

doi:10.15199/48.2019.12.22

Właściwości magnetyczne rdzeni przekładników sumujących wyłączników różnicowoprądowych

Streszczenie. Głównym zadaniem transformatora sumującego w wyłącznikach różnicowoprądowych o działaniu niezależnym od napięcia sieci jest dostarczenie z obwodu pierwotnego odpowiedniej mocy do zadziałania wyzwalacza różnicowego zasilanego z obwodu wtórnego. W artykule przedstawiono wpływ właściwości magnetycznych rdzenia przekładnika sumującego na wymaganą liczbę uzwojeń pierwotnych i wtórnych oraz na konstrukcję obwodu wtórnego zasilającego wyzwalacz elektromechaniczny.

Abstract. The main task of the additive transformer in residual current circuit breakers working independently of the mains voltage is to supply from the primary circuit an appropriate power for triggering a differential trigger supplied from the secondary circuit. The article presents the influence of the magnetic properties of the additive transformer core on the required number of primary and secondary windings as well as the design of the secondary circuit supplying the electromechanical release. (**Magnetic properties of additive transformer cores of residual current devices**)

Słowa kluczowe: przekładnik sumujący, wyłącznik różnicowoprądowy, ochrona uzupełniająca
Keywords: additive transformer, residual current protective device, subsidiary protection

Wstęp

Zasady bezpieczeństwa wynikające z obowiązujących przepisów i norm, optymalizują proces projektowania i budowy instalacji elektrycznych ograniczając do minimum ryzyko wystąpienia porażenia w trakcie ich eksploatacji. Podstawowa zasada ochrony przeciwporażeniowej określa, że części czynne niebezpieczne nie powinny być dostępne a części przewodzące nie powinny być niebezpieczne w warunkach normalnej eksploatacji oraz w przypadku pojedynczego uszkodzenia [1].

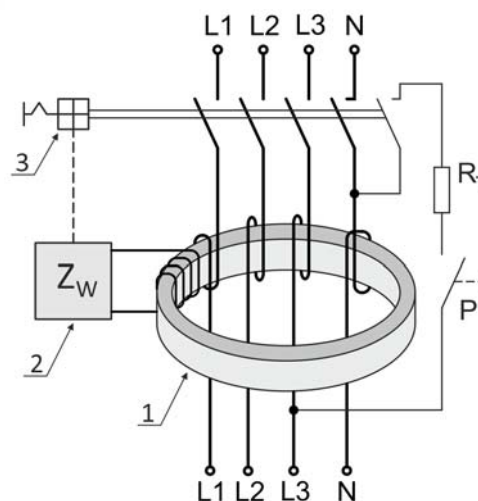
W instalacjach elektrycznych niskiego napięcia, ochrona przed porażeniem prądem elektrycznym powinna składać się z odpowiednio dobranego środka ochrony podstawowej i niezależnego środka ochrony przy uszkodzeniu lub wzmocnionego środka ochrony, który zapewnia zarówno ochronę podstawową jak i ochronę przy uszkodzeniu [2]. W warunkach specjalnych, wynikających z przeznaczenia pomieszczenia lub wpływów zewnętrznych, norma [2] nakazuje zastosowanie dodatkowo środków ochrony uzupełniającej.

Najczęściej stosowanym środkiem ochrony uzupełniającej w instalacjach elektrycznych niskiego napięcia są wyłączniki różnicowoprądowe (RCD) o znamionowym prądzie różnicowym $I_{\Delta n} \leq 30$ mA [1, 2]. Dostępne ogólnie wyłączniki RCD, konstrukcyjnie przeznaczone są do wykrywania prądów różnicowych o przebiegu sinusoidalnym i częstotliwości 50 Hz. Powszechne stosowanie w instalacjach niskiego napięcia: nowoczesnych źródeł światła, zasilaczy UPS, przemienników częstotliwości, itp., wywołuje przepływ prądów odkształconych od kształtu sinusoidalnego o złożonych widmach częstotliwościowych. W takich obwodach, wyłączniki RCD mogą nie reagować nawet na znaczne przekroczenie wartości znamionowego różnicowego prądu zadziałania [3, 4, 5, 6]. Celem niniejszego artykułu jest analiza wpływu właściwości magnetycznych rdzeni przekładników sumujących na wymaganą liczbę uzwojeń pierwotnych i wtórnych oraz na konstrukcję wtórnego obwodu zasilającego wyzwalacz elektromagnetyczny.

Budowa wyłączników różnicowoprądowych

Produkowane obecnie seryjnie wyłączniki RCD, w zdecydowanej większości są wyłącznikami o działaniu niezależnym od napięcia instalacji. W tego typu

wyłącznikach (rys. 1), obwód wtórny sumującego przekładnika prądowego (1), bezpośrednio zasilają elektromagnetyczny wyzwalacz o odpadającej zworze (2), który mechanicznie rozłącza styki główne (3). W obwodzie wtórnym sumującego przekładnika prądowego, który wykrywa prąd upływowy chronionego obwodu instalacji elektrycznej, zamontowane mogą być dodatkowe elementy elektroniczne. Elementy te zapewniają zwłokę czasową zadziałania wyłącznika lub eliminują zbędne wyłączenia w przypadku przejściowych impulsów prądowych.



Rys. 1. Konstrukcja wyłącznika RCD o działaniu niezależnym od napięcia instalacji; 1 – przekładnik prądowy sumujący, 2 – obwód elektromagnetyczny wyzwalacza o odpadającej zworze, 3 – mechanizm zatraskowy styków, P – przycisk testowy, R_T – rezystor testowy

Głównym elementem, decydującym o właściwościach wyłącznika RCD jest sumujący przekładnik prądowy. Przekładnik ten, oprócz detekcji prądu różnicowego musi również dostarczyć odpowiednią wartość energii do wyzwalacza elektromagnetycznego aby nastąpiło rozłączenie styków. W opisywanym przypadku, gdy moc pobierana przez wyzwalacz pochodzi bezpośrednio z przekładnika sumującego, istotną rolę odgrywa dopasowanie impedancyjne odbiornika (wyzwalacza) do źródła (przekładnika) [3].

O wartości sygnału w obwodzie wtórnym przekładnika sumującego decyduje indukcja magnetyczna w jego rdzeniu, jaką wywołuje pierwotny prąd różnicowy. W przypadku wyłączników RCD o $I_{\Delta n} \leq 30$ mA, moc uzyskiwana w obwodzie wtórnym przekładnika jest bardzo mała, rzędu ułamka miliwoltampera [3].

Analiza budowy wewnętrznej wyłącznika RCD

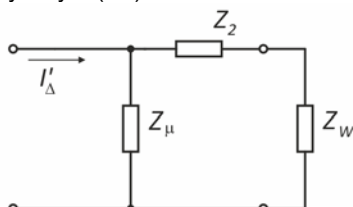
Wyłącznik RCD, aby zapewniał prawidłowe wyłączenie, jego przekładnik sumujący wraz z obwodem wtórnym muszą spełniać dwa zasadnicze warunki:

- elektromagnetyczny wyzwalacz powinien rozłączać styki główne przy przepływie pierwotnego prądu różnicowego w zakresie $(0,5 \div 1) \cdot I_{\Delta n}$ wyłącznika [7], oraz
- napięcie uchybu pojawiające się przy przepływie maksymalnego długotrwałego prądu obciążenia wyłącznika, nie powinno powodować zbędnych wyłączeń.

W przypadku wyłączników RCD mających zapewnić ochronę uzupełniającą w obwodach niskiego napięcia [2], zakres poprawnego wyzwalania wynosi od 15 do 30 mA pierwotnego prądu różnicowego. Dobierając przekładnik sumujący oraz konstrukcję obwodu wtórnego w tego typu wyłącznikach RCD uwzględnia się dwie zależności:

- przekładnik sumujący powinien charakteryzować się maksymalnie dużą impedancją gałęzi magnesowania, określoną przez indukcyjność L_{μ} oraz rezystancję R_{Fe} schematu zastępczego przekładnika [8] albo
- dopasowanie impedancyjne obciążenia wtórnego przekładnika sumującego do impedancji gałęzi magnesowania przekładnika powinno zapewnić wydzielenie maksymalnej mocy na obciążeniu.

W produkowanych obecnie wyłącznikach RCD dla zagwarantowania prawidłowego progu wyzwalania, coraz częściej stosowane jest dopasowanie impedancyjne obciążenia do impedancji gałęzi poprzecznej, uzyskując wydzielenie maksymalnej mocy na wyzwalaczu elektromagnetycznym (Z_W).



Rys. 2. Uproszczony schemat zastępczy przekładnika sumującego do wyznaczenia wpływu dopasowania obciążenia

Pomijając Z'_1 (impedancja strony pierwotnej przekładnika) oraz przyjmując, że impedancja obciążenia przekładnika sumującego wynosi:

$$(1) \quad Z_{obc} = Z_2 + Z_W$$

Moc wydzielona na impedancji obciążenia Z_{obc} określona jest zależnością:

$$(2) \quad S = (I'_{\Delta})^2 \frac{Z_{\mu}^2 Z_{obc}}{Z_{\mu}^2 + Z_{obc}^2 + 2Z_{\mu} Z_{obc} \cos \beta}$$

gdzie: β - różnica argumentów impedancji Z_{μ} i Z_{obc} .

Wartość impedancji Z_{obc} , na której wydzielona jest największa moc przy danym prądzie I'_{Δ} , oblicza się przyrównując do zera pochodną mocy S względem impedancji Z_{obc} . Łatwo wykazać, że z powyższego warunku wynika:

$$(3) \quad Z_{obc} = Z_{\mu}$$

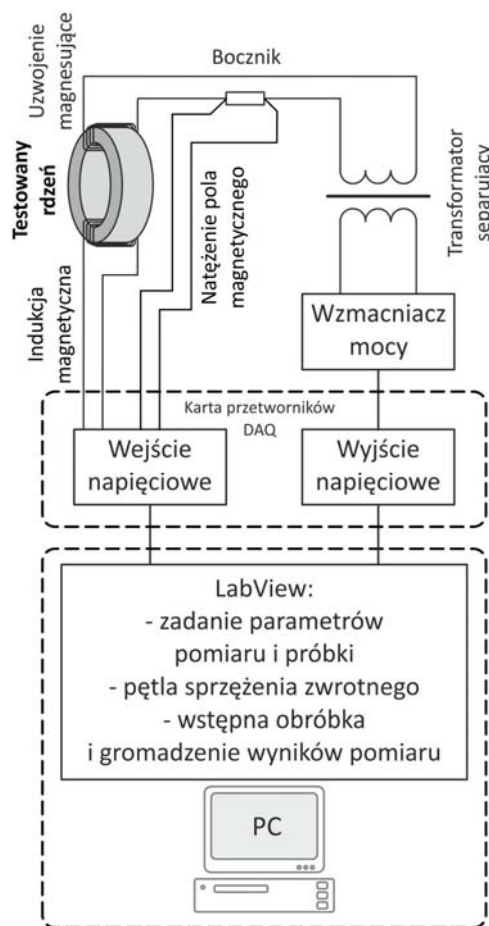
Jeśli warunek (3) jest spełniony, to moc maksymalna wyraża się zależnością:

$$(4) \quad S_{max} = (I'_{\Delta})^2 \frac{Z_{\mu}}{2(1 + \cos \beta)}$$

Z powyższej zależności wynika, że należy dążyć do uzyskania dużej różnicy argumentów impedancji Z_{μ} i Z_{obc} (najkorzystniej 90°). W praktyce różnica ta jest największa, kiedy prąd wtórny I_2 jest w fazie z napięciem indukowanym w uzwojeniu wtórnym ($\varphi(Z_{\mu}) \approx 0^\circ$). Uzyskuje się to włączając w obwodzie wtórnym kondensator szeregowy tak dobrany, aby kompensował reaktancję indukcyjną obwodu wtórnego [3].

Pomiar właściwości rdzeni przekładników sumujących

Pomiary właściwości magnetycznych rdzeni przekładników sumujących zostały przeprowadzone na rdzeniach wyjętych z przetestowanych wcześniej wyłączników RCD. Cewki magnesujące i do pomiaru indukcji magnetycznej nawinięto równomiernie na całym obwodzie rdzenia. Natężenie pola magnetycznego H_m , indukcję magnetyczną B_m i stratność P_S wyznaczono w skomputeryzowanym systemie opartym na platformie programistycznej LabVIEWTM przedstawionym na rys. 3 [9].



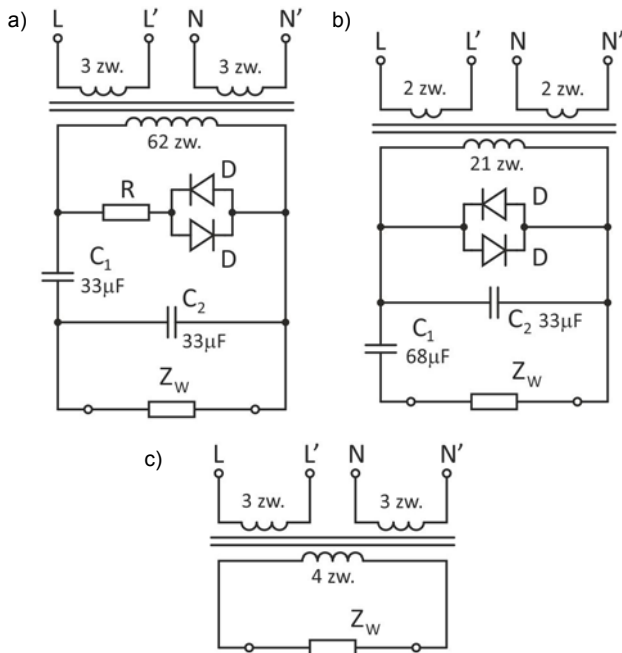
Rys. 3. Schemat układu pomiarowego

Pomiary wykonano przy kontrolowanym sinusoidalnym kształcie indukcji magnetycznej w zakresie indukcji magnetycznej od 0,05 T do 1,0 T i częstotliwości od 50 Hz do 1 kHz - w zależności od materiału wykorzystanego do budowy przekładnika sumującego. Zakresy obu wielkości wybrano w taki sposób, aby możliwe było utrzymanie odchylenia od sinusoidalnego kształtu strumienia magnetycznego z dokładnością lepszą niż 0,5% w całym

zakresie częstotliwości, znacznie poniżej 1% wymaganego przez normę [10, 11]. Odchylenie standardowe w przypadku pomiarów natężenia pola magnetycznego było równe lub mniejsze niż 4% od średniej. W przypadku stratności magnetycznej P_s odchylenie standardowe było równe lub mniejsze niż 1,5% od średniej [10, 11].

Wyniki badań laboratoryjnych

Do badań właściwości magnetycznych wybrano trzy rdzenie spośród kilkanastu rdzeni zdemontowanych z wyłączników RCD typu AC różnych producentów o długotrwałym dopuszczalnym prądzie $I_n = 25$ A oraz znamionowym prądzie różnicowym $I_{\Delta n} = 30$ mA. Są to powszechnie montowane wyłączniki w instalacjach niskiego napięcia w celu zapewnienia przeciwporażeniowej ochrony dodatkowej i uzupełniającej zgodnie z wymogami normy [2]. Na rys. 4 przedstawiono schematy ideowe budowy wewnętrznej, trzech wybranych modeli wyłączników RCD, różnych producentów oznaczonych jak: A, B i C. W wyłącznikach oznaczonych jako A i B, producenci zastosowali dopasowanie indukcyjne poprzez montaż w obwodzie wtórnym przekładnika sumującego kondensatorów C_1 i C_2 . W obwodzie wtórnym zastosowano również antyrównoległe połączone diody eliminujące zbędne ządziałania przy chwilowych, przejściowych prądach różnicowych w uzwojeniu pierwotnym [3].



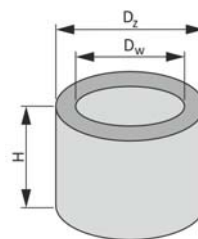
Rys. 4. Schemat budowy wewnętrznej wyłącznika RCD: a) model A, b) model B, c) model C

Wyłącznik oznaczony jako model C (rys. 4 c), charakteryzuje się bezpośrednim połączeniem uzwojenia wtórnego przekładnika sumującego z uzwojeniem wyzwalacza elektromagnetycznego.

Tabela 1. Parametry geometryczne badanych rdzeni

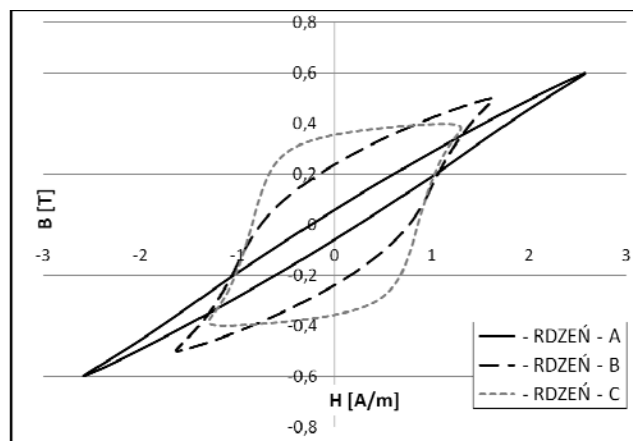
Wymiary rdzenia		RDZEŃ A	RDZEŃ B	RDZEŃ C
Masa	[g]	6,3	17,6	39,7
Wysokość H	[mm]	12,2	20,1	23,3
Średnica zewnętrzna D_z	[mm]	14,8	16,8	24,3
Średnica wewnętrzna D_w	[mm]	11,2	9,8	16,1

W tabeli 1 zestawiono wymiary geometryczne oznaczone na rys. 5 trzech wybranych rdzeni odpowiednio dla wyłączników model: A, B i C.



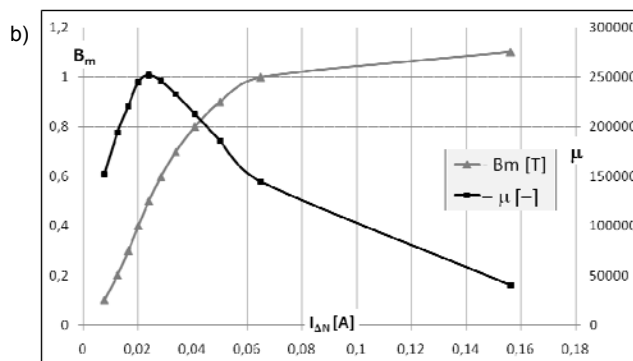
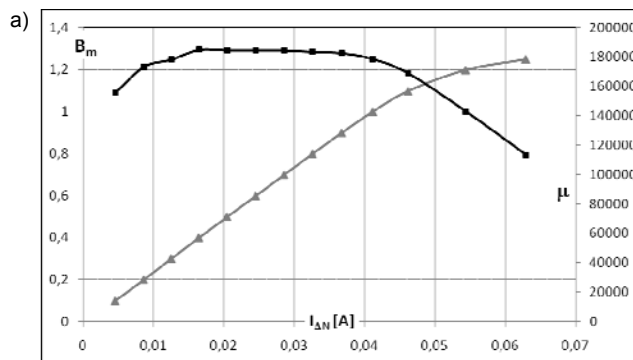
Rys. 5. Oznaczenia wymiarów geometrycznych badanych rdzeni przekładników sumujących przedstawionych w tabeli 1

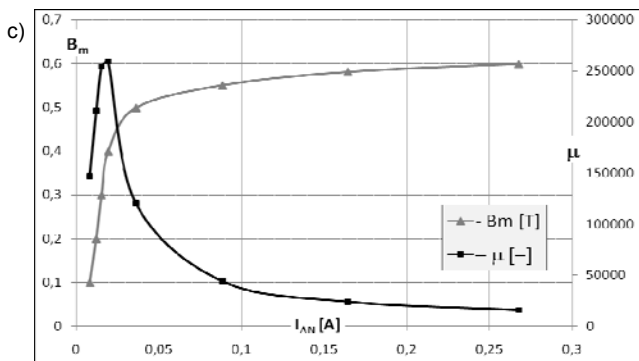
Na rys. 6 przedstawiono wykresy pętli histerezy badanych rdzeni przy magnesowaniu prądem przemiennym 50 Hz.



Rys. 6. Pętle histerezy dla badanych rdzeni wyłączników RCD - model A, B i C

Na rys. 7 zestawiono wykresy indukcji magnesowania B_m oraz przenikalności magnetycznej μ badanych rdzeni w zależności od wartości prądu różnicowego.

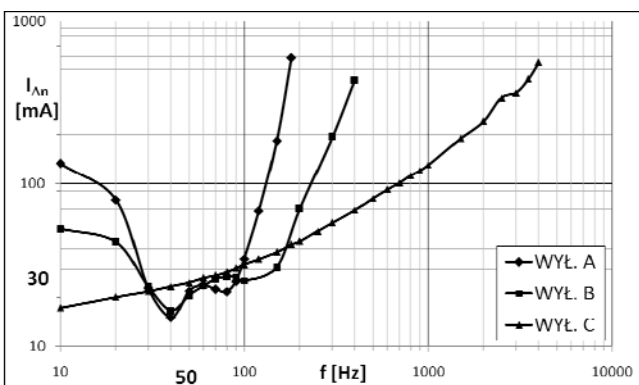




Rys. 7. Zależność indukcji magnetycznej B_m oraz względnej przenikalności magnetycznej μ od wartości prądu różnicowego: a) rdzeń A, b) rdzeń B, c) rdzeń C

Przedstawione na rys. 7 zależności wskazują, że rdzenie zostały wykonane z różnych materiałów magnetycznych i charakteryzują się dużą przenikalnością magnetyczną rzędu 250000. Takie duże przenikalności magnetyczne zapewniają materiały amorficzne i nanokrystaliczne lub stopy żelazo niklowe [12]. Te ostatnie zostały praktycznie wyparte przez materiały amorficzne i nanokrystaliczne głównie ze względu na ich cenę jednostkową. W przypadku rdzenia A (rys. 7 a) zastosowano dodatkowo rdzeń z anizotropią indukowaną zapewniając liniowość krzywej magnesowania [13].

Na rys. 8 przedstawiono charakterystykę częstotliwościową prądu zadziałania $I_{\Delta n}$ zadziałania badanych wyłączników RCD.



Rys. 8. Zależność prądu zadziałania $I_{\Delta n}$ w funkcji częstotliwości dla wyłączników A, B i C [8].

Jak przedstawiono na rys. 8 charakterystyki częstotliwościowe prądu różnicowego dla wyłączników A i B odbiegają od charakterystyki wyłącznika C. Powodem odmienności charakterystyk jest zastosowanie w obwodzie wtórnym wyłączników A i B kondensatorów. Kondensatory te znacznie ograniczają zakres częstotliwości zadziałania wyłączników RCD. Stosowanie kondensatorów jednak pozwala na zgromadzenie energii potrzebnej do uruchomienia elektromagnetycznego wyzwalacza ((2) rys. 1) przy minimalizacji wymiarów rdzenia wyłącznika. Wskazują na to dane zamieszczone w Tabeli 1. Masa rdzenia C stanowi ok. dwukrotność masy rdzenia B i ok. sześciokrotność masy rdzenia A. Tak małe wymiary rdzenia A i B uniemożliwiają zgromadzenie wystarczającej energii do zadziałania wyłączników.

Wnioski

Głównym problemem w przypadku rdzenia przekładnika sumującego do wyłącznika RCD o działaniu niezależnym od napięcia sieci jest pobór z obwodu pierwotnego mocy wystarczająco dużej do zadziałania wyzwalacza różnicowego zasilanego z obwodu wtórnego.

W wyłącznikach RCD, rdzeń przekładnika sumującego musi być wykonany z materiału o bardzo dużej przenikalności magnetycznej w celu uzyskania odpowiednio dużego napięcia po stronie wtórnej przy określonej liczbie zwojów i przy możliwie małej stratności. Powyższe wymagania spełniają rdzenie wykonane z odpowiednich stopów żelazo niklowych, amorficznych lub nanokrystalicznych.

Zastosowanie układu dopasowania indukcyjnego (wył. A i B) umożliwia wykonanie rdzenia przekładnika sumującego z materiałów amorficznych lub nanokrystalicznych, zmniejszenie wymiarów geometrycznych rdzenia i miniaturyzację wyłącznika RCD oraz ograniczenie kosztów. Jednak takie rozwiązanie wpływa na ograniczenie zakresu częstotliwościowego prądu różnicowego (rys. 8), dla którego wyłącznik RCD zapewnia wyłączenie chronionego obwodu jak również wymagany poziom ochrony przeciwporażeniowej.

Autorzy:

dr. inż. Paweł Czaja, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: czajap@el.pcz.czest.pl;

dr. hab. inż. Wojciech Pluta, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: plutaw@el.pcz.czest.pl

LITERATURA

- [1] PN-IEC 61140:2005/A1:2008 Ochrona przed porażeniem prądem elektrycznym – Wspólne aspekty instalacji i urządzeń
- [2] PN-HD 60364-4-41:2009 Instalacje elektryczne niskiego napięcia. Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa. Ochrona przed porażeniem elektrycznym
- [3] Czapp S., Horiszny J.: Badania symulacyjne układu wyzwalania wyłącznika różnicowoprądowego w warunkach zwiększonej częstotliwości prądu różnicowego, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), nr 2, str. 242-247
- [4] Czaja P., Jąderko A., Wpływ prądów upływu w przewodach ochronnych przekształtników z falownikiem PWM na działanie zabezpieczeń przeciwporażeniowych RCD, *Przegląd Elektrotechniczny*, 89 (2013), nr 12, 203-206
- [5] Czapp S.: Protection against electric shock using residual current devices in circuits with electronic equipment, *Electronics and Electrical Engineering*, 4/2007, s.51-54
- [6] Luo X., Du Y., Wang X. H., Chen M. L.: Tripping characteristics of residual current devices under nonsinusoidal currents, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47, 3/2011, s. 1515-1521
- [7] Norma PN-EN 61008-1:2007 Wyłączniki różnicowoprądowe bez wbudowanego zabezpieczenia nadprądowego do użytku domowego i podobnego (RCCB) – Część 1: Postanowienia ogólne
- [8] Czaja, P.: Examination of the impact of design of a residual current protective device on the release frequency range, *Progress in Applied Electrical Engineering*, PAEE 2017, art. no. 8009009
- [9] Pluta W.A., Angular properties of specific total loss components under axial magnetization in grain-oriented electrical steel. *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 52(4), 2016, pp. 6300912
- [10] IEC 404-3:1999; Magnetic materials. Methods of measurements of soft magnetic properties of electrical steel and type with the use of single sheet tester
- [11] Pluta W.A.: Measurements of magnetic properties of electrical steel sheets for the aim of loss separation, *Journal of Electrical Engineering*, Vol. 61, nr 7/s (2010), s. 58-61
- [12] Soiński M., Pluta W., Zurek S., Kozłowski A.: Metrological attributes of current transformers in electrical energy meters. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Volume 44, Nr 3-4 / 2014 s. 279-284
- [13] Pluta W., Świeboda C., Leszczyński J., Soiński M., Some remarks on metrological properties and production technology of current transformers made of nanocrystalline cores, *Measurement*, Vol. 97, 2017, Pages 38-44