

mgr inż. JERZY CHUDORLIŃSKI
mgr inż. PAWEŁ MICHALSKI
mgr inż. ALEKSANDER LISOWIEC
Instytut Tele- i Radiotechniczny
Centrum Teleinformatyki i Elektroniki CA

Kompatybilność elektromagnetyczna sterowników polowych z iskrobezpiecznymi obwodami pomiarowymi

W artykule przedstawiono wymagania kompatybilności elektromagnetycznej EMC dotyczące odporności dla urządzeń elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej EAZ z obwodami iskrobezpiecznymi. Podano najważniejsze normy oraz zalecenia regulujące konstruowanie urządzeń elektronicznych dla automatyki przemysłowej.

słowa kluczowe: kompatybilność elektromagnetyczna, iskrobezpieczeństwo, urządzenia automatyki zabezpieczeniowej.

1. WSTĘP

Sterowniki polowe z iskrobezpiecznymi obwodami pomiarowymi są ważnymi elementami wyposażenia rozdzielnic ognioszczelnych stosowanych w górnictwie dołowym. Sterowniki te są integralną częścią elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej EAZ, dlatego też do nich odnoszą się wszystkie przepisy normatywne dotyczące tych urządzeń. Ze względu na gabaryty obudowy ognioszczelnej sterownik polowy umieszczany jest w pobliżu stycznika lub wyłącznika, gdzie występują wysokie, często ponadnormatywne, poziomy zaburzeń elektromagnetycznych [1]. Ze względu na występujące tam procesy łączeniowe dużych wartości prądów spełnienie wymagań kompatybilności elektromagnetycznej dotyczącej odporności jest szczególnie trudne. Innym problemem jest spełnienie wymagań iskrobezpieczeństwa wychodzących na zewnątrz iskrobezpiecznych obwodów kontrolnych i sterowniczych. Obwody te są przewodzone dziesiątki, a nawet setki metrów i podlegają zaburzeniom elektromagnetycznym powstającym w trakcie procesów łączeniowych, rozchodzących się wzdłuż przewodów elektroenergetycznych. Aby spełnić swoją rolę, iskrobezpieczne obwody pomiarowe muszą posiadać odpowiednio dużą odporność na te zaburzenia. W tych obwodach coraz częściej stosuje się układy

mikroprocesorowe, które po obróbce sygnałów pomiarowych transmitują je w formie cyfrowej do części nieiskrobezpiecznej. Blokowanie zaburzeń elektromagnetycznych poprzez zastosowanie filtrów LC w tych obwodach jest mocno ograniczone ze względu na wymagania iskrobezpieczeństwa.

W artykule przedstawiono problemy związane z kompatybilnością elektromagnetyczną dotyczącą sterowników polowych, przykładowe rozwiązania techniczne iskrobezpiecznych obwodów pomiarowych zaimplementowanych do sterowników polowych pozwalające spełnić wymagania kompatybilności elektromagnetycznej, jak również wyniki badań laboratoryjnych.

2. ŹRÓDŁA ZABURZEŃ EMC DLA URZĄDZEŃ EAZ PRACUJĄCYCH W WARUNKACH KOPALNIANYCH

Kompatybilność elektromagnetyczna urządzeń elektrycznych lub elektronicznych wymaga od nich poprawnej pracy w określonym środowisku elektromagnetycznym przez osiągnięcie odpowiedniego poziomu odporności oraz ograniczenie emisji zaburzeń, które mogą zakłócić inne pracujące urządzenia [2]. Zarówno poziomy emisji zaburzeń, jak i odporność na

zaburzenia zostały określone w normie PN-EN 60255-26:2014 [5]. Urządzenia EAZ są wyposażone w wejścia iskrobezpieczne i nieiskrobezpieczne: pomiarowe i dwustanowe oraz zasilające, wyjścia przekaźnikowe i obwody transmisji, które nazywane są portami. Szczególną rolę odgrywa obudowa, zwykle metalowa, z zaciskiem uziemiającym zwanym portem obudowy. Emisja zaburzeń dokonuje się poprzez obudowę i poprzez port zasilający. Odporność na zaburzenia dotyczy wszystkich portów dostępnych w urządzeniu, łącznie z obudową i przewodem uziemiającym.

Urządzenia elektryczne podczas normalnej lub zakłóconej pracy są źródłami zaburzeń elektromagnetycznych. Powinno się dążyć do zminimalizowania zaburzeń emitowanych przez źródła, aby nie przekraczać poziomu dopuszczonego dla innych urządzeń. W warunkach kopalnianych zakłócenia wynikające ze zjawisk naturalnych, np. wyładowań występujących podczas burz, są mocno ograniczone, jednak występują zjawiska związane z:

- procesami łączeniowymi (łączeniem obwodów prądowych oraz załączaniem napięcia na szyny zbiorcze),

- rozptyłami prądów ziemnozwarciowych o częstotliwości sieciowej,
- sprzężeniami indukcyjnymi, pojemnościowymi i indukcyjnymi wynikającymi z wzajemnego oddziaływania instalacji,
- propagacją fal w liniach i przewodach połączeniowych,
- promieniowaniem elektromagnetycznym oddziaływującym poprzez obudowę i przewód uziemiający.

Wnikanie zaburzeń elektromagnetycznych do urządzeń EAZ odbywa się wieloma kanałami, np. poprzez sprzężenia:

- polowe poprzez obudowę (niskoczęstotliwościowe pola elektryczne i magnetyczne),
- pojemnościowe (oddziaływanie pojemnościowe pomiędzy elementami i przewodami),
- indukcyjne,
- związane z przewodzeniem.

Zbiór obowiązujących norm dotyczących odporności urządzeń EAZ został przedstawiony w tabelicy 1.

Tablica 1.

Zbiór obowiązujących norm dotyczących odporności na zaburzenia dla urządzeń EAZ

Rodzaj zaburzenia	Obudowa	Przewód uziemiający	Wejście zasilania pomocniczego	Łączna komunikacyjne	Wejścia i wyjścia (w tym tory pomiarowe)
Promieniowane pole elektromagnetyczne o częstotliwości radiowej PN-EN 61000-4-3	X	X			
Wyładowania elektrostatyczne PN-EN 61000-4-2	X				
Pole magnetyczne o częstotliwości sieciowej PN-EN 61000-4-8	X				
Zaburzenia przewodzone indukowane przez pola o częstotliwości radiowej PN-EN 61000-4-6		X	X	X	X
Szybkoszmiennie zaburzenia przejściowe PN-EN 61000-4-4			X	X	X
Przebieg oscylacyjny 1MHz PN-EN 61000-4-12			X	X	X
Udar PN-EN 61000-4-5			X	X	X
Przerwa w zasilaniu napięciem AC i DC PN-EN 61000-4-11 PN-EN 61000-4-29			X		
Zaburzenia o częstotliwości sieciowej (dotyczą tylko wejść dwustanowych) PN-EN 61000-4-16					X

3. KOMPATYBILNOŚĆ ELEKTROMAGNETYCZNA OBWODÓW ISKROBEZPIECZNYCH

Chociaż obwody iskrobezpieczne zgodnie z wymaganiami dyrektywy ATEX nie mogą stwarzać zagrożenia wybuchem, to jednak wszystkie badania kompatybilności elektromagnetycznej należy przeprowa-

dzić dla nich tak, jak dla innych obwodów nieiskrobezpiecznych. Osiągnięcie wymaganej odporności na zakłócenia w tym przypadku jest bardzo trudne, gdyż ze względów iskrobezpieczeństwa stosowanie kondensatorów blokujących lub szeregowych indukcyjności w formie przeciwzakłóceńowych ferrytów na kable ogranicza się do zaledwie pojedynczych mikrohenrów. W przypadku zastosowania mikroproce-

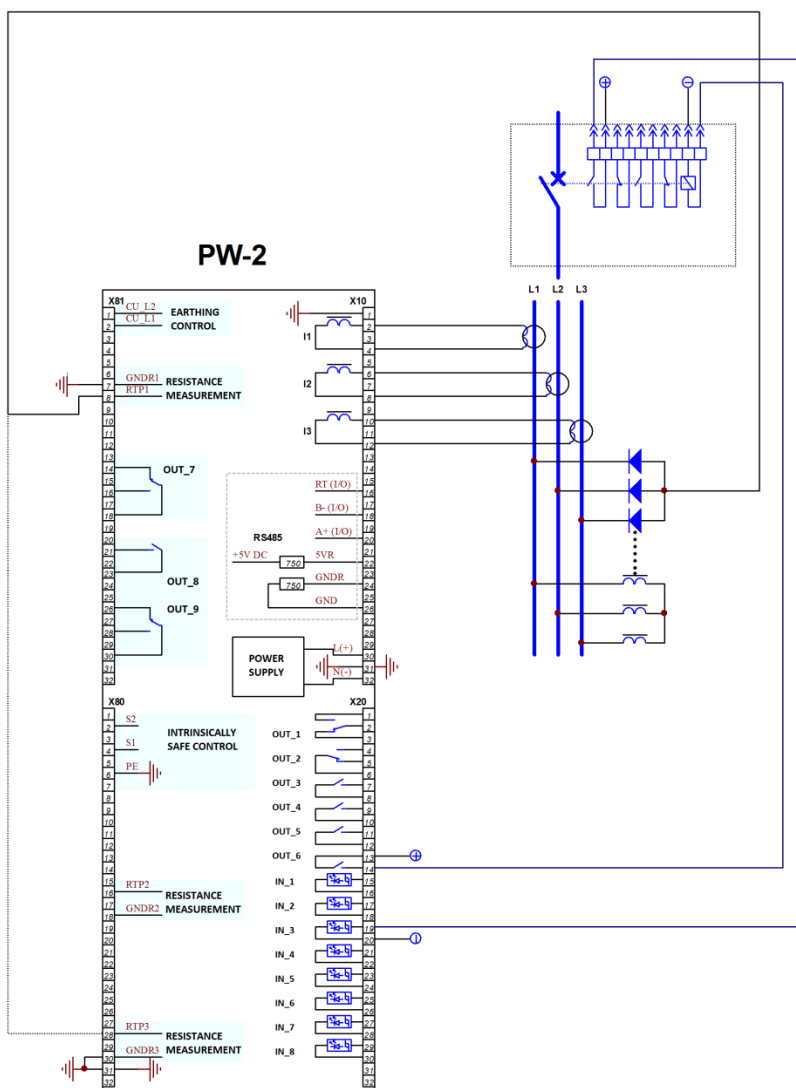
sorowych obwodów pomiarowych ważne jest odpowiednie rozproszanie masy układu procesorowego, stosowanie szybkich diodowych ograniczników napięcia i wtrącania rezystancji szeregowych, tworzących razem z wtrąconymi pojemnościami przeciwwzłóceniami filtry RC. Na rys. 1. przedstawiono schemat przyłączeniowy sterownika polowego PW2 z umiejscowionymi po lewej stronie iskrobezpiecz-

nyimi obwodami pomiarowymi rezystancji i sterowania iskrobezpiecznego oraz obwody wyjść przekaźnikowych. Dla obwodów iskrobezpiecznych i nieiskrobezpiecznych wykonano narażenia sygnałami zakłócającymi o takich samych wartościach. W tabelicy 2. przedstawiono poziomy narażeń dla poszczególnych wejść i wyjść.

Tablica 2.

Poziomy narażeń elektromagnetycznych dla poszczególnych wejść i wyjść urządzeń EAZ z obwodami iskro- i nieiskrobezpiecznymi

Rodzaj portu	Rodzaj narażenia	Poziomy narażenia
Wejścia i wyjścia iskrobezpieczne	BURST SURGE Radiowe przewodzone 150 kHz – 80 MHz F tłumione 1MHz	4 kV 2 kV 10 V RMS 1 kV/2,5 kV do PE
Wejścia dwustanowe i pomiarowe oraz wyjścia nieiskrobezpieczne	BURST SURGE Radiowe przewodzone 150 kHz – 80 MHz F tłumione 1MHz	4 kV 2 kV 10 V RMS 1 kV/2,5 kV do PE



Rys. 1. Schemat przyłączeniowy przykładowego sterownika polowego PW2 realizującego funkcje pomiarowe i zabezpieczeniowe

4. ANALIZA WZBUDZENIA PRZETWORNIKÓW PRĄDOWO-NAPIĘCIOWYCH W STANACH NIEUSTALONYCH

Elementami mogącymi gromadzić energię pochodzącą z pola elektromagnetycznego wywołanego przepływem prądu są stosowane również w górnictwie bezrdzeniowe przetworniki prądowe pracujące na zasadzie cewki Rogowskiego. Przetworniki te można opisać elektrycznym układem zastępczym mającym charakter szeregowego obwodu rezonansowego o rezystancji R , indukcyjności L i pojemności C [3, 6, 6]. Wartość pojemności C wyznacza się na podstawie odpowiedzi przetwornika na skok jednostkowy prądu w obwodzie pierwotnym [7]. Typowa wartość pojemności C dla przetwornika wykonanego w technologii obwodów drukowanych wynosi 100 pF.

W stanach ustalonych, przy sinusoidalnym prądzie o amplitudzie A płynącym w obwodzie pierwotnym, maksymalne napięcie wyjściowe przetwornika jest równe $A \cdot S$, gdzie S jest współczynnikiem przetwarzania, zasadniczo równym 1 mV/A dla częstotliwości 50 Hz. Dla prądów spotykanych w instalacjach kopalnianych napięcie wyjściowe przetwornika nie przekracza wartości kilkudziesięciu woltów, a energia zgromadzona w pojemności C jest mniejsza niż 1 μ J. Zupełnie inny charakter ma napięcie wyjściowe przetwornika w stanach nieustalonych, gdzie widmo sygnału prądowego jest bardzo szerokie, co jest spowodowane operacją różniczkowania, jaką przetwornik przeprowadza na mierzonym prądzie.

Stany nieustalone w kopalnianej sieci energetycznej wywołane są przez szereg czynników, takich jak procesy przełączeniowe, zwarcia oraz propagujące się

z powierzchni do głębi kopalni zakłócenia typu SURGE. Prądy w stanach nieustalonych charakteryzują się często dużą amplitudą oraz szybkim czasem narastania lub spadku. Zakładając kształt prądów fazowych w stanach nieustalonych, można w sposób analityczny bądź numeryczny wyznaczyć napięcie wyjściowe przetwornika. Rozpatrzono dwa przypadki: załączenie obwodu w zerze napięcia oraz załączenie obwodu w maksimum napięcia. Drugi przypadek odpowiada również sytuacji zwarcia w obwodzie. Obliczenia przeprowadzono dla przetwornika bezrdzeniowego wykonanego w technologii PCB, opracowanego w ramach projektu. Parametry elektrycznego układu zastępczego tego przetwornika są bardzo zbliżone do parametrów elektrycznego układu zastępczego przetworników bezrdzeniowych oferowanych komercyjnie [4]. Napięcie $u(t)$ na wyjściu przetwornika wyznaczone było z odwrotnej transformaty Laplace'a:

$$u(t) = \text{Lap}^{-1}(T(s) \cdot I(s)), \quad (1)$$

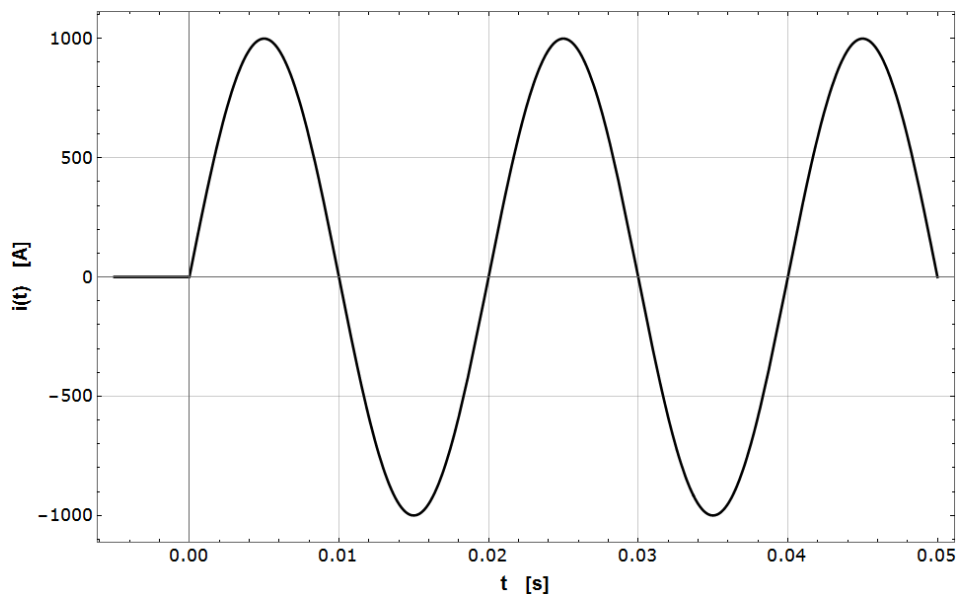
gdzie $T(s)$ jest transformatą Laplace'a transmitancji napięciowo-prądowej przetwornika

$$T(s) = \frac{M \cdot s}{1 + s \cdot C(R + s \cdot L)}, \quad (2)$$

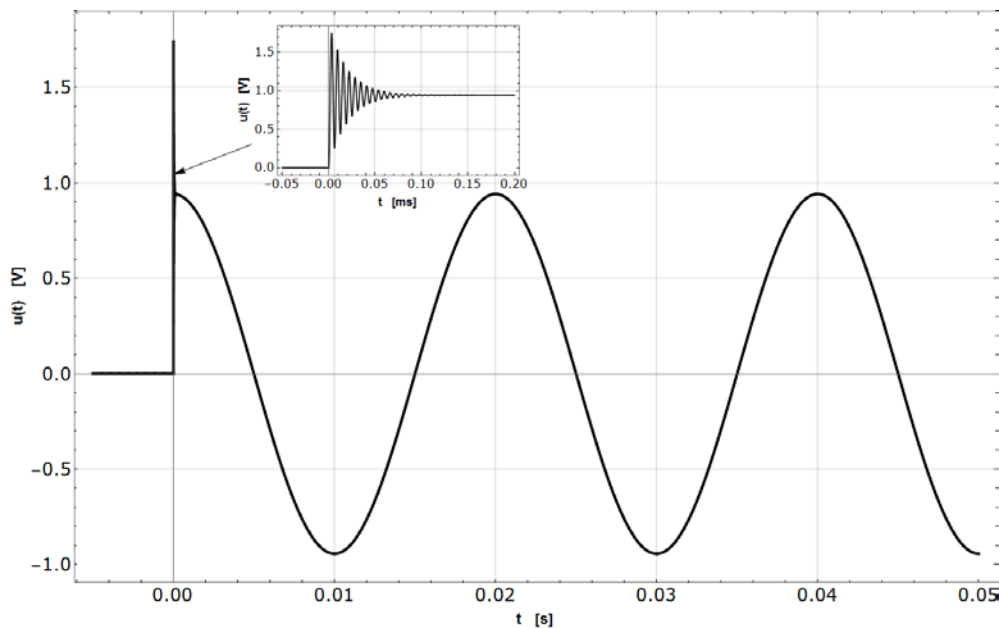
a $I(s)$ – transformatą Laplace'a funkcji prądu w obwodzie pierwotnym.

Załączenie obwodu w zerze napięcia

Prąd mierzony ma kształt narastającej od zera sinusoidy (rys. 2).



Rys. 2. Kształt mierzonego prądu w przypadku załączenia obwodu w zerze napięcia

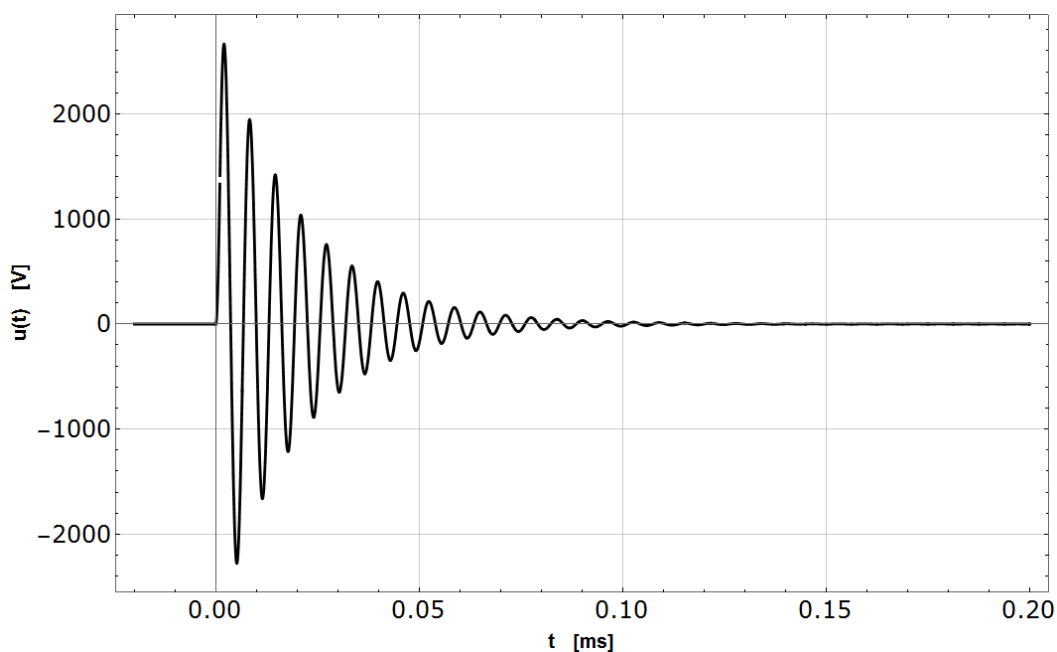


Rys. 3. Napięcie na wyjściu przetwornika w przypadku załączenia obwodu w zerze napięcia

Napięcie wyjściowe przetwornika ma kształt cosinoidy poprzedzonej gasnącymi oscylacjami (rys. 3). Maksymalne napięcie na wyjściu przetwornika jest w początkowym momencie dwa razy większe od napięcia szczytowego w stanie ustalonym. Tak jak dla stanów ustalonych, energia zgromadzona w pojemności C jest nie większa niż $1 \mu\text{J}$.

Załączenie (zwarcie) obwodu w maksimum napięcia

W tym przypadku początkowy kształt mierzonego prądu ma charakter skoku jednostkowego o niezerowym czasie narastania, przy czym czas ten zależy od odległości zwarcia od miejsca pomiaru oraz parametrów elektrycznych linii kablowych. Na rys. 4. przedstawiono napięcie początkowe na wyjściu przetwornika odpowiednio w przypadku, gdy czas narastania prądu był równy $1 \mu\text{s}$, a jego amplituda – ok. 700 A .



Rys. 4. Napięcie na wyjściu przetwornika w przypadku, gdy czas narastania skoku prądowego jest równy $1 \mu\text{s}$

Napięcie na wyjściu przetwornika w przypadku pobudzenia skokiem prądowym ma charakter oscylacyjny tłumiony, przy czym amplituda oscylacji osiąga wartość ok. 2750 V dla czasów narastania skoku prądowego 1 μ s i amplitudzie 700 A. W warunkach rzeczywistych czas narastania prądu w obwodzie jest zdecydowanie dłuższy i oscylacje tłumione mają zdecydowanie niższą amplitudę.

5. PODSUMOWANIE

Wymagania kompatybilności elektromagnetycznej odnoszą się zarówno do obwodów iskrobezpiecznych, jak i nieiskrobezpiecznych współpracujących z urządzeniami zabezpieczeniowymi EAZ. Dlatego też dla zapewnienia długotrwałej niezawodnej pracy tych urządzeń należy podczas badań poddawać ich obwody, tak iskrobezpieczne, jak i nieiskrobezpieczne, tym samym poziomom zakłócających pól elektromagnetycznych. Jak pokazały przeprowadzone przykładowe analizy numeryczne podczas załączania zasilania w kablu elektroenergetycznym, na zaciskach przetworników prądowych mogą pojawić się oscylacje tłumione. Blokowanie zakłóceń w części iskrobezpiecznej jest utrudnione ze względu na potrzebę spełnienia wymagań iskrobezpieczeństwa. Wielkość tych zaburzeń musi być kontrolowana, tak aby nie przekraczały dopuszczalnych przez obowiąz-

ujące normy poziomów. Poziomy tych emisji mają bezpośredni związek z czystością środowiska elektromagnetycznego pracy innych urządzeń elektronicznych. Dlatego, aby zmniejszyć poziom emisji tych zaburzeń z urządzenia oraz zwiększyć jego odporność na zaburzenia z zewnątrz, należy projektować i montować urządzenia zgodnie z przytaczanymi zasadami. Obudowa urządzenia powinna być uziemiona jak najkrótszym przewodem, najlepiej w formie plecionki, do instalacji masy.

Literatura

1. Charoy A.: *Zakłócenia w urządzeniach elektronicznych (Disturbances in electronic devices)*, cz. 1-4, WNT, Warszawa 2000.
2. Koszmider A.: *Department of Electrical Engineering and Instrument Transformers*, Lodz University of Technology, Kompatybilność Elektromagnetyczna EMC (Electromagnetic compatibility EMC) [online], dostępny w Internecie: matel.p.lodz.pl/wee/k23/wyklad/w.13-masa.doc.
3. Lisowiec A.: *Parametry cewek Rogowskiego jako czujników prądu w urządzeniach EAZ (Parameters of Rogowski coils used as current sensors in power protection devices)*. „Wiadomości Elektrotechniczne”, 2007, nr 2.
4. Lisowiec A.: *Metoda pomiaru parametrów cewki Rogowskiego (Method for measuring Rogowski coil parameters)*. „Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa”, 2013, nr 12(514), s. 33-37.
5. PN-EN 60255-26:2010. *Measuring Relays and Protection Equipment – Part 26: Electromagnetic Compatibility Requirements*.
6. Tumański S.: *Induction coil sensors – a review*. „Measurement Science and Technology”, 2007, No. 18(3), R31-R46.
7. Ward D.A., Exon J.L.T.: *Using Rogowski coils for transient current measurements*. „Engineering Science and Education Journal”, June 1993, pp. 105-113.

Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów.