

Skuteczność działania zabezpieczeń przeciwporażeniowych RCD w tyrystorowych układach napędowych z silnikiem prądu stałego

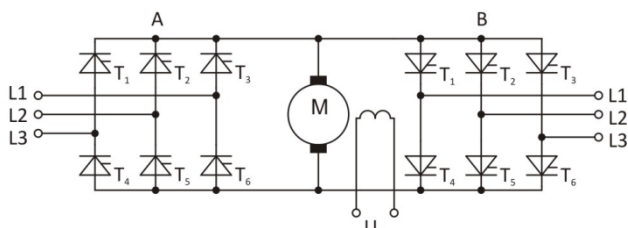
Streszczenie. W artykule opisano wpływ odkształcenia prądu upływu na skuteczność działania wyłączników RCD włączonych w obwody zasilania napędów elektrycznych prądu stałego z przekształtnikami tyrystorowymi. Przeprowadzono próby skuteczności działania kilkunastu wyłączników RCD włączonych w obwód zasilania napędu. Pokazano wpływ konstrukcji wyłączników RCD na zakres wyzwalania. Wskazano problemy związane z zastosowaniem typowych wyłączników RCD jako środka ochrony przeciwporażeniowej w obwodach z napędami tyrystorowymi prądu stałego.

Abstract. Influence of the leakage current deformation on operation effectiveness of the Residual Current Devices switched into DC electrical drives are described in this paper. Waveforms of the leakage current are shown. Testes of effectiveness of more than ten RCD-s into the supply line of the thyristor converter are performed. Influence of the RCD-s structure on operation range are described. The problems of the typical RCD-s applications in the electrical circuits with DC thyristor drives, as a protective equipments against electric shock, are indicated. **(Operation Effectiveness of Residual Current Protective Devices in Thyristor Electrical Drives with DC motor)**

Słowa kluczowe: tyrystorowy napęd elektryczny, silnik prądu stałego, wyłącznik RCD, skuteczność ochrony
Keywords: thyristor electrical drive, DC motor, RCD switch, effectiveness of protective

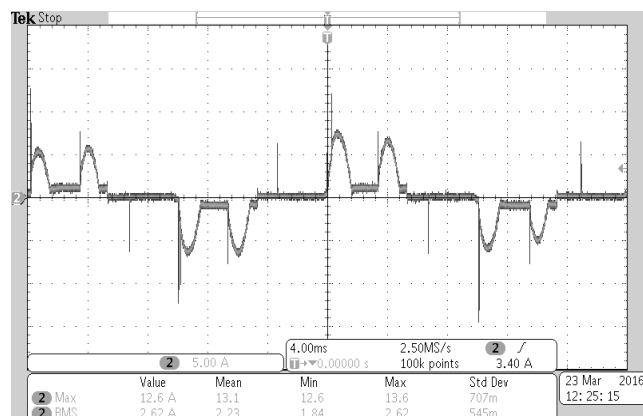
Wstęp

W układach napędowych prądu stałego z regulowaną prędkością obrotową, silniki są zwykle zasilane z tyrystorowych przekształtników sterowanych o komutacji sieciowej, wykonanych w topologii mostkowej (6T). Poprzez zmianę kąta opóźnienia zapłonu tyrystorów w stosunku do punktów komutacji naturalnej można zmieniać w sposób płynny wartość średnią napięcia wyprostowanego na wyjściu przekształtnika. Przekształtnik sterowany zapewnia również w warunkach pracy falownikowej, dwukierunkowy przepływ energii, co pozwala na hamowanie silnika i zwrot energii hamowania do sieci zasilającej. W napędzie elektrycznym o regulowanej prędkości z maszyną prądu stałego, przekształtniki wykorzystywane są do zasilania obwodu twornika silnika oraz, w dwustrefowych układach regulacji prędkości, do zasilania obwodu wzbudzenia silnika (te ostatnie stosuje się zwykle w napędach dużej mocy - rzędu MW). Układy regulacji zapewniają płynną zmianę prędkości lub momentu obrotowego na wale silnika oraz uzyskanie pożądaných w danym napędzie właściwości dynamicznych. Układ regulacji umożliwia odpowiednie kształtowanie charakterystyk mechanicznych silnika, zapewniając przy zastosowaniu sprzężenia prędkościowego z wykorzystaniem tachoprądnicy lub przetwornika obrotowo – impulsowego (enkodera), uzyskanie sztywnych charakterystyk mechanicznych silnika. W układach napędowych prądu stałego stosuje się kaskadową strukturę regulatora prędkości z regulatorem prądu twornika w wewnętrznej pętli sprzężenia zwrotnego. Układ elektryczny typowego napędu prądu stałego o mocy do kilkunastu kW pokazano na rysunku 1 [1, 2].

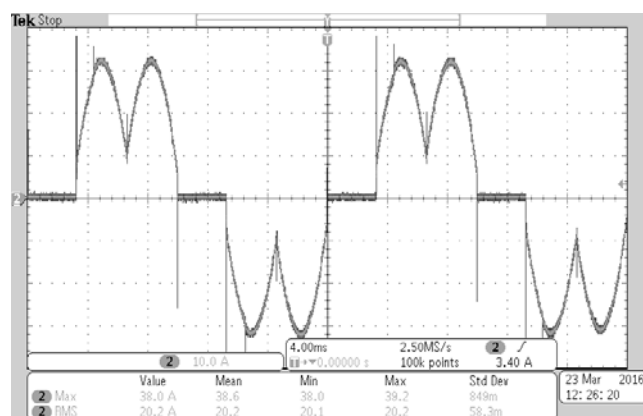


Rys. 1. Układ elektryczny napędu prądu stałego ze sterowanymi przekształtnikami tyrystorowymi

Prędkość obrotowa silnika regulowana jest poprzez zmianę napięcia twornika przy stałym prądzie wzbudzenia. Układ dwóch przekształtników tyrystorowych zapewnia pracę czterokwadrantową napędu, tj. pracę silnikową w obu kierunkach oraz hamowanie w obu kierunkach. Na skutek pracy w układzie prostowników sterowanych, prąd w przewodach fazowych jest odkształcony.



Rys. 2. Przebieg prądu fazowego w stanie jałowym układu napędowego



Rys. 3. Przebieg prądu fazowego przy obciążeniu układu napędowego





Kształt przebiegów prądów fazowych w sieci zasilającej sterowany układ napędowy prądu stałego jest uzależniony od chwilowego obciążenia układu. W zależności od wartości momentu na wale silnika, nadrzędny regulator prędkości powoduje zmiany kąta opóźnienia zapłonu tyrystorów, przez co zmienia się kształt prądu płynącego przez wirnik, a co za tym idzie kształty prądów w fazach sieci zasilającej. Poza tym, prąd płynący przez wirnik silnika może mieć, w zależności od wartości obciążenia, charakter ciągły bądź przerywany.

Przebieg prądu fazowego w stanie jałowym układu napędowego pokazano na rysunku 2. Przebieg prądu fazowego przy obciążeniu układu napędowego pokazano na rysunku 3.

Rodzaje wyłączników różnicowoprądowych

Ze względu na rodzaj wykrywanych przebiegów prądów różnicowych produkowane są trzy typy wyłączników RCD oznaczone symbolami: AC, A i B. W tabeli 1 zestawiono oznaczenia wyłączników RCD w powiązaniu z rodzajami wykrywanych przebiegów.

Tabela 1. Rodzaje wyłączników RCD ze względu na zakres wykrywanych przebiegów prądu różnicowego [2, 3]

Oznaczenie literowe (symbol graficzny)	Przebieg prądu różnicowego, przy którym jest zapewnione wyzwalenie wyłącznika
AC 	- prąd przemienny sinusoidalny (na ogół 50/60 Hz)
A 	- prąd przemienny sinusoidalny (na ogół 50/60 Hz), - prąd pulsujący stały, - prąd pulsujący stały ze składową wygładzoną 6 mA, z ewentualnym sterowaniem fazowym niezależnie od biegunowości;
B  lub 	- prąd przemienny sinusoidalny (na ogół 50/60 Hz), - prąd przemienny sinusoidalny o częstotliwości nieprzekraczającej 1000 Hz, - prąd przemienny sinusoidalny ze składową wygładzoną o wartości większej spośród dwóch: $0,4I_{\Delta n}$ i 10 mA, - prąd pulsujący stały ze składową wygładzoną o wartości większej spośród dwóch: $0,4I_{\Delta n}$ i 10 mA, - prąd stały z układów prostowniczych: ▪ z prostownika dwupulsowego zasilanego napięciem międzyprzewodowym w przypadku wyłączników 2-, 3- i 4-biegunowych, ▪ z prostownika trójpulsowego (układ gwiazdy) albo z prostownika sześciopulsowego w przypadku wyłączników 3- i 4-biegunowych, - prąd stały wygładzony z ewentualnym sterowaniem fazowym niezależnie od biegunowości.

W instalacjach elektrycznych ogólnego przeznaczenia (budownictwo mieszkaniowe, biura, obiekty użyteczności publicznej, drobny przemysł, itd.), powszechnie montowane są wyłączniki RCD typu AC lub A. Oba typy są wyłącznikami o działaniu niezależnym od napięcia panującego w instalacji. W przypadku obniżenia napięcia sieciowego (np. na skutek zwarcia) lub wystąpienia przerwy (np. przewodu neutralnego) zabezpieczony wyłącznikiem obwód nadal będzie chroniony.

Wyłączniki typu B cechują się najszerszym spektrum wykrywanych przebiegów prądów różnicowych ale są

wyłącznikami o działaniu zależnym od napięcia sieci. Dostępne są na rynku również specjalne wykonania wyłączników typu B, dedykowane do detekcji prądów różnicowych o częstotliwości 400 Hz, jak również w zakresie powyżej 1 kHz (oznaczenie: B+).

Konstrukcje tych wyłączników ze względu na konieczność zastosowania dwóch przekładników i elektronicznego układu detekcyjnego są rozwiązaniami skomplikowanymi technicznie. Wysoki koszt tego typu wyłączników powoduje, że są bardzo sporadycznie montowane w wyjątkowych przypadkach. Wadą wyłączników typu B jest możliwość uszkodzenia lub nieprawidłowego działania na skutek przepięć pojawiających się w chronionym obwodzie. Wyłącznik typu B do prawidłowej pracy wymaga określonej minimalnej wartości napięcia między minimum dwoma przewodami chronionego obwodu [5].

W niektórych krajach europejskich (np. w Niemczech), zgodnie z wewnątrz krajowymi przepisami i normami, do ochrony przeciwporażeniowej uzupełniającej mogą być stosowane tylko wyłączniki o działaniu niezależnym od napięcia, czyli typu AC i A. Ze względu na to, że działanie tych wyłączników opiera się na zasadzie indukcyjnej, wpływ na wartość progu i czasu wyzwolenia ma kształt oraz częstotliwość prądu różnicowego. W zależności od wykonania obwodu wtórnego przekładnika prądowego sumującego, odpowiedni próg wyzwolenia zagwarantowany jest w bardzo wąskim zakresie częstotliwości prądu różnicowego. Wymagania określone w normach przedmiotowych odnośnie działania wyłączników typu AC i A określone są tylko dla prądów przemiennych sinusoidalnych oraz dla zdefiniowanych kształtach o częstotliwości 50/60 Hz [2, 3].

Rozwój energoelektroniki spowodował, że instaluje się coraz więcej urządzeń przekształtnikowych generujących odkształcone prądy różnicowe, np. tyrystorowe układy napędowe z silnikami prądu stałego. Popularnie montowane w instalacjach wyłączniki RCD typu AC i A, jako środki ochrony przeciwporażeniowej, nie gwarantują odpowiedniej detekcji i wyłączenia tych prądów przy zadanym poziomie i dopuszczalnej zwłóce czasowej.

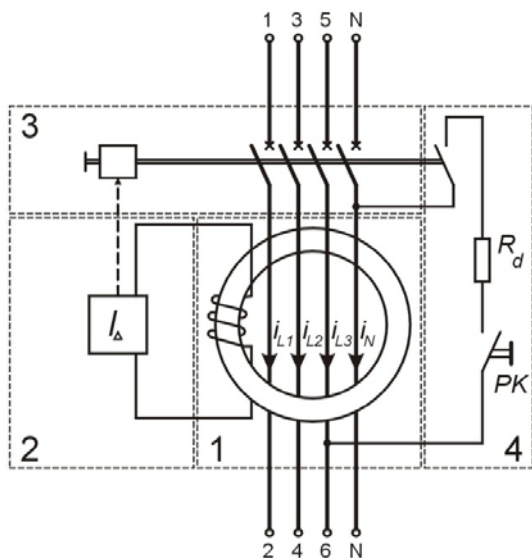
Wpływ konstrukcji wyłączników różnicowoprądowych na zakres częstotliwościowy wyzwiania

Najpopularniejszym obecnie środkiem ochrony przeciwporażeniowej uzupełniającej jest wyłącznik różnicowoprądowy RCD o znamionowym prądzie różnicowym $I_{\Delta n} \leq 30$ mA [6, 7]. Najistotniejszym elementem wyłącznika RCD jest przekładnik sumujący, decydujący o progu zadziałania oraz o uzyskaniu niezbędnej energii do wyzwolenia wyłącznika (rys. 4). O wymaganym poziomie prądu w obwodzie wtórnym przekładnika decyduje wartość zmian indukcji magnetycznej w jego rdzeniu, jaką wywołuje prąd różnicowy o określonym kształcie i częstotliwości. W obwodzie wtórnym przekładnika sumującego często montowane są dodatkowe elementy elektroniczne zapewniające zwłokę czasową lub eliminujące zbędne wyzwiania w przypadku krótkich impulsów prądowych [5].

W produkowanych obecnie seryjnie wyłącznikach RCD, ze względów ekonomicznych, coraz częściej wykorzystuje się na rdzenie przekładników sumujących materiały magnetyczne o stosunkowo niskiej początkowej przenikalności magnetycznej. W związku z tym, dla zagwarantowania prawidłowego progu wyzwiania, stosuje się w obwodzie wtórnym przekładnika dopasowanie impedancyjne, uzyskując wydzielenie maksymalnej mocy w wyzwalaczu elektromagnetycznym [8].

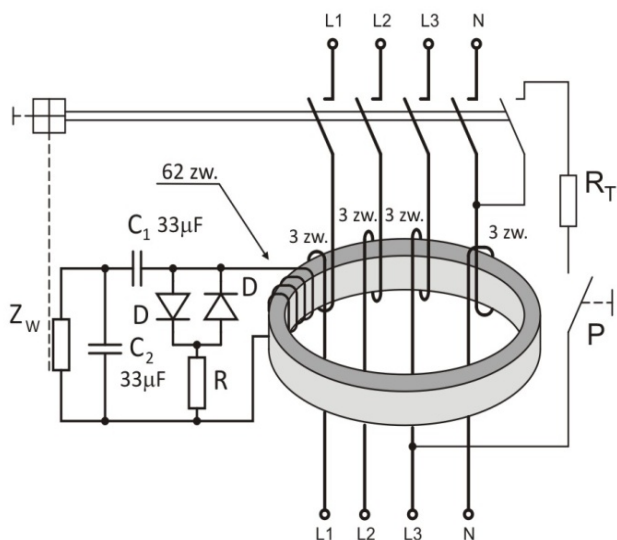
Zastosowanie urządzeń energoelektronicznych w instalacjach elektrycznych generuje powstawanie prądów

różnicowych w szerokim zakresie częstotliwości. W niektórych przypadkach w przebiegu płynącego prądu różnicowego dominującymi mogą być składowe zawierające wyższe harmoniczne.



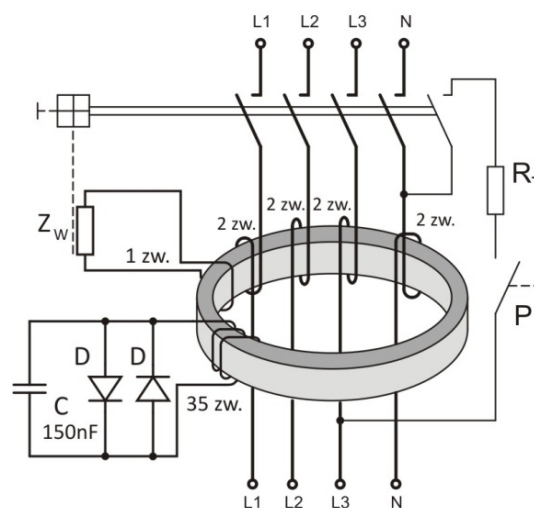
Rys. 4. Schemat blokowy wyłącznika RCD o działaniu niezależnym od napięcia instalacji: 1 – przekładnik prądowy sumujący, 2 – obwód elektromagnetycznego wyzwalacza o odpadającej zworze, 3 – mechanizm zatraskowy styków, 4 – człon kontrolny (PK – przycisk testu, R_d – rezystor testowy) [9]

W przypadku wyłączników z układem dopasowania mocowego, dla częstotliwości prądów różnicowych daleko odbiegających od 50Hz, można spodziewać się nieprawidłowego ich działania. Na rysunkach 5 i 6 pokazano przykładowe schematy, wybranych do badań, wyłączników RCD typu A oraz AC, różnych producentów z obwodami dopasowania mocowego [10, 11].



Rys. 5. Schemat wyłącznika RCD – producent 1, $I_n = 40 A$, $I_{\Delta n} = 30 mA$, typ A

Z punktu widzenia bezpieczeństwa użytkownika typowych układów napędowych prądu stałego z prostownikami sterowanymi istotnym staje się próg zadziałania wyłączników RCD dla częstotliwości 150 Hz i 300 Hz. Częstotliwości te wynikają ze specyfiki działania prostowników tyrystorowych sześciopulsowych.

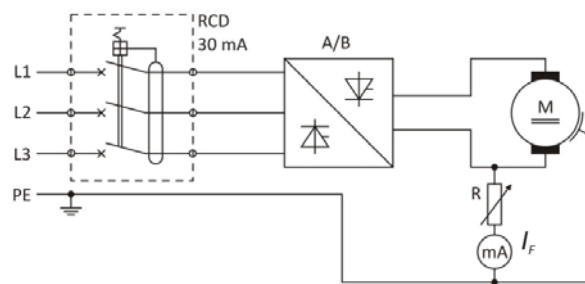


Rys. 6. Schemat wyłącznika RCD – producent 2, $I_n = 25 A$, $I_{\Delta n} = 30 mA$, typ AC

Próby skuteczności wyzwalania wyłączników RCD w obwodzie ze sterowanym napędem prądu stałego

W układzie pomiarowym ze sterowanym napędem prądu stałego, zasilającym silnik obcowzbudny o mocy 5,1 kW, zmierzono prądy wyzwolenia wyłączników RCD, wymuszając przepływ prądu różnicowego za pomocą opornika dekadowego włączonego pomiędzy obwód twornika silnika prądu stałego i przewód ochronny PE.

Schemat układu pomiarowego pokazano na rysunku 7. Pomiarów dokonano dla kilkunastu wybranych wyłączników RCD typu AC i A o różnych konstrukcjach układu wyzwalania i różnych producentów. Wartość skuteczną prądu wyzwolenia wyłącznika mierzono za pomocą miernika True RMS o maksymalnym zakresie częstotliwości 100 kHz. Pomiarów zostały wykonane przy przewodzeniu ciągłym oraz przy przewodzeniu przerywanym prostowników układu napędowego.



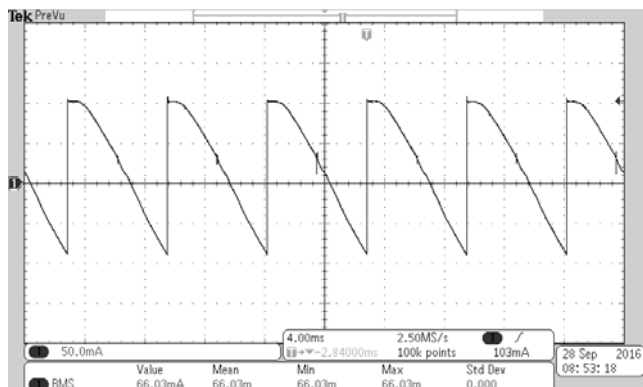
Rys. 7. Schemat układu pomiarowego

Zastosowanie w obwodzie wtórnym przekładnika sumującego elementów elektronicznych zapewniających zwłokę czasową lub eliminujących zbędne wyłączenia, w przypadku krótkich impulsów prądowych (rys. 5 i rys. 6), powoduje nieprawidłowe działanie wyłącznika przy częstotliwościach wyższych od 50/60 Hz, szczególnie przy przewodzeniu przerywanym prostowników tyrystorowych.

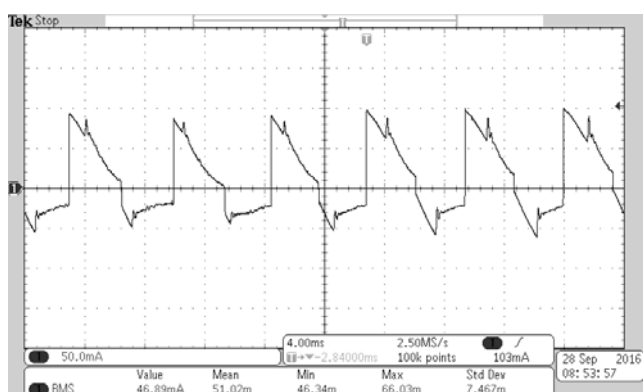
Na rysunku 8 pokazano przebieg prądu różnicowego w przewodzie PE w przypadku przewodzenia ciągłego prostowników w układzie napędowym, natomiast na rysunku 9 pokazano przebieg tego prądu w przypadku przewodzenia przerywanego prostowników.

Wyniki pomiarów prądów zadziałania wybranych wyłączników RCD pokazano w tabeli 2. Prądy zadziałania przyjmują różne wartości w zależności od typu wyłącznika

oraz producenta. Najmniej korzystne parametry wykazują wyłączniki zawierające elektroniczne obwody dopasowania mocowego i posiadające niewielką liczbę zwojów w uzwojeniu wtórnym przekładnika sumującego. Najwyższe wartości prądów zadziałania uzyskano dla stanu przewodzenia przerywanego prostowników, czyli dla pracy układu napędowego z małym obciążeniem.



Rys. 8. Przebieg prądu różnicowego w przewodzie PE w przypadku przewodzenia ciągłego prostowników



Rys. 9. Przebieg prądu różnicowego w przewodzie PE w przypadku przewodzenia przerywanego prostowników

Zadowolające wyniki uzyskano w przypadku zastosowania wyłączników RCD starszych typów (bez dodatkowych układów elektronicznych). W tych przypadkach skuteczną ochronę zapewniały nawet niektóre wyłączniki typu AC, pomimo tego, że z zasady nie powinny być stosowane w obwodach z prostownikami, gdzie prąd ma charakter pulsujący.

Tabela 2. Prąd zadziałania wybranych wyłączników RCD różnych typów i różnych producentów

Typ RCD	Typ A prod. 1	Typ A prod. 2	Typ AC prod. 3	Typ AC prod. 4	Typ AC prod. 5
I_{Δ}	14,3 mA	60,7 mA	29,7 mA	35,2 mA	41,2 mA
Typ RCD	Typ AC prod. 6	Typ A prod. 7	Typ A prod. 8	Typ AC prod. 9	Typ AC prod. 10
I_{Δ}	28,5 mA	47,8 mA	22,7 mA	45,6 mA	56,3 mA

Wnioski

Z przeprowadzonych badań laboratoryjnych wynika, że prądy upływu, płynące w przewodzie ochronnym sterowanego układu napędowego prądu stałego, będące wynikiem działania układów prostownikowych o regulowanym napięciu wyjściowym poprzez zmianę kąta przewodzenia tyrystorów, osiągają dla rezystancji ciała

ludzkiego wartości wielokrotnie przewyższające wartości bezpieczne.

Prądy zadziałania badanych wyłączników RCD przybierają różne wartości, które zależą głównie od parametrów częstotliwościowych elektronicznych układów dopasowania mocowego w obwodzie wtórnym przekładnika sumującego. Wartości prądów zadziałania mieszczą się w określonych granicach [12] występują w przypadku zastosowania wyłączników RCD starszych typów, bez dodatkowych układów elektronicznych.

Otrzymane wyniki badań potwierdzają niską skuteczność ochrony przeciwporażeniowej poprzez zastosowanie standardowych wyłączników RCD z obwodami dopasowania mocowego w obwodach instalacji, w których zastosowano układy napędowe prądu stałego ze sterowanymi prostownikami tyrystorowymi. Wartości prądów wyzwalań wyłączników RCD otrzymane podczas badań sterowanego układu napędowego prądu stałego w większości przypadków nie mieszczą się w dopuszczalnych granicach określonych przepisami normatywnymi [7].

Autorzy:

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

dr. inż. Andrzej Jąderko, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: aj@el.pcz.czest.pl

LITERATURA

- [1] Koczara W.: Wprowadzenie do napędu elektrycznego, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2012
- [2] Zawirski K., Deskur J., Kaczmarek T.: Automatyka napędu elektrycznego, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2012
- [3] Norma PN-EN 61008-1:2007 Wyłączniki różnicowoprądowe bez wbudowanego zabezpieczenia nadprądowego do użytku domowego i podobnego (RCCB) – Część 1: Postanowienia ogólne
- [4] Norma PN-EN 61009-1:2008 Wyłączniki różnicowoprądowe z wbudowanym zabezpieczeniem nadprądowym do użytku domowego i podobnego (RCBO). Część 1: Postanowienia ogólne
- [5] Czapp S.: Wyłączniki różnicowoprądowe w ochronie przeciwporażeniowej przy odkształconym prądzie różnicowym, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2009
- [6] PN-IEC 61140:2005/A1:2008 Ochrona przed porażeniem prądem elektrycznym – Wspólne aspekty instalacji i urządzeń
- [7] PN-HD 60364-4-41:2009 Instalacje elektryczne niskiego napięcia. Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa. Ochrona przed porażeniem elektrycznym
- [8] Czapp S., Horiszny J., Badania symulacyjne układu wyzwalań wyłącznika różnicowoprądowego w warunkach zwiększonej częstotliwości prądu różnicowego, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), nr 2, 242-247
- [9] Borowik L., Czaja P., Skuteczność wyłączników różnicowoprądowych jako środka ochrony przeciwporażeniowej, *Przegląd Elektrotechniczny*, 89 (2013), nr 12, 306-309
- [10] 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
- [11] Czaja P., Jąderko A., Skuteczność działania zabezpieczeń przeciwporażeniowych RCD w układach napędowych z falownikiem napięcia PWM, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92 (2016), nr 1, 200-203
- [12] IEC – Raport 479-1 Effects of current on human beings and live Stock, ESV, Vienna 2002