

Wpływ konstrukcji wyłącznika różnicowoprądowego na czas jego wyzwolenia

Streszczenie. Wyłączniki różnicowoprądowe (RCD) są urządzeniami mogącymi zapewnić bardzo dobrą ochronę przed porażeniem prądem elektrycznym. W produkowanych obecnie wyłącznikach RCD dla zapewnienia odpowiedniej czułości na prąd różnicowy, coraz częściej stosowane jest dopasowanie impedancyjne w obwodzie pośredniczącym. W artykule opisano wpływ zastosowania w obwodzie pośredniczącym dodatkowych elementów dopasowania impedancyjnego oraz właściwości magnetycznych rdzenia przekładnika sumującego na czas wyzwolenia wyłącznika RCD. Przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych wyłączników RCD o różnej konstrukcji wewnętrznej.

Abstract. Residual current protective devices (RCDs) can provide very good protection against electric shock. In currently produced RCDs to ensure adequate sensitivity of residual current devices, impedance matching in the intermediate circuit is increasingly used. This paper describes the influence of the use of additional impedance matching elements in the intermediate circuit and magnetic properties of a summing transformer core on the tripping time of RCDs. The results of laboratory research on RCDs with different internal design are presented. (**Influence of the RCD design on its tripping time**)

Słowa kluczowe: wyłącznik różnicowoprądowy, prąd różnicowy zadziałania, czas wyłączenia RCD.

Keywords: residual current protective device (RCD), tripping differential current, tripping time of RCD.

Wstęp

Zgodnie z treścią paragrafu 183 rozporządzenia w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [1], w instalacjach elektrycznych należy stosować wyłączniki RCD jako środek ochrony przeciwporażeniowej uzupełniającej oraz zapewniającej ochronę przed powstaniem pożaru, powodując w warunkach uszkodzenia samoczynne wyłączenie zasilania. Powyższy zapis jest bardzo ogólny, nie precyzuje w jakich obwodach instalacji oraz w jakich warunkach środowiskowych należy stosować wyłączniki RCD.

Bardziej precyzyjne wymagania określa norma [2], przywołana w rozporządzeniu [1], która nakazuje stosowanie ochrony uzupełniającej w obwodach instalacji prądu przemiennego za pomocą urządzeń różnicowoprądowych o znamionowym prądzie różnicowym $I_{\Delta n} \leq 30$ mA. Tego typu urządzeniami należy zabezpieczyć obwody gniazd wtykowych o prądzie znamionowym nieprzekraczającym 20 A, które są przewidziane do powszechnego użytku przez osoby niewykwalifikowane oraz obwody urządzeń ruchomych o prądzie znamionowym nieprzekraczającym 32 A, używanych na zewnątrz budynków. Ochronę uzupełniającą należy również stosować w przypadku specjalnych warunków zewnętrznych oraz w niektórych pomieszczeniach specjalnych [2].

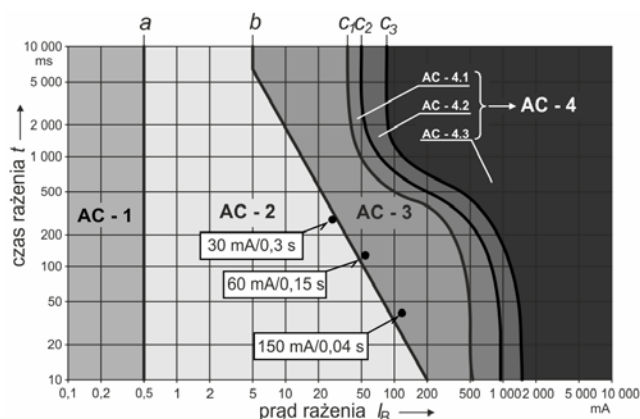
Nowo wprowadzona norma [3] (jeszcze nie przywołana w rozporządzeniu [1]), która zastępuje normę [2], zwiększa zakres stosowania wyłączników RCD w obwodach ogólnego przeznaczenia do prądu znamionowego nieprzekraczającego 63 A. Dodatkowo pojawił się wymóg stosowania wyłączników RCD, w końcowych obwodach oświetleniowych w obiektach indywidualnych gospodarstwa domowego [3].

Wyłączniki RCD wysokoczułe o prądzie $I_{\Delta n} \leq 30$ mA, są urządzeniami zapewniającymi bardzo dobrą ochronę przed porażeniem prądem elektrycznym. W przypadku wyłączników RCD mających zapewnić ochronę uzupełniającą w obwodach niskiego napięcia, zakres poprawnego wyzwolenia powinien zawierać się w granicach od 15 mA do 30 mA. Graniczne czasy zadziałania oraz niezadziałania w przypadku wyłączników RCD selektywnych określają normy [4, 5]. Zdefiniowane w powyższych normach, maksymalne czasy wyłączenia dla

wyłączników RCD ogólnego zastosowania, pokrywają się z krzywą (b) na rys. 1, którą uznaje się za graniczną wartość prądu samouwolnienia, po przekroczeniu której nie jest możliwe samodzielne uwolnienie się rażonego spod napięcia.

Tabela 1. Znormalizowane wartości czasu wyłączenia i czasu niezadziałania wyłączników RCD [4, 5]

Typ	I_n	$I_{\Delta n}$	Znormalizowane wartości czasu wyłączenia i czasu niezadziałania dla prądu różnicowego (I_{Δ}) równego:		
			$I_{\Delta n}$	$2 \cdot I_{\Delta n}$	$5 \cdot I_{\Delta n}$
ogólnego zastosowania	dowolna wartość	dowolna wartość	maksymalny czas wyłączenia:		
			0,3 s	0,15 s	0,04 s
selektywna	≥ 25 A	$> 0,03$ A	maksymalny czas wyłączenia:		
			0,5 s	0,2 s	0,15 s
			minimalny czas wyłączenia:		
			0,13 s	0,06 s	0,05 s



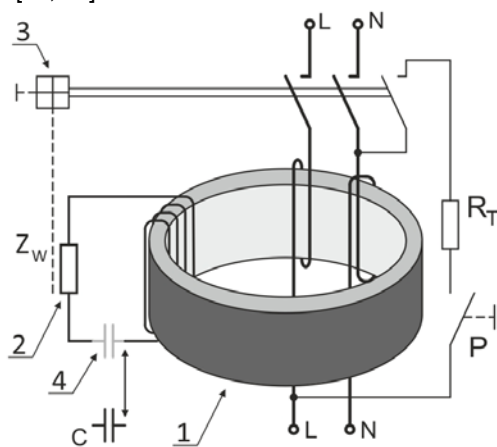
Rys. 1. Działanie na organizm ludzki prądu elektrycznego o częstotliwości $15 \div 100$ Hz przy przepływie prądu na drodze obie stopy - lewa ręka [6]

Zdarzenia zagrażające bezpośrednio życiu występują wówczas, gdy wartości prądu i czasu rażenia przekraczają wartości graniczne wynikające z krzywych $c_1 - c_2 - c_3$, rozdzielczych strefy AC-3 i AC-4. Krzywa c_1 wyznacza granicę tolerowanego ryzyka, dopuszczalnego przy stosowaniu środków ochrony przeciwporażeniowej [6].

Normy [4, 5], nie określają minimalnych czasów zadziałania dla wyłączników RCD ogólnego zastosowania. Wyłącznik RCD o krótkich czasach zadziałania, jest bardzo dobrym środkiem ochrony przeciwporażeniowej w przypadku powstania uszkodzenia w chronionym obwodzie ale może również powodować zbędne wyłączenia w przypadku przejściowych impulsów prądowych. Problemy ze zbędnymi wyłączeniami są powszechnie znane [7 - 11], występują w przypadku załączania obwodów instalacji z zabudowanymi zasilaczami elektronicznymi (np. oprawy LED, zasilacze komputerowe, UPS-y, itp.). W artykule opisano wpływ konstrukcji wewnętrznej wyłącznika RCD na jego czasu wyłączenia. Przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych dla różnych typów wyłączników RCD.

Budowa wewnętrzna wyłączników RCD

Produkowane seryjnie wyłączniki RCD typu AC i A, są wyłącznikami o działaniu niezależnym od napięcia panującego w chronionym obwodzie instalacji elektrycznej. Obwód wtórny przekładnika prądowego bezpośrednio zasila wyzwalacz elektromagnetyczny o odpadającej zworze [10, 12].



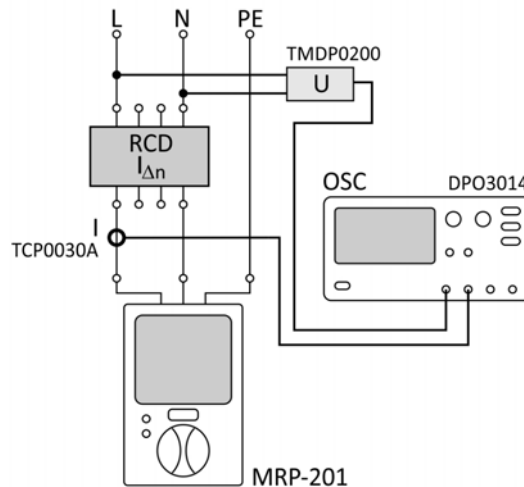
Rys. 2. Konstrukcja wyłącznika RCD o działaniu niezależnym od napięcia obwodu: 1 - przekładnik prądowy sumujący, 2 - obwód elektromagnetycznego wyzwalacza o odpadającej zworze, 3 - mechanizm zatraskowy styków, 4 - kondensator (C) dopasowania impedancyjnego - opcjonalnie, P - przycisk test, R_T - rezystor testowy

W wyłącznikach RCD dostępnych na rynku, coraz częściej dla zapewnienia prawidłowego progu wyzwalania, w obwodzie wtórnym stosowane jest dopasowanie impedancyjne obciążenia do impedancji gałęzi poprzecznej, uzyskując wydzielenie maksymalnej mocy na wyzwalaczu elektromagnetycznym [13]. Uzyskuje się to włączając w obwodzie wtórnym kondensator szeregowy tak dobrany, aby kompensował reaktancję indukcyjną obwodu wtórnego [11]. Należy dążyć do uzyskania dużej różnicy argumentów impedancji gałęzi (poprzecznej) magnesowania i impedancji obciążenia (najlepiej 90°). Dopasowanie impedancyjne skuteczne jest tylko dla częstotliwości zbliżonych do 50 Hz, zwiększenie lub zmniejszenie częstotliwości prądu różnicowego skutkuje brakiem wyzwalania wyłącznika RCD [10].

Pomiary czasu wyzwolenia wyłączników RCD

Pomiary laboratoryjne czasu wyzwolenia wyłączników RCD, przeprowadzono w dwóch wariantach układu pomiarowego. W pierwszym wariantcie (rys. 3), czas mierzono z wykorzystaniem specjalistycznego miernika MRP-201 produkcji firmy SONEL. Wymieniony miernik, służy do przeprowadzania testów oraz pomiarów poprawności działania wyłączników RCD w trakcie badań

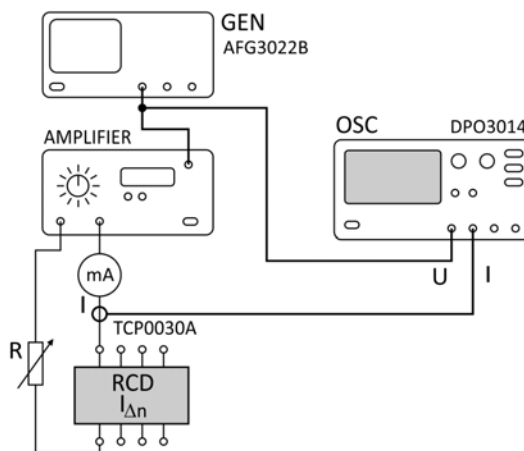
odbiorczych lub okresowych instalacji elektrycznych niskiego napięcia. Miernik MRP-201 umożliwia przeprowadzenie pomiarów dla wszystkich typów wyłączników RCD (AC, A, B) stosowanych w instalacjach zgodnie z wymogami obowiązujących norm [4, 5, 14].



Rys. 3. Schemat układu pomiarowego do wyznaczenia czasu zadziałania wyłączników RCD z wykorzystaniem miernika MRP-201 prod. SONEL

Badany wyłącznik RCD (rys. 3), zasilany był bezpośrednio z instalacji elektrycznej 230 V a.c. (L, N, PE). Miernikiem MRP-201 wymuszano odpowiedni przebieg prądu różnicowego: sinusoidalny - faza 0° , - faza 180° , połowkowy dodatni, połowkowy ujemny dla wartości 30 mA, 60 mA oraz 150 mA. Na oscyloskopie za pośrednictwem sondy napięciowej i prądowej obserwowano oraz rejestrowano przebiegi napięcia i prądu różnicowego dla poszczególnych przypadków.

Na rys. 4. przedstawiono drugi wariant układu pomiarowego. Generatorem wymuszano przebieg sinusoidalny o odpowiedniej fazie początkowej. Wzmacniaczem oraz rezystorem (R) regulowano wartość skuteczną prądu przepływającego przez badany wyłącznik RCD. Na oscyloskopie rejestrowano przebiegi napięcia i prądu pomiarowego oraz mierzono czasy zadziałania badanych wyłączników RCD.



Rys. 4. Schemat układu pomiarowego do wyznaczenia czasu zadziałania wyłączników RCD dla różnych faz początkowych prądu różnicowego

Wyniki badań laboratoryjnych

Badania laboratoryjne przeprowadzone zostały dla ośmiu wyłączników RCD o znamionowym prądzie różnicowym $I_{\Delta n} = 30 \text{ mA}$. Były to wyłączniki różnych producentów ogólnie dostępne na rynku o różnych parametrach technicznych. Podstawowe parametry techniczne badanych wyłączników RCD zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Zestawienie parametrów technicznych wyłączników RCD poddanych badaniom laboratoryjnym

Oznaczenie	Rodzaj	Typ/parametry
RCD-1	RCBO	A/0,03/B16 - 2P
RCD-2	RCBO	AC/0,03/C16 - 4P
RCD-3	RCCB	AC/0,03/40 - 4P
RCD-4	RCCB	AC/0,03/25 - 2P
RCD-5	RCCB	A/0,03/25 - 2P
RCD-6	RCCB	A/0,03/25 - 4P
RCD-7	RCCB	AC/0,03/25 - 2P
RCD-8	RCCB	AC/0,03/40 - 2P

Wyłączniki oznaczone jako RCD-1 i 2 to wyłączniki RCBO z zabudowanymi członami nadprądowymi, odpowiednio B16 oraz C16. Pozostałe wyłączniki 3 ÷ 8 to wyłącznikami RCCB o dopuszczalnym prądzie długotrwałego obciążenia określonym w parametrach (A/AC - typ, 2P/4P - liczba biegunów).





W tabeli 3 zestawiono czasy zadziałania badanych wyłączników RCD dla pierwszego wariantu układu pomiarowego z wykorzystaniem miernika MRP-201.

Tabela 3. Zestawienie czasów zadziałania wyłączników RCD uzyskanych miernikiem MRP-201 (wymuszenie sinusoidalne 50 Hz o fazie początkowej 0°)

Ozn.	$I_{\Delta n}$			AUTO	
	1· $I_{\Delta n}$ 30 mA	2· $I_{\Delta n}$ 60 mA	5· $I_{\Delta n}$ 150 mA	t	$I_{\Delta n}$
RCD-1	27 ms	10 ms	8 ms	27 ms	19 mA
RCD-2	35 ms	15 ms	13 ms	35 ms	19 mA
RCD-3	8÷18 ms	7 ms	7 ms	18 ms	17 mA
RCD-4	8 ms	6 ms	5 ms	9 ms	22 mA
RCD-5	25 ms	9 ms	7 ms	25 ms	16 mA
RCD-6	10÷18 ms	8 ms	7 ms	11 ms	24 mA
RCD-7	27 ms	10 ms	8 ms	27 ms	20 mA
RCD-8	27 ms	10 ms	8 ms	27 ms	19 mA

Pomiary wykonano dla prądów różnicowych: 30 mA, 60 mA, 150 mA oraz w trybie AUTO (pomiar czasu oraz prądu zadziałania) dla wymuszenia sinusoidalnego o fazie początkowej 0° (50 Hz).

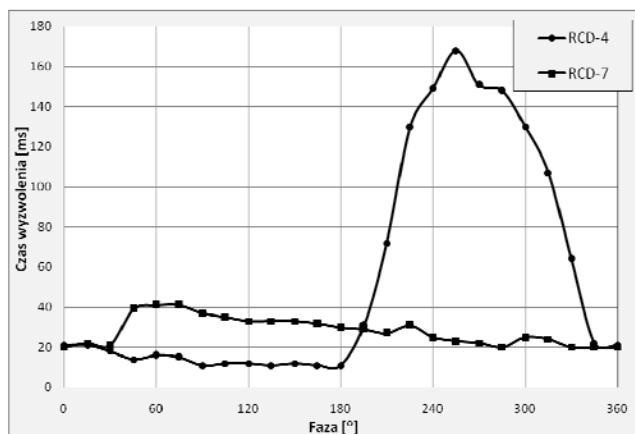
Tabela 4. Zestawienie czasów zadziałania wyłączników RCD uzyskanych miernikiem MRP-201 dla różnych kształtów wymuszeń prądu pomiarowego (50 Hz)

				
	30 mA	30 mA	30 mA	30 mA
RCD-1	27 ms	17 ms	10 ms	15 ms
RCD-2	35 ms	26 ms	15 ms	28 ms
RCD-3	8 ms	8 ms	7 ms	brak
RCD-4	8 ms	18 ms	6 ms	brak
RCD-5	25 ms	16 ms	9 ms	14 ms
RCD-6	17 ms	17 ms	7 ms	8 ms
RCD-7	27 ms	18 ms	10 ms	15 ms
RCD-8	27 ms	17 ms	10 ms	15 ms

W tabeli 4 zestawiono czasy zadziałania badanych wyłączników RCD dla prądu różnicowego 30 mA (50 Hz) w

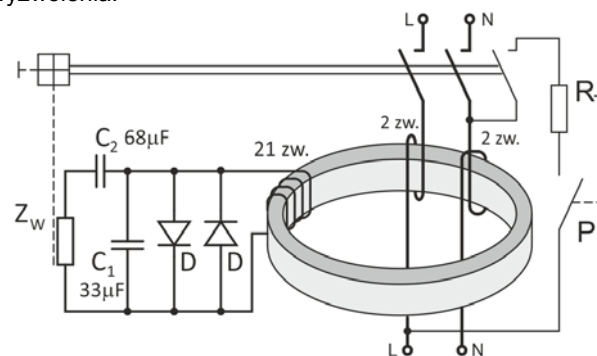
przypadku wymuszenia sinusoidalnego faza 0°, faza 180°, połówkowy dodatni oraz połówkowy ujemny.

Na rys. 5 przedstawiono zależność czasu zadziałania dwóch wyłączników: RCD-4 oraz RCD-7, dla różnych kątów prądu wyzwalającego, uzyskanych z wykorzystaniem drugiego układu pomiarowego. Pomiary przeprowadzono dla prądu 30 mA (50 Hz) w zakresie od 0° do 360° ze skokiem co 15°.



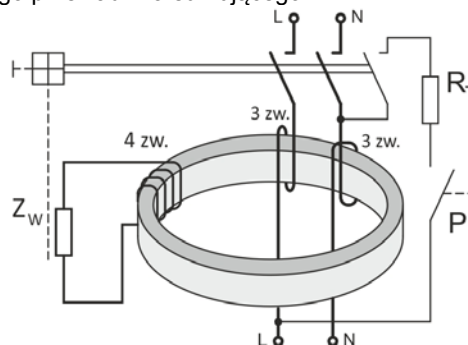
Rys. 5. Zależność czasu zadziałania wybranych wyłączników od kąta prądu wyzwolenia ($I_{\Delta n}$) - 30 mA, 50 Hz

Na rys. 6, przedstawiono schemat budowy wewnętrznej wyłącznika RCD-7 w którym zastosowano układ dopasowania impedancyjnego w obwodzie wtórnym przekładnika sumującego. Pozostałe wyłączniki RCD-1, 2, 5, 6, 7, 8, były podobnej budowy wewnętrznej, uzyskano dla nich podobne zależności czasu zadziałania od kąta wyzwolenia.



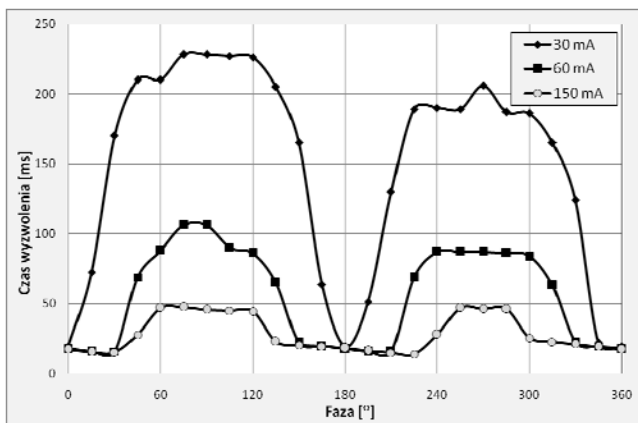
Rys. 6. Schemat budowy wewnętrznej wyłącznika RCD-7

Na rys. 7 przedstawiono schemat budowy wewnętrznej wyłącznika RCD-4. W wyłączniku tym, wyzwalacz elektromagnetyczny bezpośrednio zasilany jest z uzwojenia wtórnego przekładnika sumującego.

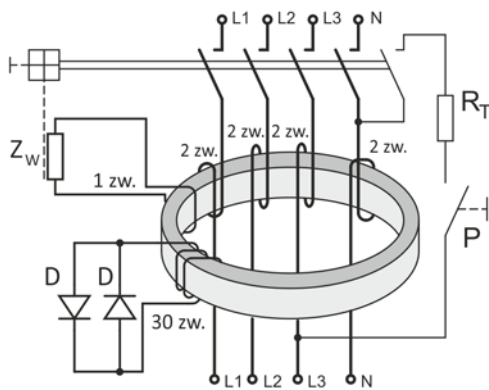


Rys. 7. Schemat budowy wewnętrznej wyłącznika RCD-4

Na rys. 8 przedstawiono zależności czasu zadziałania wyłącznika RCD-3 (schemat ideowy rys. 9) od kąta prądu wyzwolenia dla prądów 30 mA, 60 mA oraz 150 mA.



Rys. 8. Zależność czasu zadziałania wyłącznika RCD-3 od kąta prądu wyzwolenia ($I_{\Delta n}$), dla 30 mA, 60 mA, 150mA, 50 Hz



Rys. 9 Schemat budowy wewnętrznej wyłącznika RCD-3

Wnioski

Wyłączniki RCD z układem dopasowania impedancyjnego (RCD-1, 2, 5, 6, 7, 8), charakteryzują się czasami wyłączenia 17÷45 ms dla prądu $I_{\Delta} = 30$ mA. Uzyskane czasy wyłączenia są stabilne i nie zależą od kąta prądu wyzwolenia. W przypadku wymuszeń prądem sinusoidalnym jedno-połódkowym (miernik MRP-201) czasy wyłączenia wynoszą 7÷14 ms.

Wyłączniki RCD bez układu dopasowania impedancyjnego (RCD-3, -4) charakteryzują się dużą zależnością czasu zadziałania od kąta prądu wyzwolenia. Dla wyłącznika RCD-3 (rys. 8 i 9), czasy wyzwolenia dla kątów 0° oraz 180° wynoszą 10 ± 20 ms i nie zależały od wartości prądu $I_{\Delta n}$. Dla kątów wyzwolenia 90° oraz 270° , czasy wyzwolenia były najdłuższe (do 240 ms) i zależały od wartości prądu $I_{\Delta n}$ (rys. 8). Dla prądu $I_{\Delta n} = 150$ mA, czasy zadziałania wynosiły ok. 50 ms - badany wyłącznik RCD-3 nie spełniał wymagań normy [4].

Czasy zadziałania wyłączników RCD-3 oraz -4, zmierzone miernikiem MRP-201 dla różnych kształtów wymuszeń wynosiły od 8 do 18 ms.

Rozpatrując ochronę przeciwporażeniową dodatkową realizowaną jako samoczynne wyłączenie zasilania jak również ochronę uzupełniającą, wszystkie przebadane wyłączniki RCD zapewniają jej skuteczność poprzez wyłączenia uszkodzonego obwodu instalacji elektrycznej w czasach krótszych od wymagań określonych w normach [2 - 4] (za wyjątkiem RCD-3 dla $I_{\Delta n} = 150$ mA).

Wszystkie wyłączniki a w szczególności wyłączniki bez układu dopasowania impedancyjnego (RCD-3, -4), mogą powodować zbędne wyłączenia obwodów instalacji w przypadku chwilowych impulsów prądowych powstających w chronionych obwodach. Przypadki takie występują w obwodach z zabudowanymi lub podłączonymi urządzeniami elektronicznymi, np. komputerami, zasilaczami UPS, oprawami LED. W przypadku obwodów oświetleniowych, zbędne zadziałania wyłączników RCD mogą być przyczyną powstania niebezpiecznych sytuacji dla użytkowników (zanik oświetlenia podstawowego).

Specjalistyczne mierniki do badań okresowych instalacji elektrycznych dostępne na rynku, np.: MRP-201, MPI-502, MPI-530; umożliwiają przeprowadzenie pomiarów czasu zadziałania wyłączników RCD tylko dla prądów wyzwolenia $I_{\Delta n}$ o kątach 0° lub 180° . Miernikom tego typu, brakuje możliwości przeprowadzenia pomiarów dla kątów wyzwolenia 90° oraz 270° gdy występują najdłuższe czasy zadziałania wyłączników RCD bez układu dopasowania impedancyjnego.

Autorzy: dr inż. Paweł Czaja, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: czajap@el.pcz.czyst.pl; dr hab inż. Wojciech Pluta, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: plutaw@el.pcz.czyst.pl

LITERATURA

- [1] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, (Dz.U. 2019.1065 t.j.)
- [2] Norma PN-HD 60364-4-41:2009 Instalacje elektryczne niskiego napięcia. Część 4-41: Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa. Ochrona przed porażeniem elektrycznym
- [3] Norma PN-HD 60364-4-41:2017-09 Instalacje elektryczne niskiego napięcia. Część 4-41: Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa. Ochrona przed porażeniem elektrycznym
- [4] Norma PN-EN 61008-1:2007 Wyłączniki różnicowoprądowe bez wbudowanego zabezpieczenia nadprądowego do użytku domowego i podobnego (RCCB). Część 1: Postanowienia ogólne.
- [5] Norma PN-EN 61009-1:2009 Wyłączniki różnicowoprądowe z wbudowanym zabezpieczeniem nadprądowym do użytku domowego i podobnego (RCBO). Część 1: Postanowienia ogólne.
- [6] IEC – Raport 479-1 Effects of current on human beings and live Stock, ESV, Vienna (2002).
- [7] Luo X., Du Y., Wang X.H., Chen M.L., Tripping characteristics of residua current devices under nonsinusoidal currents, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 3 (2011), n.47, 1515-1521
- [8] Czapp S., Elimination of the negative effect of earth fault current high er frequency on stripping of residua current devices, *Electronics and Electrical Enginnering*, (2009), n.3, 85-88
- [9] Czapp S., Protection against electric shock Rusing residua current devices In circuits with electronic equipment, *Electronics and Electrical Enginnering*, (2007), n.4, 51-54
- [10] Czaja P., Examination of the impact of design of a residua current protective device on the release frequency range, *Progress In Applied Electrical Engineering*, PAEE (2017), art.n. 8009009
- [11] Czapp S., Horiszny J., Badania symulacyjne układu wyzwolania wyłącznika różnicowoprądowego w warunkach zwiększonej częstotliwości prądu różnicowego, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), n.2, 242-247
- [12] Czaja P., Pluta W., Właściwości magnetyczne rdzeni przekładników sumujących wyłączników różnicowoprądowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 95 (2019), n.12, 109-112
- [13] Czapp S., Wyłączniki różnicowoprądowe w ochronie przeciwporażeniowej przy odkształconym prądzie różnicowym, *Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej*, (2009)
- [14] Norma PN-HD 60364-6:2016-07 Instalacje elektryczne niskiego napięcia. Część 6: Sprawdzanie