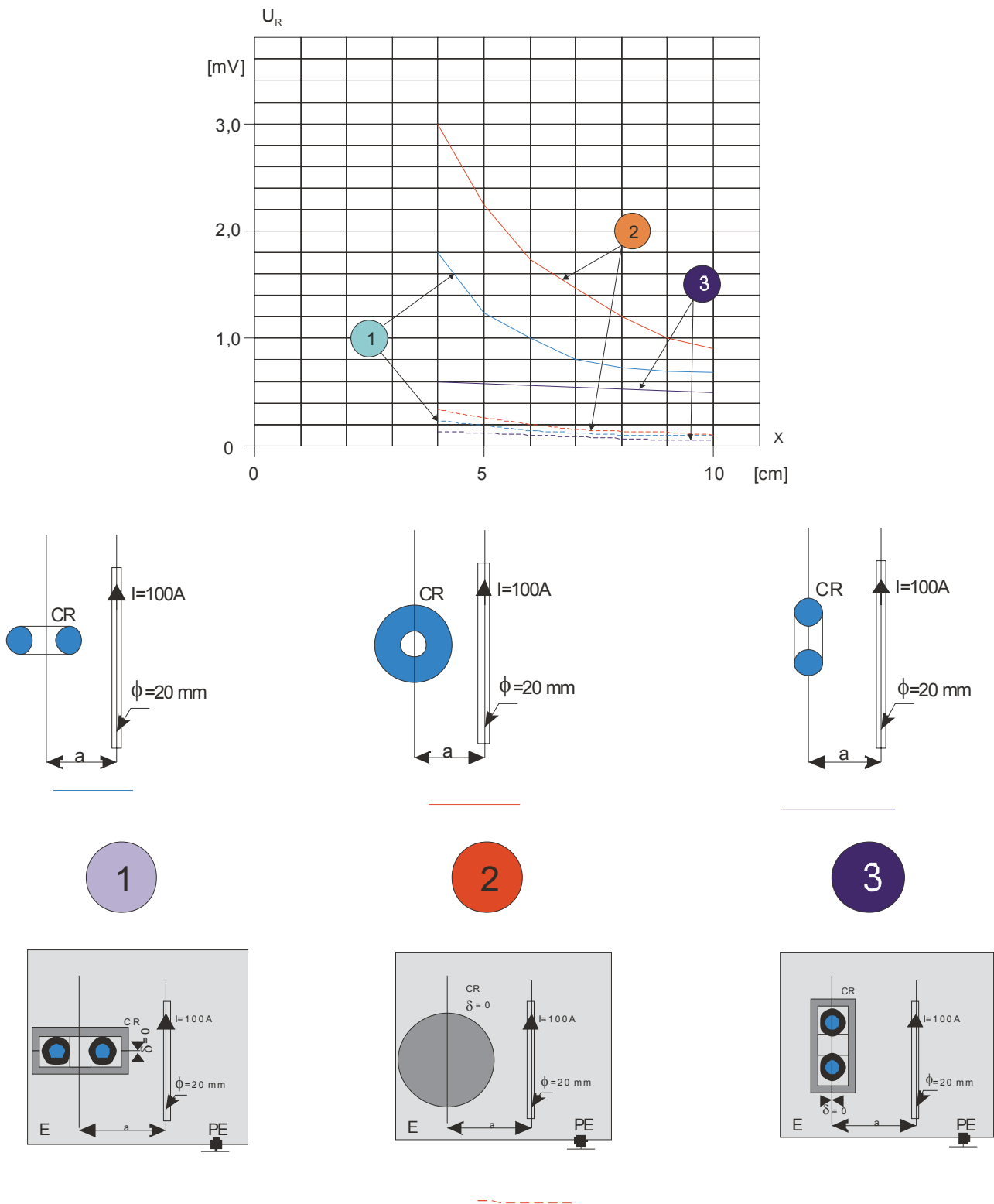
zonej w kubku miedzianym (szczelina  $\delta = 0$  mm) przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Napięcia pasożytnicze indukowane w:  
 a) samej cewce Rogowskiego (linia ciągła) dla różnej konfiguracji „cewka – przewód z prądem” (1, 2, 3),  
 b) cewce Rogowskiego umieszczonej w kubku miedzianym (szczelina  $\delta = 0$  mm) (linia przerywana)  
 (opracowanie własne)

Wprowadzenie szczeliny  $\delta = 1$  mm sprawia, że ekran miedziany przestaje działać, a przetwornik zachowuje się jak sama cewka Rogowskiego.

Na rys. 7. przedstawiono napięcia pasożytnicze indukowane w samej cewce (wersja A) i napięcia indukowane w cewce umieszczonej w kubku żelaznym (szczelina  $\delta = 0$  mm).

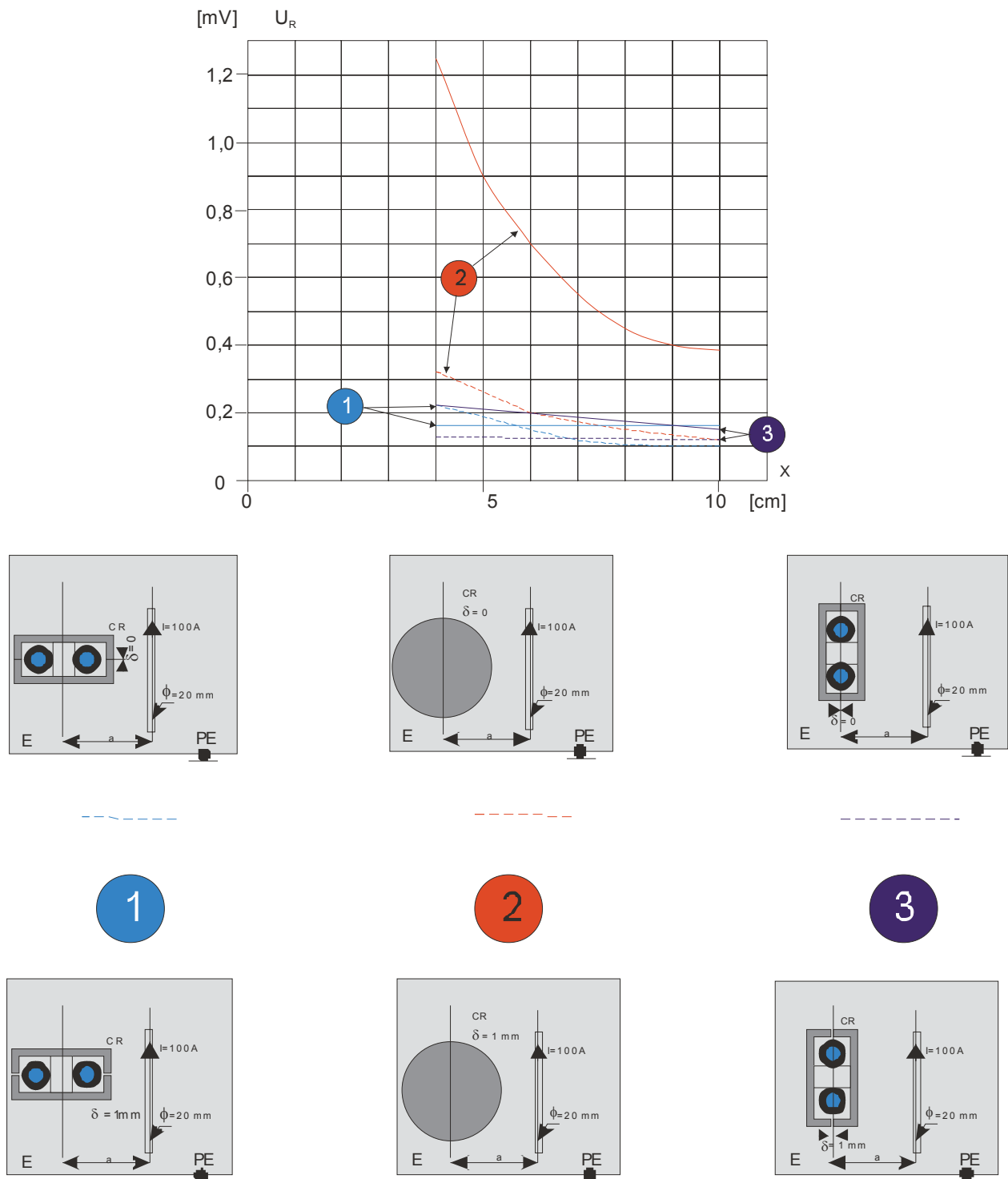


Rys. 7. Napięcia pasożytnicze indukowane w:  
 a) samej cewce Rogowskiego (linia ciągła) dla różnej konfiguracji „cewka – przewód z prądem” (1, 2, 3),  
 b) cewce Rogowskiego umieszczonej w kubku żelaznym (szczelina  $\delta = 0$  mm) (linia przerywana)  
 (opracowanie własne)



Z kolei napięcia pasożytnicze indukowane w samej cewce (wersja A) i napięcia indukowane w cewce

umieszczonej w kubku żelaznym przy różnej wartości szczeliny ( $\delta = 0$  i  $1$  mm) przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8. Napięcia pasożytnicze indukowane w cewce Rogowskiego umieszczonej w kubku żelaznym dla różnej konfiguracji „cewka – przewód z prądem” (1, 2, 3);  
 a) dla szczeliny  $\delta = 1$  mm (linia ciągła),  
 b) dla szczeliny  $\delta = 0$  mm (linia przerywana) (opracowanie własne)

## 6. PODSUMOWANIE

---

Stosowanie cewek Rogowskiego w sąsiedztwie znacznej liczby torów prądowych wymaga wyposażenia ich w odpowiednio dobrane układy ekranujące.

Niezależnie od faktu istnienia ekranów cewkę Rogowskiego należy obligatoryjnie wyposażać w uzwojenie kompensujące.

Wyposażenie cewki Rogowskiego w mosiężny ekran o litej konstrukcji nieznacznie zmniejsza wartości napięć pasożytniczych generowanych w sygnale użytecznym cewki przez sąsiednie tory prądowe.

Dobór odpowiedniego ekranu cewki determinowany jest konfiguracją torów prądowych w jej bezpośrednim sąsiedztwie.

Przy torach prądowych leżących w płaszczyźnie cewki największą skuteczność ekranowania (ok. 10-krotne zmniejszenie sygnału pasożytniczego) zapewnia ekran wewnętrzny typu „gwiazda”, jak i lity ekran żelazny.

Zastosowanie dodatkowego ekranu aluminiowego połączonego z przewodem ochronnym PE zmniejsza

wartości napięć pasożytniczych w granicach od 1,5 do 3 razy.

### Literatura

1. 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.
2. Szkółka S.: *Cewka Rogowskiego w układzie pomiarowym mocy czynnej w obwodach nieliniowych*. „Przeгляд Elektrotechniczny”, 2011, nr 9a, s. 353 -355.
3. Szkółka S.: *Mechanizm indukowania się napięć pasożytniczych w cewkach Rogowskiego*. „Przeгляд Elektrotechniczny”, 2012, nr 10a, s. 59-63.
4. Szkółka S., Wiśniewski G.: *Cewka Rogowskiego o zwiększonej odporności na wpływ zewnętrznych strumieni magnetycznych*. „Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa”, 2012, nr 12 (502), s. 25-35.
5. Szkółka S., Wiśniewski G.: *Cewka Rogowskiego w środowisku przebiegów odkształconych – przykładowe zastosowania*. „Przeгляд Elektrotechniczny”, 2009, nr 4, s. 122-126.
6. Szkółka S., Wiśniewski G.: *Cewka Rogowskiego w środowisku przebiegów odkształconych – przykładowe zastosowania*. „Przeгляд Elektrotechniczny”, 2009, nr 4, s. 122-126.

Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów.